ResearchGate

See discussions, stats, and author profiles for this publication at: https://www.researchgate.net/publication/289433551

ANALYSIS OF THE ACCURACY OF SPINDLE UNIT, WHEN THE PRESSURE IN THE HYDROSTATIC BEARINGS OF SPINDLE IS REGULATED АНАЛІЗ ТОЧНОСТІ ШПИНДЕЛЬНОГО ВУЗЛА ПРИ РЕГУЛЮВАН….

Article · August 2015

CITATIONS
0

READS
57

4 authors, including:

Serhii Sapon
Chernihiv National University of Technology
22 PUBLICATIONS **21** CITATIONS
SEE PROFILE

Dmytro Fedorynenko
Tohoku University
21 PUBLICATIONS **53** CITATIONS
SEE PROFILE

Some of the authors of this publication are also working on these related projects:

Development of high-performance spindle for ultra-precision machining of micro-structured surfaces View project

Development of Spindles with Hydrostatic Bearings for Ultra-Precision Machining View project

All content following this page was uploaded by Dmytro Fedorynenko on 06 January 2016.

The user has requested enhancement of the downloaded file.

DESIGN, ALGORITHMIZATION AND DIAGNOSIS OF TECHNOLOGICAL COMPLEX AUTOMATED CONTROL SYSTEMS

ПРОЕКТУВАННЯ, АЛГОРИТМІЗАЦІЯ І ДІАГНОСТИКА СИСТЕМ АВТОМАТИЗОВАНОГО КЕРУВАННЯ ТЕХНОЛОГІЧНИМИ КОМПЛЕКСАМИ

UDC 621.941-229.3:621.822.172

Sapon S., Ph.D. in Enginiring**,**
Fedorynenko D., DThSc., Professor
Urlina A., Avanesov Y.
Chernihiv National University of Technology / Ukraine

ANALYSIS OF THE ACCURACY OF SPINDLE UNIT, WHEN THE PRESSURE IN THE HYDROSTATIC BEARINGS OF SPINDLE IS REGULATED

АНАЛІЗ ТОЧНОСТІ ШПИНДЕЛЬНОГО ВУЗЛА ПРИ РЕГУЛЮВАННІ ТИСКУ В ГІДРОСТАТИЧНИХ ОПОРАХ

Abstract: *The main output indicators of accuracy machine tool, as an element of the technological complex, is a precision of working movements formative units. In this paper experimentally researched regularities of accuracy formation a precision turning machine by the trajectories of spindle movement, when the pressure in the hydrostatic bearings of spindle is regulated. According to the results determination of the statistical characteristics of the trajectories spindle a rational value of the oil pressure in the pockets of the hydrostatic bearings, which provides a maximum machining precision, has been found.*

Keywords: *spindle, spindle unit (SU), hydrostatic bearing (HB), accuracy, trajectory, pressure.*

Анотація: *Основними вихідними показниками точності верстата, як елемента технологічного комплексу, є точність робочих рухів формоутворюючих вузлів. В роботі експериментальним шляхом досліджено закономірності формування точності прецизійного токарного верстата за показником точності траєкторій переміщення шпинделя при регулюванні тиску в гідростатичних опорах шпинделя. За результатами визначення статистичних характеристик траєкторій шпинделя встановлено раціональну величину тиску мастила в карманах гідростатичних опор, при якій забезпечується максимальна точність обробки.*

Ключові слова: *шпиндель, шпиндельний вузол, гідростатична опора, точність, траєкторія, тиск*

INTRODUCTION

A promising way to increase the efficiency of machining is to use a hydrostatic bearings with adjustable parameters as spindle supports of machine tools. Possibility of regulation the constructive and operational parameters of hydrostatic bearings (HB) of spindle units (SU), depending to the peculiarity of technological load, will allow to expand technological capabilities of machine tools, to increase the processing performance and reduce operating costs. Determination of rational values of adjustable parameters hydrostatic bearing of spindle units is one of way to increase their accuracy and actual scientific problem.

