

## ЗАКОНОМІРНОСТІ ФОРМУВАННЯ ПОКАЗНИКІВ ТОЧНОСТІ ШПИНДЕЛЬНОГО ВУЗЛА ЗАЛЕЖНО ВІД ТЕМПЕРАТУРИ РОБОЧОЇ РІДИНИ В ГІДРОСТАТИЧНІЙ ОПОРІ ШПИНДЕЛЯ

Сапон С. П.

В роботі експериментальним шляхом досліджено закономірності формування показників точності шпиндельного вузла прецизійного токарного верстата залежно від температури та тиску робочої рідини в гідростатичній опорі шпинделя. Наведено результати експериментальних досліджень впливу температури робочої рідини на точність обертання шпинделя та точність обробки зразків-виробів. Встановлено, що з підвищенням тиску в карманах опори зменшується відхилення осі шпинделя від початкового положення та вплив температури на точність форми оброблених поверхонь у всьому діапазоні температур робочої рідини. Встановлені закономірності дозволять здійснювати вибір раціональних експлуатаційних параметрів гідростатичних опор шпинделя при токарній обробці.

В работе экспериментальным путем исследованы закономерности формирования показателей точности шпиндельного узла прецизионного токарного станка в зависимости от температуры и давления рабочей жидкости в гидростатической опоре шпинделя. Приведены результаты экспериментальных исследований влияния температуры рабочей жидкости на точность вращения шпинделя и точность обработки образцов-изделий. Установлено, что с повышением давления в карманах опоры уменьшается отклонение оси шпинделя от начального положения и влияние температуры на точность формы обработанных поверхностей во всем диапазоне температур рабочей жидкости. Выявленные закономерности позволяют осуществлять выбор рациональных эксплуатационных параметров гидростатических опор шпинделя при токарной обработке.

In this paper by experimentation were researched laws of formation parameters accuracy of spindle knot precision turning machine according to the temperature and pressure of the working fluid in the hydrostatic bearing of spindle. The results of experimental researches of influence the temperature working fluid to accuracy rotation of the spindle and accuracy of processing of samples-wares are shown. It was established, that with increasing pressure in the pockets of the hydrostatic bearing decreases deviation spindle axis from the initial position and the influence of temperature on the accuracy forms the processed surfaces of samples-wares in the whole range temperature working fluid. The revealed laws will allow for choice of rational operating parameters of hydrostatic bearings of spindle for lathing.

Сапон С. П.

канд. техн. наук,  
ассистент каф. ТМіДО ЧНТУ  
s.sapon@gmail.com

ЧНТУ – Чернігівський національний технологічний університет, м. Чернігів.

УДК 621.822.572: 621.941.08

Сапон С. П.

### **ЗАКОНОМІРНОСТІ ФОРМУВАННЯ ПОКАЗНИКІВ ТОЧНОСТІ ШПИНДЕЛЬНОГО ВУЗЛА ЗАЛЕЖНО ВІД ТЕМПЕРАТУРИ РОБОЧОЇ РІДИНИ В ГІДРОСТАТИЧНІЙ ОПОРІ ШПИНДЕЛЯ**

Існуючі на сьогодні тенденції до зростання швидкостей різання обумовлюють збільшення температурних навантажень на різальний інструмент та формоутворюючі вузли верстата, зокрема – на шпindelні вузли (ШВ). Похибки обробки, зумовлені тепловими деформаціями елементів верстата, співставні з допусками на виготовлення деталей та вимогами до точності переміщення робочих органів верстата і в найбільшій мірі проявляються на чистових переходах обробки, коли статичні і динамічні деформації пружної системи верстата на точність обробки суттєво не впливають. Тому для підвищення точності і якості обробки необхідно мінімізувати явища температурних деформацій в вузлах металорізальних верстатів. Підвищення теплостійкості ШВ досягається за рахунок зменшення температурних деформацій ШВ та за рахунок застосування систем компенсації похибок обробки, що виникають внаслідок дії термічних навантажень. Тому, для зменшення впливу температурних деформацій вузлів верстата на їх на вихідну точність необхідне проведення ґрунтовних досліджень з метою виявлення закономірностей формування показників точності обробки залежно від інтенсивності теплових процесів у верстаті.

В якості основного вихідного інтегрального показника точності шпindelного вузла рекомендовано використовувати траєкторії фіксованих точок шпindelя, розташованих на допоміжних базах шпindelя, що визначають положення різального інструменту або пристрою із закріпленою заготовкою [1]. Параметри траєкторій тісно пов'язані з показниками точності оброблюваних деталей та корельовані з діючими на шпindel експлуатаційними навантаженнями, зокрема і термічними. В монографії [1] відмічено, що суттєвий вплив на формування траєкторій шпindelя здійснюють його опори, які водночас є одним з основних джерел тепловиділення у ШВ верстатів. Близько 80–90% теплоти в гідравлічних опорах відводиться потоком мащення [1, 2]. Підвищення теплової стабільності ШВ досягається за рахунок використання нових конструктивних рішень, застосування матеріалів із зниженим коефіцієнтом лінійного розширення [3], використання систем автоматичної корекції теплових деформацій [4, 5], чіткого дотримання регламентованих умов експлуатації.