PROBLEM STATEMENT

Determination of accuracy a SU most efficiently to implement by the trajectories of spatial motion axis spindle, which are the main integrated indicators of accuracy machine tool [1]. In the papers [2, 3] is shown, that a trajectory spindle on HB has a clearly expressed stochastic character,

ВСТУП

Перспективним напрямком підвищення ефективності механічної обробки є застосування в якості шпиндельних опор металорізальних верстатів гідростатичних підшипників з регульованими параметрами. Можливість регулювання конструктивних та експлуатаційних параметрів гідростатичних опор (ГСО) шпиндельних вузлів (ШВ), залежно від характеру технологічного навантаження, дозволить розширити технологічні можливості верстатів, підвищити продуктивність обробки та знизити експлуатаційні витрати. Визначення раціональних величин регульованих параметрів ГСО ШВ є одним із шляхів підвищення їх точності і актуальною науковою задачею.

ПОСТАНОВКА ПРОБЛЕМИ

Оцінку точності ШВ найбільш раціонально здійснювати за траєкторями просторового руху осі шпинделя, які є основними інтегральними показниками точності верстата [1]. В роботах [2, 3] показано, що траєкторія руху шпинделя на ГСО має яскраво виражений стохастичний характер,

because she depends on the actions of many factors, which are also the most random. Therefore the most complete and reliable is a probabilistic assessment of accuracy of SU, which based on research of the statistical characteristics by the trajectories spindle. Statistical analysis of the trajectory parameters together with their spectral analysis of frequency composition allows thoroughly assess the impact of practically each operating factors on indicators of accuracy of SU.

In work [3], on the results of numerical modeling, established statistical regularities of geometrical precision of turning machine in terms of the accuracy by the trajectories spindle depending on the pressure in the pockets of the HB of spindle, which are different from the results presented in the monograph [1]. Therefore there is a need experimental verification regularities, which established in the work [3].

MAIN ARTICLE

Experimental studies of the accuracy of SU was performed during processing of samples - products on experimental stand based on precision turning machine model UT16A with using information-measuring complex means of experimental research, which is described in detail in the work [2, 4]. The structural diagram a technique of research accuracy of SU in terms of accuracy of the trajectory spindle shown in (Fig. 1).

оскільки вона залежить від дії багатьох факторів, які в більшості є також випадковими. Тому найбільш повною і достовірною є ймовірнісна оцінка точності ШВ на основі дослідження статистичних характеристик траєкторій шпинделя. Статистичний аналіз параметрів траєкторій в комплексі зі спектральним аналізом їх частотного складу дозволяє детально оцінити вплив на точнісні показники ШВ практично кожного з діючих факторів.

Встановлені за результатами чисельного моделювання в роботі [3] статистичні закономірності формування геометричної точності токарного верстата за показником точності траєкторій переміщення шпинделя залежно від тиску в карманах ГСО шпинделя відрізняються від результатів наведених в монографії [1]. Тому існує необхідність експериментальної перевірки встановлених в роботі [3] закономірностей.

ОСНОВНИЙ ТЕКСТ СТАТТІ

Експериментальні дослідження точності ШВ здійснювали в процесі обробки зразків – виробів на експериментальному стенді на базі прецизійного токарного верстата моделі УТ16А із застосуванням інформаційно-вимірювального комплексу засобів експериментальних досліджень, детально описаного в роботах [2, 4]. Структурна схема методики дослідження точності ШВ за показником точності траєкторій шпинделя наведена на рис. 1

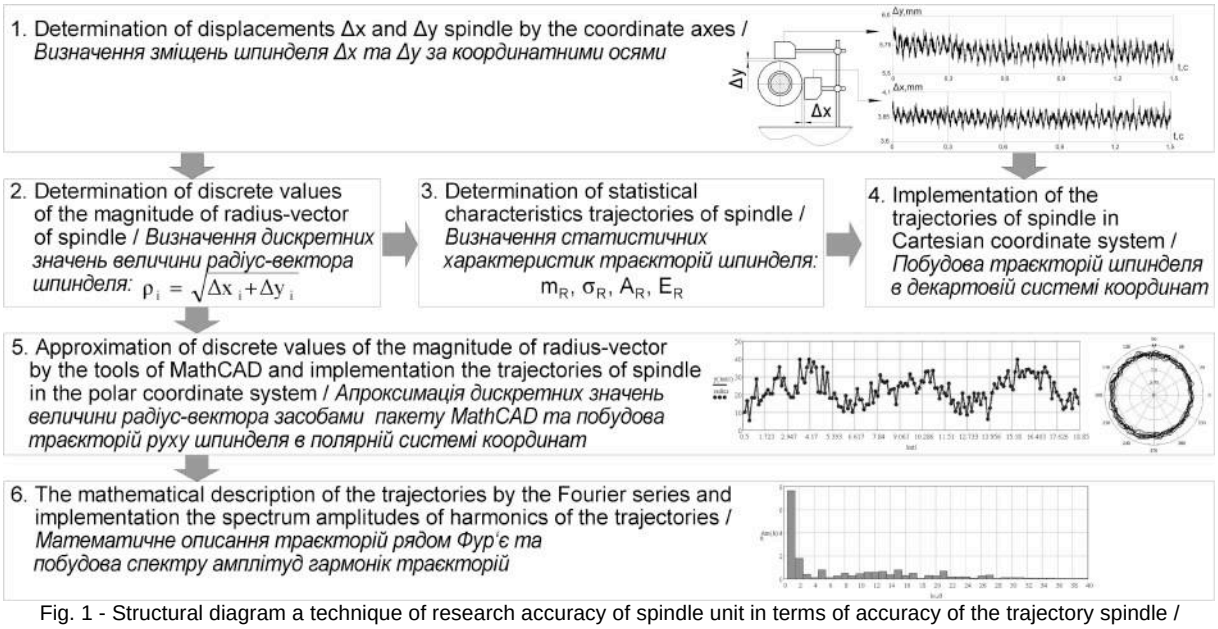


Fig. 1 - Structural diagram a technique of research accuracy of spindle unit in terms of accuracy of the trajectory spindle / *Структурна схема методики дослідження точності шпиндельного вузла за показником точності траєкторій шпинделя*

To determine the spindle displacements Δx and Δy in a plane perpendicular to the axis of rotation were used triangulation laser sensors model RF603.2-10/ 2-485-U-IN-AL-CG (Fig. 2 a), the working range of which is 2 mm, the resolution is – 0.2 mm, the maximum sampling frequency f_d = 9.4 kHz. Sensors 2 were installed at 90º on a rack 3 and in the measurements interacted with the control surface of precision mandrel 1 (Fig. 2, b), which was installed in a conical hole spindle of machine. The

Для визначення зміщень шпинделя Δx та Δy в площині, перпендикулярній його осі обертання, використовувались тріангуляційні лазерні датчики моделі РФ603.2-10/2-485-U-IN-AL-CG (рис. 2, а), з робочим діапазоном 2 мм, роздільною здатністю 0,2 мкм, максимальною частотою дискретизації $f_д$=9,4 кГц. Датчики 2 закріплювались під кутом 90^0 на стійці 3 і в процесі вимірювань взаємодіяли з контрольним поясом прецизійної оправки 1 (рис. 2, b), встановленої в конічний отвір шпинделя верстата. Реєстрація

registration of signals from sensors was carried out by the analog-to-digital converter (ADC) based on a digital oscilloscope using interface RS 232 (Fig. 2, c).

To minimize the systematic error of the spindle rotation caused by deviations form the control surface of precision mandrels, fine finish control surface was carried out on this machine tool, and after processing mandrel was remained invariably fastened in the spindle for the entire series of experimental studies. It made it possible to provide radial beat of control surface within the limits of 1.0 microns.

In conducting experiments sampling frequency of the signal to the ADC varies in proportion to frequency of rotation a spindle within the limits f_d = 200-2500 Hz, to ensure for each sensor 50 measurements during one revolution of the spindle. Such accuracy constructing trajectories is allows thoroughly analyze their statistical characteristics. Preliminary statistical analysis of the experimental data was carried out according to the standard method [5].

сигналів з датчиків здійснювалася за допомогою аналого-цифрового перетворювача (АЦП) на базі цифрового осцилографа через інтерфейс RS 232 (рис. 2, с).

З метою мінімізації систематичної складової похибки обертання шпинделя, обумовленої відхиленнями форми контрольного пояска прецизійної оправки тонку обробку контрольного пояска 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 пояска в межах 1,0 мкм.

В процесі проведення експериментів частоту дискретизації сигналу на АЦП змінювали пропорційно частоті обертання шпинделя в межах $f_д$ = 200–2500 Гц, з розрахунку забезпечення кожним датчиком 50 вимірювань за один оберт шпинделя. Така точність побудови траєкторій дозволяє грунтовано проаналізувати їх статистичні характеристики. Попередня статистична обробка експериментальних даних здійснювалась за типовою методикою [5].