Юркевичем В. В. запропоновано спосіб підвищення точності обробки деталей за рахунок компенсації виявлених теплових і силових похибок підналагодженням верстата в процесі обробки [4]. Незважаючи на високу точність, даний спосіб потребує оснащення верстата додатковим обладнанням та засобами вимірювання, що призводить до підвищення вартості верстата і не завжди можна повноцінно реалізувати в реальних цехових умовах. У виробничих умовах експлуатації без внесення змін в конструкцію верстата підвищити точність обробки можна шляхом компенсації температурних зміщень формоутворюючих вузлів шляхом коригування їх положення на основі результатів досліджень впливу теплових процесів на вихідні характеристики точності верстата. Результати експериментальних досліджень впливу температури та тиску робочої рідини в гідростатичній опорі (ГСО) шпindelя на точність обертання шпindelя та точність обробки зразків-виробів наведено в роботі [6]. Проте, для більш ґрунтового аналізу та виявлення статистичних закономірностей формування показників точності ШВ залежно від тиску та температури робочої рідини в ГСО шпindelя необхідно здійснити статистичний аналіз параметрів траєкторій в комплексі зі спектральним аналізом їх частотного складу та частотного складу контурів оброблених поверхонь зразків-виробів. Це дозволить детально оцінити вплив на точнісні показники ШВ кожного з названих факторів.

Метою роботи є експериментальне дослідження статистичних закономірностей формування показників точності ШВ залежно від тиску та температури робочої рідини в ГСО шпинделя.

В основу методичного підходу до експериментального дослідження точності шпиндельного вузла з ГСО покладено оцінку статистичних показників траєкторій переміщення шпинделя в площині, перпендикулярній до його осі обертання та вимірювання відхилення від круглості зовнішньої циліндричної поверхні зразків-виробів з подальшим спектральним аналізом траєкторій шпинделя та контуру зразків-виробів. Такий підхід дозволяє встановити параметри траєкторій, що визначають точність лінійних розмірів, відхилення форми, хвилястість оброблюваних поверхонь та оцінити взаємозв'язок статистичних характеристик траєкторій шпинделя на ГСО та контурів оброблених поверхонь зразків-виробів.

Дослідження показників точності ШВ здійснювали на експериментальному стенді на базі прецизійного токарного верстата моделі УТ16А із застосуванням інформаційно-вимірювального комплексу засобів експериментальних досліджень, детально описаного в роботах [6, 7] за методикою, наведеною в статті [7].

Для визначення зміщень шпинделя  $\Delta x$  та  $\Delta y$  в площині, перпендикулярній його осі використовувались триангуляційні лазерні датчики моделі РФ603.2-10/2-485-U-IN-AL-CG (рис. 1, а), робочий діапазон яких становить 2 мм, лінійність  $\pm 2$  мкм, роздільна здатність 0,2 мкм, максимальна частота дискретизації  $f_d = 9,4$  кГц. Датчики 2 закріплювались під кутом  $90^\circ$  на стійці 3 і в процесі вимірювань взаємодіяли з контрольним пояском прецизійної оправки 1 (рис. 1, б), яку встановлювали в конічному отворі шпинделя верстата. З метою мінімізації систематичної складової похибки обертання шпинделя, обумовленої відхиленнями форми контрольного пояса прецизійної оправки тонку обробку контрольного пояса 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 1,0 мкм.

Реєстрація сигналів з лазерних датчиків у вигляді часових графічних залежностей в режимі реального часу здійснювалася за допомогою аналого-цифрового перетворювача (АЦП) на базі цифрового осцилографа через інтерфейс RS 232 (рис. 1, в).

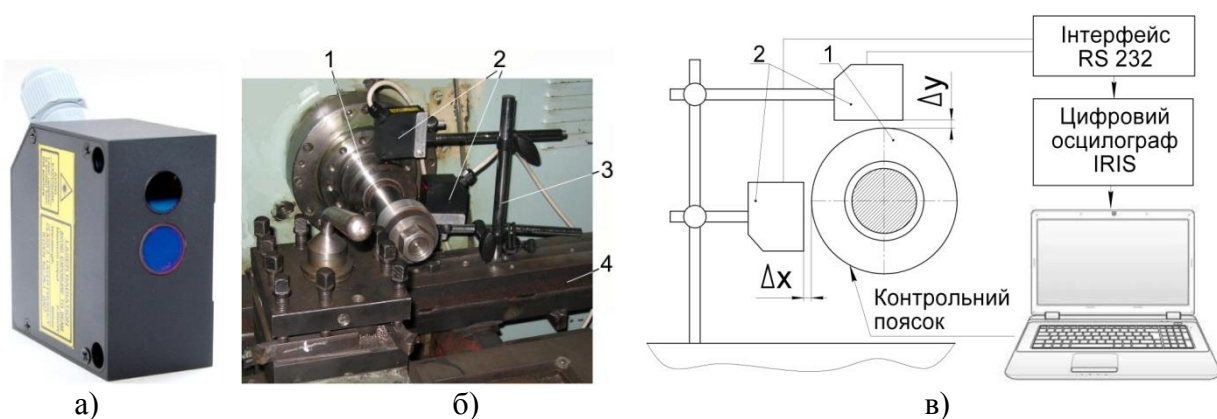


Рис. 1. Загальний вигляд триангуляційного лазерного датчика (а), схеми його закріплення (б) та структурна схема вимірювання траєкторій шпинделя (в):

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

Дослідження впливу температури робочої рідини на показники точності ШВ проводились при обробці дослідних зразків-виробів зі сталі 45 ГОСТ 1050-88 (рис. 2), які закріплювались на конічній поверхні прецизійної оправки (рис. 3, а). Зразки – вироби оброблюва-

лись токарним прохідним прямим різцем з пластиною з твердого сплаву T15K6, з кутами  $\varphi = \varphi_1 = 45^\circ$ ;  $\alpha = 8^\circ$ ;  $\gamma = 10^\circ$  в діапазоні температур  $+20^\circ \dots +40^\circ\text{C}$  з інтервалом  $5^\circ\text{C}$ , при частоті обертання  $n = 1200 \text{ хв}^{-1}$ , глибині різання  $t = 0,5 \text{ мм}$ , поздовжній подачі  $S = 0,058 \text{ мм/об}$ .

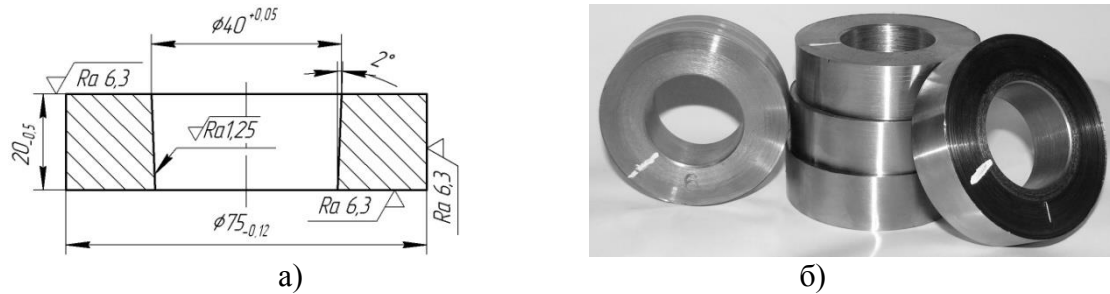


Рис. 2. Ескіз (а) та загальний вигляд (б) дослідних зразків-виробів

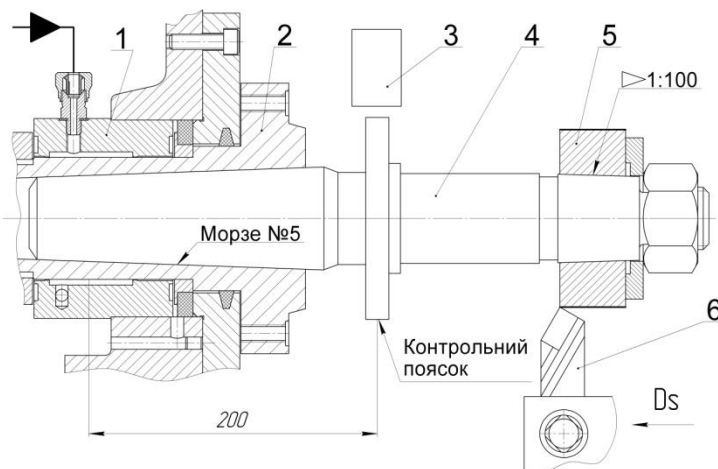


Рис. 3 До опису конструкції та схеми закріплення прецизійної оправки:

1 – ГСО, 2 – шпиндель, 3 – лазерний датчик, 4 – прецизійна оправка, 5 – зразок-виріб, 6 – токарний різець



Рис. 4 Загальний вид цифрового вимірювача температури:

1 – цифровий вимірювач температури, 2 – термоелемент, 3 – штуцер

Тиск робочої рідини в карманах ГСО шпинделя встановлювали за допомогою регулятора потоку дросельного типу, а контролювали манометрами з точністю  $0,1 \text{ МПа}$ . Вимірювання температури робочої рідини в кармані передньої ГСО шпинделя здійснювали за допомогою цифрового вимірювача температури 1 моделі ИТП-5-2УН-ТFT1 та термоелементу 2 – резистивного датчика на основі чутливого елемента  $\text{Pt} - 100$ , вмонтованого в штуцер 3 (див. рис. 4). Цифровий вимірювач температури призначений для експлуатації в діапазоні температур  $-50^\circ \dots +130^\circ\text{C}$  і забезпечує в діапазоні  $0^\circ \dots +45^\circ\text{C}$  визначення температури з точністю до  $0,1^\circ\text{C}$  [8].

Вимірювання відхилення від круглості партії оброблених зразків-виробів здійснювалось на вимірювальному комплексі на базі кругломіра моделі 298. Статистична обробка результатів вимірювання здійснювалася за методикою, наведеною в посібнику [9].

За результатами експериментальних досліджень отримано залежність відхилення від круглості зразків-виробів від температури та тиску робочої рідини в ГСО (рис. 5).

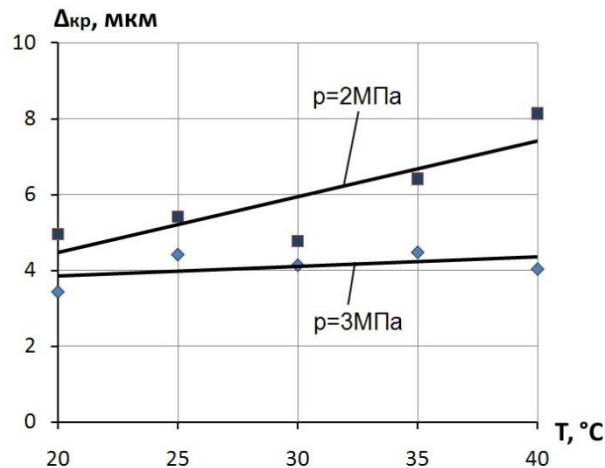


Рис. 5. Вплив тиску та температури робочої рідини в карманах ГСО шпинделя на відхилення від круглості зразків-виробів

Встановлено, що при тиску робочої рідини в карманах ГСО  $p_k=2$  МПа підвищення температури робочої рідини з  $+20^\circ\text{C}$  до  $+40^\circ\text{C}$  призводить до зростання в 1,6 рази відхилення від круглості зразків-виробів. При підвищенні тиску до 3 МПа відхилення від круглості оброблених поверхонь зразків-виробів зменшується у досліджуваному діапазоні температур в середньому в 1,5 рази. При цьому слід відзначити, що при забезпеченні сталого тиску в карманах ГСО  $p_k=3$  МПа зростання температури робочої рідини на відхилення від круглості зразків-виробів практично не впливає. Проведені дослідження впливу тиску та температури робочої рідини в ГСО на відхилення від круглості поверхонь зразків-виробів доповнено спектральним аналізом їх контуру (рис. 6–7).