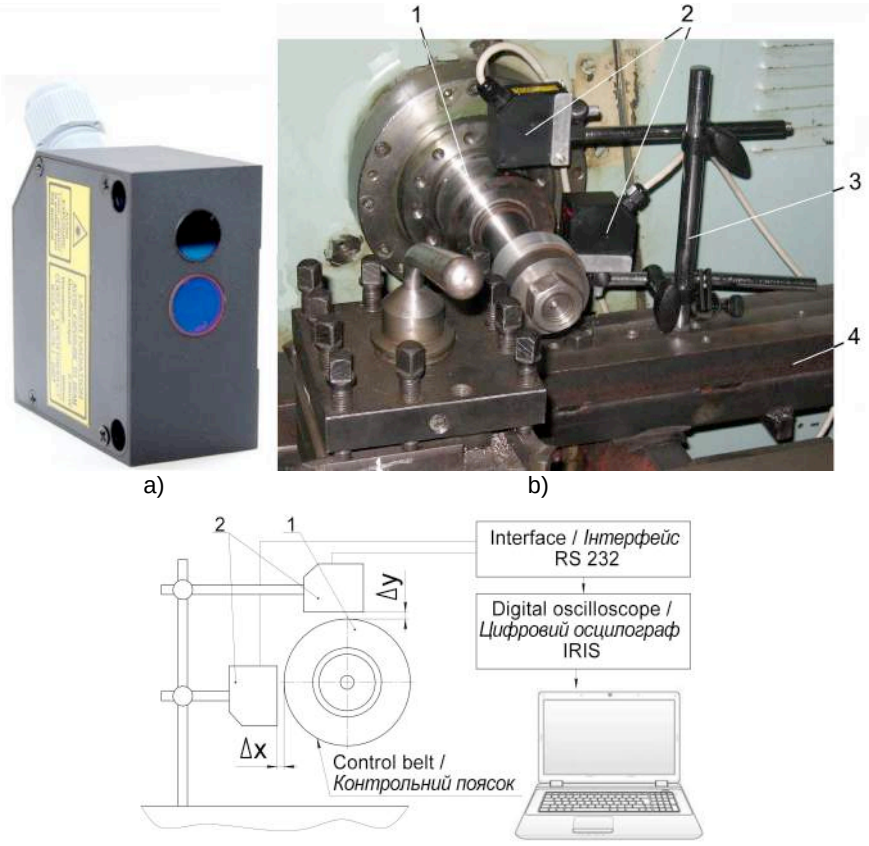


Fig. 2 – Laser triangulation sensor a) general view of scheme fixing b) and structural diagram of measuring the trajectories of spindle c) / *Тріангуляційний лазерний датчик а), загальний вигляд схеми закріплення b) та структурна схема вимірювання траєкторій шпинделя с):* 1 – precision mandrel / *прецизійна оправка ;* 2 – laser sensors / *лазерні датчики;* 3 – rack / *стійка;* 4 – plate / *плита*

The stochastic character of trajectories spindle on HB is made it necessary to assess their parameters by statistical characteristics of the radius-vector R. Discrete values of the radius vector is determined by the formula:

Стохастичний характер траєкторій шпинделя на ГСО зумовив необхідність оцінювання їх параметрів за статистичними характеристиками радіус-вектора R, дискретні значення якого визначали за залежністю:

$$R_i = \sqrt{\Delta x_i^2 + \Delta y_i^2}\ [\text{mm}] \qquad (1)$$

Checking on the basis of criterion χ^2 Pearson [5] the hypothesis of normal distribution of the values of the radius-vector of trajectories are not always confirmed. This may be is caused by presence of systematic errors, which give rise an asymmetry A_R and kurtosis E_R normal distribution curve. In such cases, the hypothesis testing about the proximity of the distribution values of the radius-vector of trajectories to the normal law was performed additionally. For this purpose a ratio values A_R, E_R and mean-square deviation (MSD) of the asymmetry and kurtosis σ_A σ_E was evaluated [6]. It should be noted, that fulfillment of conditions $|A_R / \sigma_A| < 3$ and $|E_R / \sigma_E| < 3$ in almost all cases are met, which enables to conclude, that the asymmetry and kurtosis are not significant and the distribution of the random variable radius-vector of trajectories close to the normal law. The proximity of the random variable radius-vector of trajectories to the normal law, as well as stationary and ergodic random process vibrations a spindle is allows for the assessment accuracy of SU used statistical characteristics of the value of the radius-vector of trajectories spindle: mathematical expectation m_R, mean-square deviation σ_R, asymmetry A_R and kurtosis E_R.