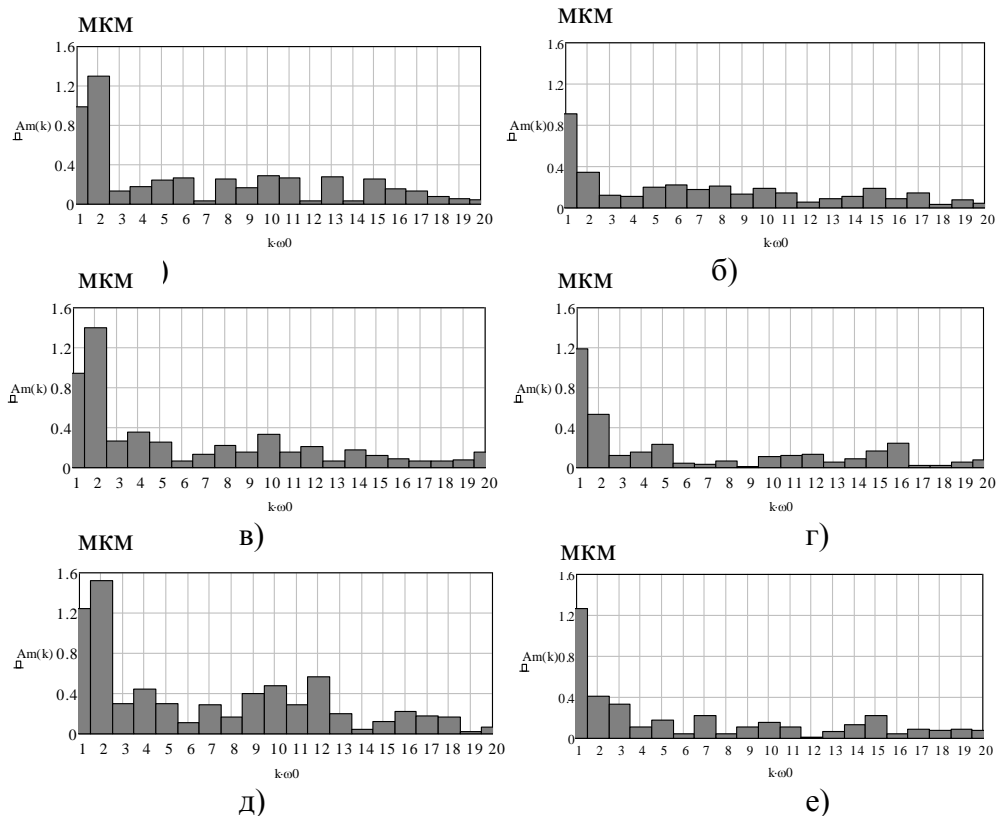


Рис. 6. Типові спектри амплітуд гармонік контуру поверхонь зразків-виробів при регулюванні тиску і температури робочої рідини в карманах ГСО шпинделя:

а), в), д) – спектри при тиску  $p_k=2$  МПа і температурі  $20^\circ\text{C}$ ,  $30^\circ\text{C}$ ,  $40^\circ\text{C}$  відповідно;  
б), г), е) – спектри при тиску  $p_k=3$  МПа і температурі  $20^\circ\text{C}$ ,  $30^\circ\text{C}$ ,  $40^\circ\text{C}$  відповідно

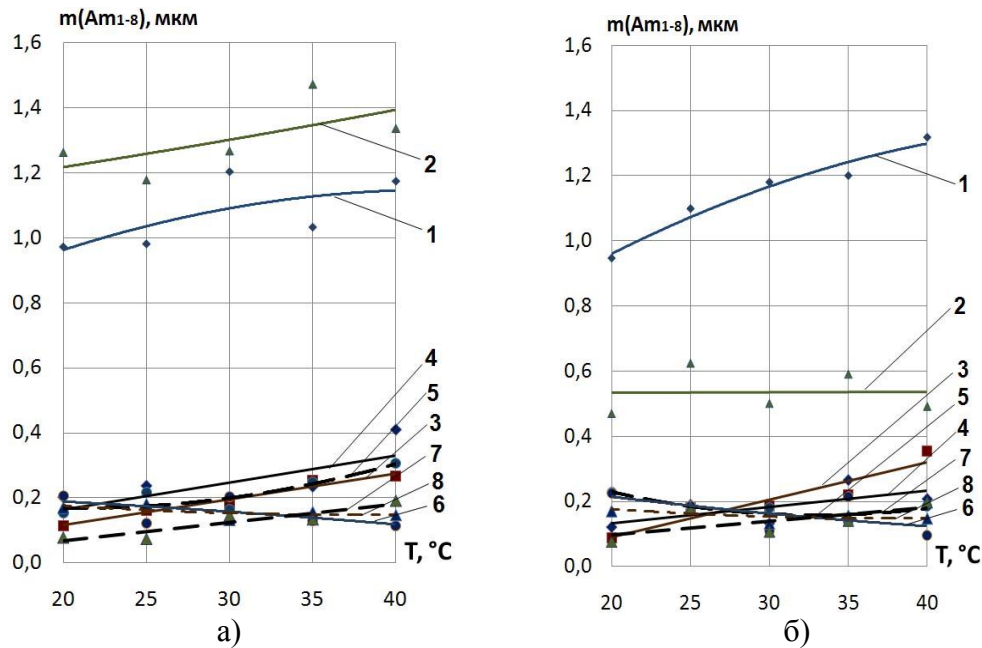


Рис. 7. Математичні сподівання амплітуд гармонік №1–8 спектрів контуру поверхонь зразків-виробів при варіюванні температурою та тиском робочої рідини в карманах ГСО шпинделя:

а)  $p_k=2$  МПа, б)  $p_k=3$  МПа (номер кривої відповідає номеру гармоніки спектру)

Аналізуючи отримані спектри контуру зразків-виробів можна зробити висновок, що при тиску робочої рідини в карманах ГСО  $p_k=2$  МПа суттєво проявляються 1 та 2-га гармоніки, які характеризують відповідно ексцентриситет та овальність контуру оброблених поверхонь. При цьому зі збільшенням температури робочої рідини з  $+20^\circ\text{C}$  до  $+40^\circ\text{C}$  математичні сподівання амплітуд цих гармонік мають тенденцію до незначного (в 1,2 рази) зростання. Математичні сподівання амплітуд гармонік №3–5 практично на порядок менші за амплітуди гармонік №1 і №2, проте з підвищенням температури в межах досліджуваного діапазону спостерігається тенденція до їх зростання в середньому в 2 рази. Математичне сподівання амплітуди 12-ї гармоніки також має стійку тенденцію до зростання і при температурі  $+40^\circ\text{C}$  на порядок перевищує її значення при температурі  $+20^\circ\text{C}$ . Це зумовлено проявленням при зростанні температури пульсацій тиску робочої рідини зумовлених роботою 12-ти лопатевого пластинчатого насоса типу БГ-12-4, який встановлений в системі живлення шпиндельних ГСО верстата УТ16А. Математичні сподівання амплітуд інших гармонік при тиску в карманах ГСО  $p_k=2$  МПа мають нерегулярні зміни, незначно підвищуючись при зростанні температури робочої рідини.

При тиску в карманах ГСО шпинделя  $p_k=3$  МПа (див. рис. 6, б, г, е) найбільш суттєво проявляється амплітуда 1-ї гармоніки, яка при зростанні температури робочої рідини з  $+20^\circ\text{C}$  до  $+40^\circ\text{C}$  збільшується в 1,4 рази. Математичне сподівання амплітуди 2-ї гармоніки практично не змінюється, 3-я гармоніка зростає в 4 рази. Величини математичних сподівань амплітуд інших гармонік є незначними і не мають суттєвої залежності від температури робочої рідини.

З метою подальшого спектрального аналізу на основі інтегрального перетворення Фур'є описання переміщень шпинделя в площині, ортогональній його осі описували радіус-вектором  $R_i$  в полярній системі координат [10]:

$$R_i = \sqrt{\Delta x_i^2 + \Delta y_i^2}, \text{ мм}$$

де  $\Delta x_i$  та  $\Delta y_i$  – величини зміщення осі шпинделя в напрямку осей  $OX$  і  $OY$  в певний момент часу, мм.



Попередніми дослідженнями [10, 11] встановлено, що робочий процес коливаний 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 коливаний шпинделя наближений до нормального. Тому оцінювання параметрів траєкторій руху шпинделя здійснювали за статистичними характеристиками радіус-вектора  $R$ : математичним сподіванням  $m_R$ , середньоквадратичним відхиленням (СКВ)  $\sigma_R$ , асиметрією  $A_R$  та ексцесом  $E_R$  розподілу величини радіус-вектора траєкторій.

Математичне сподівання  $m_R$  та СКВ  $\sigma_R$  величини радіус-вектора траєкторій визначають зміщення та розсіювання положення шпинделя і характеризують точність номінального розміру оброблюваної поверхні. Асиметрія  $A_R$  та ексцес  $E_R$  визначають скошеність та крутість кривої розподілу величини радіус-вектора траєкторій та характеризують ступінь наближеності кривої розсіювання положень радіус-вектора до нормального закону розподілу.

Статистичні характеристики експериментальних траєкторій залежно від температури та тиску робочої рідини в ГСО шпинделя наведено на рис. 8.