The mathematical expectation m_R value of the radius-vector of trajectories is determine the displacement a spindle in the coordinate system XOY under the action of technological loadings and operational parameters of the HB and characterizes the deviation from the nominal size of the treated surface.

Mean-square deviation σ_R of the radius-vector of trajectories allows us to estimate the dispersion spindle position under the action of technological loadings and operational parameters of the HB spindle and affects to the limit of the radial size of the treated surface.

Asymmetry A_R and kurtosis E_R is determined skewness and peakedness of the distribution curve the value of the radius-vector of trajectories and characterized the degree of closeness of scattering curve of the provisions the radius-vector to the normal distribution law.

For each realization of an experiment determining the statistical characteristics of trajectories was performed on three samples of 500 discrete values of the spindle position that corresponds to its 10 full turns and meets significance level α = 0,05 and the relative error in the determination of the mathematical expectation Δm = 0,01 [5].

After that, was carried the calculation relative error of determining the value of the radius-vector of trajectories ΔR for each of the experiment, the value of which generally does not exceed 7.7%.

For analytical description of trajectories of the radius-vector the interpolation its discrete values by cubic splines is carried out. For this purpose was used the function *cspline* and *interp* package MathCAD. Spectral analysis of trajectories is made

Перевіркою на основі критерію χ^2 Пірсона [5] гіпотеза про нормальність закону розподілу величини радіус-вектора траєкторій не у всіх випадках підтверджувалась. Це може бути зумовлено наявністю систематичних похибок, внаслідок яких виникає асиметрія A_R і ексцес E_R кривої нормального розподілу. В таких випадках додатково перевірку гіпотези про наближеність до нормального закону розподілу величини радіус-вектора траєкторій здійснювали, оцінюючи співвідношення величин A_R, E_R та середньоквадратичне відхилення (СКВ) асиметрії σ_A і ексцесу σ_E [6]. Слід відзначити, що виконання умов $|A_R / \sigma_A| < 3$ та $|E_R / \sigma_E| < 3$ практично в усіх випадках задовольнялось, що дозволяло зробити висновок, що асиметрія і ексцес не є суттєвими і розподіл випадкової величини радіус-вектора траєкторій наближений до нормального. Наближеність розподілу випадкової величини радіус-вектора траєкторій до нормального закону, а також стаціонарність та ергодичність випадкового процесу коливань шпинделя дозволяє при оцінці точності ШВ використовувати статистичні характеристики величини радіус-вектора траєкторій шпинделя: математичне сподівання m_R, середньоквадратичне відхилення σ_R, асиметрію A_R та ексцес E_R.

Математичне сподівання m_R величини радіус-вектора траєкторій визначає зміщення шпинделя в системі координат XOY під дією технологічних навантажень та експлуатаційних параметрів ГСО і характеризує відхилення від номінального розміру оброблюваної поверхні.

Середньоквадратичне відхилення σ_R радіус-вектора траєкторій дає змогу оцінити розсіювання положення шпинделя під дією технологічних навантажень та експлуатаційних параметрів ГСО шпинделя та впливає на допуск радіального розміру обробленої 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.

Для кожної реалізації експерименту визначення статистичних характеристик траєкторій здійснювали за трьома вибірками об'ємом 500 дискретних значень положення шпинделя, що відповідає його 10-ти повним обертам та задовольняє рівню значимості α=0,05 при відносній похибці визначення математичного сподівання Δ_m = 0,01 [5].

Після цього проводилося обчислення відносної похибки визначення величини радіус-вектора траєкторій Δ_R для кожної реалізації експерименту, величина якої загалом не перевищувала 7,7%.

Для аналітичного опису траєкторій радіус-вектора R_i здійснено інтерполяцію його дискретних значень кубічними сплайнами. Для цього використовувалися функції *cspline* та *interp* пакету

by the results of the mathematical description of their form of Fourier series according to standard techniques [6].

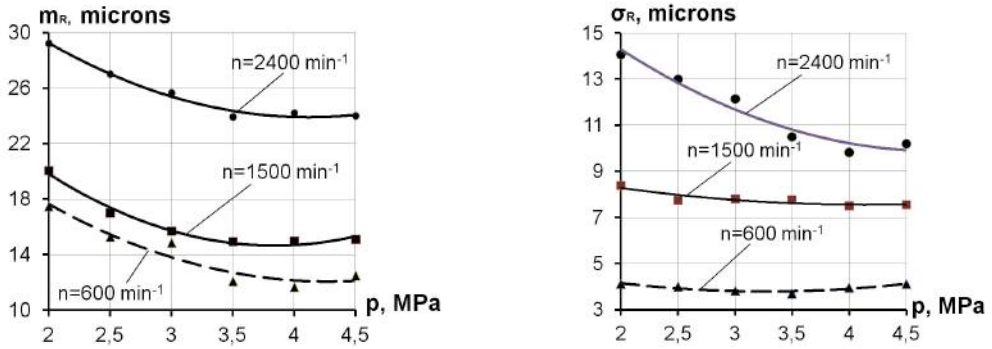
On Fig. 3 shows graphs of the mathematical expectation a) and MSD b) the value of the radius-vector of the experimental trajectories spindle from the pressure in the pockets of the hydrostatic bearing. The processing of samples - products was performed a lathe feedthrough tool with plate of hard alloy T15K6, at different values of spindle rotation frequency, cutting depth t=0,6 mm, feed S_0=0,115 mm/turn, with constant static imbalance Dst = 4360x10^{-6} kg·m.

With increasing pressure in the pockets of the HB of spindle in the range 2-3.5 MPa the mathematical expectation of the radius-vector of the trajectories spindle decreases to 1.25 - 1.45 times and with growth of spindle rotation frequency the influence of pressure on the value of the mathematical expectation of the radius-vector of the trajectories decreases. The increase oil pressure in HB in the range 3,5 - 4,5 MPa on the value of the mathematical expectation of the radius-vector of the trajectories has virtually no effect.

MathCAD. Спектральний аналіз траєкторій здійснено за результатами математичного опису їх форми рядом Фур'є згідно загальноприйнятих методик [6].

На рис. 3 приведено залежності математичного сподівання а) та СКВ б) величини радіус-вектора експериментальних траєкторій шпинделя від тиску в карманах ГСО. Обробку зразків-виробів здійснювали токарним прохідним різцем з пластиною з твердого сплаву Т15К6, при різних величинах частоти обертання шпинделя, глибині різання t=0,6 мм, подачі, S_0=0,115 мм/об, за наявності статичного дисбалансу $D_{ст}$=4360·10^{-6} кг·м.

При збільшенні тиску в карманах ГСО шпинделя в діапазоні 2–3,5 МПа математичне сподівання величини радіус-вектора траєкторій шпинделя зменшується в 1,25 – 1,45 рази, причому зі зростанням частоти обертання шпинделя вплив тиску на величину математичного сподівання радіус-вектора траєкторій зменшується. Збільшення тиску мастила в ГСО в діапазоні 3,5 – 4,5 МПа на величину математичного сподівання радіус-вектора траєкторій практично не впливає.



a) b)

Fig. 3 – Mathematical expectation a) and MSD b) the value of the radius-vector of the experimental trajectories spindle, when the pressure in the hydrostatic bearings is regulated / *Математичні сподівання а) та СКВ b) величини радіус-вектора експериментальних траєкторій шпинделя при регулюванні тиску в карманах ГСО*

Adjusting the pressure in the pockets of the HB affects on the MSD the value of radius-vector of the trajectories spindle at rotation frequency of more than 1500 min^{-1}. With increasing of spindle rotation frequency increase the pressure in the pockets of the HB more intense effects on reducing the MSD the value of the radius-vector of the trajectories spindle, which increases the machining accuracy in terms of the size tolerance of workpiece.

The comparison of experimental (cross-hatching line) and received in the work [3] theoretical dependences of mathematical expectation (Fig. 4, a) and MSD (Fig. 4, b) the value of radius-vector of the trajectories from the pressure in the pockets of the HB at n=const=1500 min^{-1} shows their qualitative consistency.