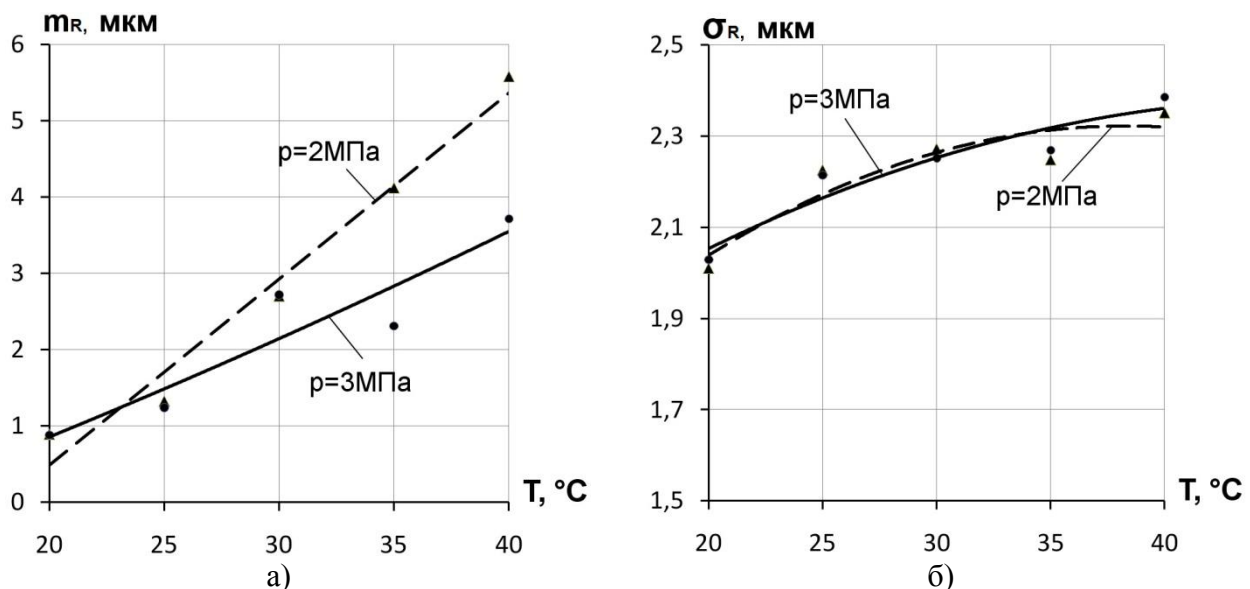


Рис. 8. Математичні сподівання (а) та СКВ (б) величини радіус-вектора експериментальних траєкторій залежно від температури та тиску робочої рідини в ГСО шпинделя при обробці дослідних зразків-виробів

Збільшення температури робочої рідини в ГСО призводить до зростання математичного сподівання радіус-вектора траєкторії шпинделя, причому з підвищенням тиску в карманах ГСО до 3 МПа ця тенденція уповільнюється, що пояснюється підвищенням жорсткості опори. Зазначене явище впливає на ексцентриситет шпинделя та обумовлює зниження точності обробки за показником радіального биття.

Середньоквадратичні відхилення радіус-вектора траєкторій шпинделя мало змінюються під впливом температури робочої рідини, що свідчить про несуттєвий вплив температури рідини на поле розсіювання зміщень шпинделя, а отже, і на точність діаметрального розміру. Незначний вплив температури мастила на СКВ радіус-вектора траєкторій шпинделя можна пояснити тим, що внаслідок теплового розширення матеріалу при зростанні температури змінюються розміри опорних поверхонь шпинделя і гідростатичної втулки: розмір шийки шпинделя збільшується, а отвір гідростатичної втулки зменшується. Це призводить до відповідного зменшення величини радіального статичного зазору та підвищення жорсткості ГСО. Одночасно з підвищенням температури знижується динамічна в'язкість робочої рідини, що при незмінних геометричних параметрах підшипника повинно призводити до по-

ниження жорсткості опори. Внаслідок одночасного протікання процесів зниження в'язкості робочої рідини та зміни розмірів опорних поверхонь підшипника, вони компенсують один одного, що не викликає суттєвої зміни СКВ радіус-вектора траєкторій шпинделя.

Іншою причиною, що пояснює незначний вплив температури робочої рідини на СКВ траєкторій шпинделя є забезпечення постійної величини тиску робочої рідини в карманах ГСО впродовж виконання кожної серії експериментів.

Суттєво температура робочої рідини в карманах ГСО шпинделя впливає на асиметрію  $A_R$  та ексцес  $E_R$  розсіювання величини радіус-вектора траєкторій (рис. 9).

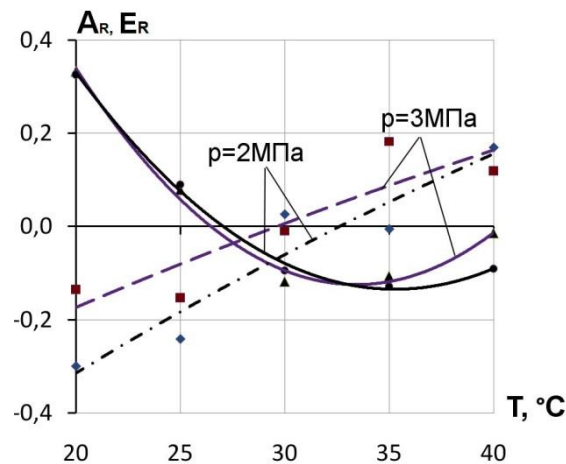


Рис. 9. Асиметрія (суцільні лінії) та ексцес (штрихові лінії) розподілу величини радіус-вектора експериментальних траєкторій залежно від температури та тиску робочої рідини в ГСО шпинделя

Із залежностей, наведених на рис. 9, видно, що зміна температури в діапазоні  $+20^\circ \dots +40^\circ \text{C}$  викликає не тільки зміну абсолютної величини, а і знаку ексцесу  $E_R$  та асиметрії  $A_R$  розподілу величини радіус-вектора. Аналізуючі отримані залежності, можна зробити висновок, що оптимальна температура робочої рідини знаходиться в межах  $+27^\circ \dots +32^\circ \text{C}$ , оскільки абсолютні величини асиметрії та ексцесу в даному діапазоні є мінімальними.

Проведені дослідження впливу тиску та температури робочої рідини в ГСО на точність переміщень шпинделя доповнені спектральним аналізом траєкторій. Засобами пакету MathCAD розрахований спектр амплітуд двадцяти гармонік при різній температурі та тиску робочої рідини в ГСО шпинделя (рис. 10–11).

Аналізуючі залежності, наведені на рис. 11, можна зробити висновок, що підвищення температури в діапазоні  $+20^\circ \dots +40^\circ \text{C}$  викликає зростання в середньому в 1,3 рази математичного сподівання амплітуди першої гармоніки спектрів траєкторій шпинделя, що відповідно позначається на зниженні точності обробки і проявляється у відхиленні розташування оброблених поверхонь. При тиску робочої рідини в карманах ГСО  $p_k=2$  МПа істотно проявляється 4-та гармоніка спектру траєкторій, яка зростає в досліджуваному інтервалі температур майже в 2,8 рази та 2, 3, 5 гармоніки, які зростають відповідно в 1,35, 1,7, 1,75 рази. Загалом, математичні сподівання амплітуд практично всіх гармонік (за виключенням гармоніки №6) при тиску  $p_k=2$  МПа в середньому на 25% більші за відповідні гармоніки траєкторій при тиску  $p_k=3$  МПа, що відповідним чином проявляється на зниженні точності форми оброблених поверхонь зразків-виробів за показником відхилення від круглості (див. рис. 5).



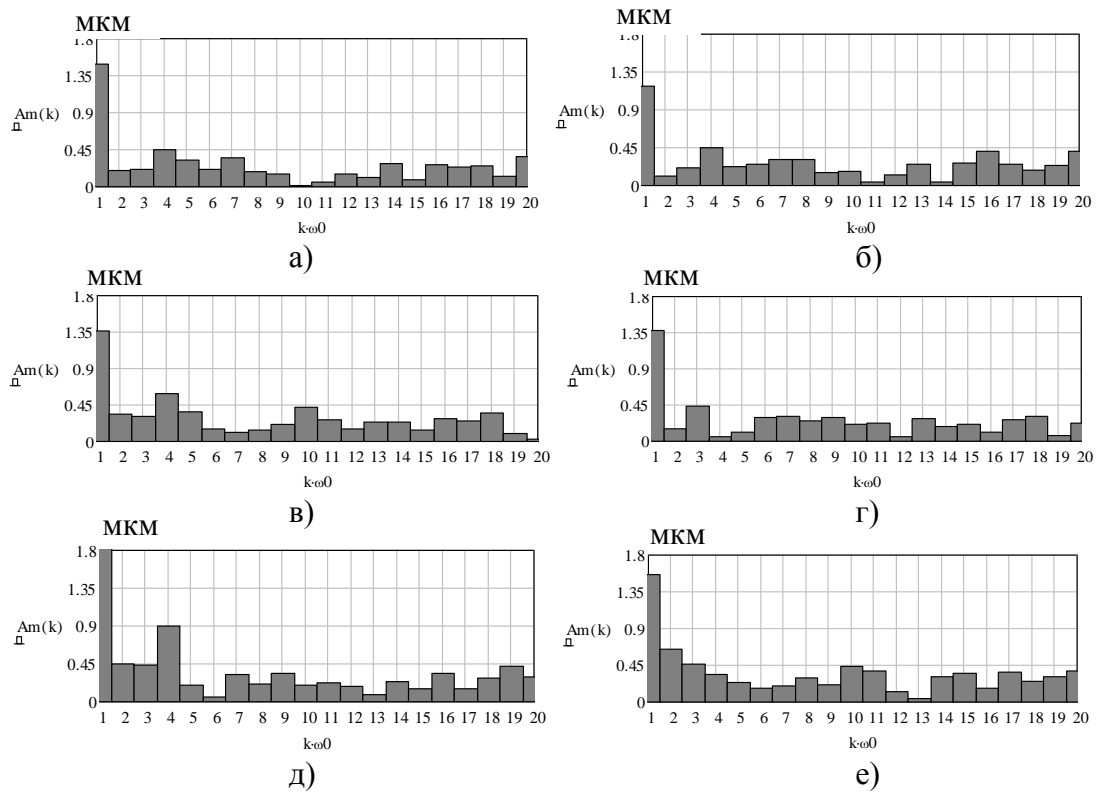


Рис. 10. Типові спектри амплітуд гармонік траекторій шпинделя при зміні тиску і температури робочої рідини в карманах ГСО шпинделя:

а), в), д) – спектри при тиску  $p_k=2$  МПа і температурі 20°C, 30°C, 40°C відповідно;  
б), г), е) – спектри при тиску  $p_k=3$  МПа і температурі 20°C, 30°C, 40°C відповідно

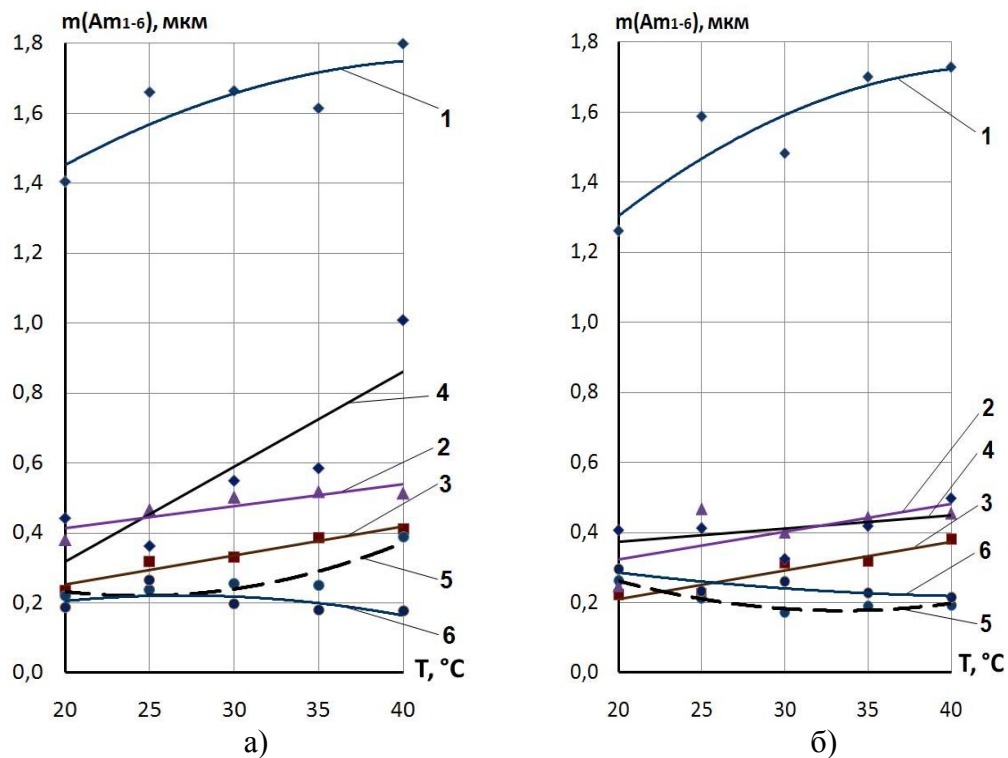


Рис. 11. Математичні сподівання амплітуд гармонік №1-6 спектрів траекторій радіус-вектора шпинделя при зміні температури та тиску робочої рідини в ГСО шпинделя:

а)  $p_k=2$  МПа б)  $p_k=3$  МПа (номер кривої відповідає номеру гармоніки спектру)

Таким чином, проведений аналіз дозволив встановити закономірності формування геометричної точності верстата за показниками траєкторій радіус-вектора шпинделя та точності форми зразків-виробів залежно від тиску та температури робочої рідини в ГСО шпинделя. Встановлені закономірності дозволять здійснювати вибір раціональних експлуатаційних параметрів ГСО шпинделя при токарній обробці.

### ВИСНОВКИ

На основі аналізу результатів експериментальних досліджень встановлено закономірності формування показників точності шпиндельного вузла залежно від температури та тиску робочої рідини в ГСО шпинделя. Показано, що підвищення температури робочої рідини в ГСО в діапазоні  $+20^{\circ}\dots+40^{\circ}\text{C}$  призводить до пропорційного зростання в 4,2–6,2 рази математичного сподівання радіус-вектора траєкторій шпинделя, при цьому зі збільшенням тиску в карманах ГСО ця тенденція уповільнюється. На СКВ радіус-вектора траєкторії шпинделя зростання температури робочої рідини в ГСО в діапазоні  $+20^{\circ}\dots+40^{\circ}\text{C}$  практично не впливає. Підвищення тиску з 2 МПа до 3 МПа в діапазоні температур робочої рідини  $+20^{\circ}\text{C}$  до  $+40^{\circ}\text{C}$  призводить до зменшення відхилення від круглості оброблених поверхонь зразків-виробів в середньому в 1,5 рази.

Оцінити обґрунтованість встановлених закономірностей формування показників точності ШВ можна шляхом встановлення кореляційного взаємозв'язку статистичних характеристик траєкторій шпинделя та контурів оброблених поверхонь зразків-виробів, що є перспективним напрямком подальших досліджень.

### СПИСОК ВИКОРИСТАНОЇ ЛІТЕРАТУРИ

1. Пуш А. В. Шпиндельные узлы: качество и надежность. / А. В. Пуш. – М. : Машиностроение, 1992. – 228 с.
2. Соколов Ю. Н. Температурные расчеты в станкостроении / Ю. Н. Соколов. – М. : Машиностроение, 1968. – 77 с.
3. Sevostianov Igor. On the thermal expansion of composite materials and cross-property connection between thermal expansion and thermal conductivity / Igor Igor // *Mechanics of Materials*. – 2011. – № 45 (2011). – P. 20–33.
4. Пат. 2438830 Российская федерация, МПК В 23 В 25/06. Устройство компенсации тепловых и силовых погрешностей токарного станка / В. В. Юркевич ; заявитель и патентообладатель ФГБОУ ВПО МГТУ «СТАНКИН». – № 2010132735/02, заяв. 05.08.2010; опубл. 10.01.2012, Бюл. №1. – 8 с.
5. Фролов А. В. Повышение точности шпиндельных узлов прецизионных станков методами термомупругого моделирования при заданной их теплоустойчивости: дис. ... канд. техн. наук: 05.03.01 / Александр Владимирович Фролов. – М. : МГТУ им. Баумана, 2007. – 284 с.
6. 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.
7. 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.
8. ЧАО «Тэра» Передовые технологии автоматизации. Каталог продукции. [Електронний ресурс]. – Режим доступа: <http://www.ao-tera.com.ua/list/ru/products.html>.
9. Степнов М. Н. Статистические методы обработки результатов механических испытаний / М. Н. Степнов. – М. : Машиностроение, 1985. – 232 с.
10. Струтинський В. Б. Статистична динаміка шпиндельних вузлів на гідростатичних опорах : монографія / В. Б. Струтинський, Д. Ю. Федориненко. – Ніжин: «Аспект-Поліграф», 2011. – 464 с.
11. Сапон С. П. Експериментальне визначення траєкторій руху шпинделя на гідростатичних опорах / С. П. Сапон, С. В. Аванесов // *Научный вестник ДГМА : сборник научных трудов*. – 2013. – №1(11E). – С. 93–99.