The maximum difference between the experimental and theoretical values of mathematical expectation radius-vector of the trajectories, which received from a mathematical model taking into account the deviations form of bearing surfaces does

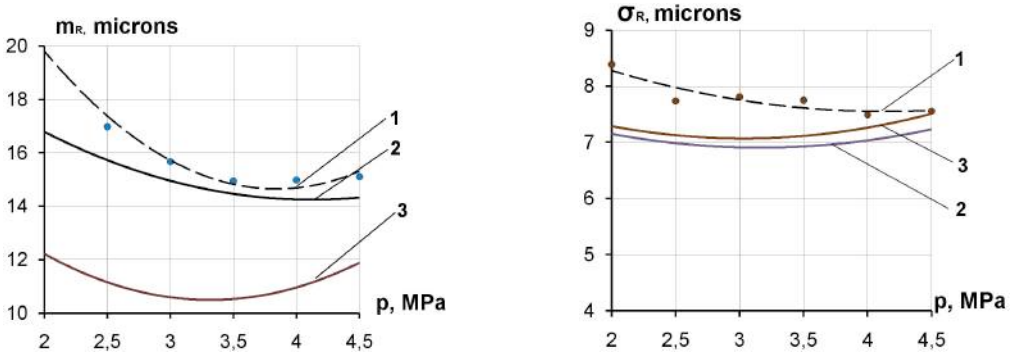
На СКВ величини радіус-вектора траєкторій шпинделя регулювання величиною тиску в карманах ГСО впливає при частотах обертання понад 1500 хв$^{-1}$. При цьому зі зростанням частоти обертання шпинделя збільшення тиску в карманах ГСО інтенсивніше впливає на зниження СКВ радіус-вектора траєкторій шпинделя, що сприяє підвищенню точності обробки за показником допуску розміру оброблюваної поверхні.

Порівняння експериментальних (штрихова лінія) та отриманих в роботі [3] теоретичних залежностей математичного сподівання (рис. 4, а) та СКВ (рис. 4, б) величини радіус-вектора траєкторій від тиску в карманах ГСО при n=const=1500 хв$^{-1}$ показує їх якісну узгодженість.

Максимальна розбіжність між експериментальними та теоретичними значеннями математичного сподівання величини радіус-вектора траєкторій, отриманими за математичною моделлю з врахуванням відхилення форми опорних поверхонь ГСО не перевищує 16,7%. Порівняно

not exceed 16,7%. Compared with the values of mathematical expectation radius-vector of the trajectories obtained by mathematical model with an idealized bearing surface, experimental values differ on average in 1,45 times, it shows the importance of taking into account the forms of bearing surfaces in the study of HB precision spindle units with bearers of this type.

зі значеннями математичного сподівання радіус-вектора траєкторій, отриманими за математичною моделлю з ідеалізованими опорними поверхнями ГСО експериментальні значення відрізняються в середньому в 1,45 рази, що свідчить про важливість врахування відхилень форми опорних поверхонь ГСО при дослідженні точності ШВ з опорами такого типу.



a) b)

Fig. 4 – The comparison of experimental and theoretical dependences of mathematical expectation a) and MSD b) the value of radius-vector of the trajectories from the pressure in the pockets of the hydrostatic bearings at n=const=1500 min^{-1} / *Порівняння експериментальних та теоретичних залежностей математичного сподівання а) та СКВ б) величини радіус-вектора від тиску в карманах ГСО при n=1500 хв$^{-1}$*: 1 – experimental dependences / *експериментальні залежності*; 2 – dependence, which received from a mathematical model taking into account the deviations form of bearing surfaces HB / *залежності, отримані за математичною моделлю з врахуванням відхилення форми опорних поверхонь ГСО;* 3 – dependence, which received from a mathematical model with idealized bearing surface HB / *залежності отримані, за математичною моделлю з ідеалізованими опорними поверхнями ГСО*

The maximum difference between the experimental and theoretical values mean-square deviation of the radius-vector of the trajectories obtained taking into account the deviation form bearing surfaces does not exceed 14,3%. The difference between the value of mean-square deviation of the radius-vector of the trajectories obtained numerical modeling with idealized bearing surface of hydrostatic bearings and experimental values of mean-square deviation does not exceed 13,8%. Quantitatively, interrelation of theoretical and experimental dependence was assessed using coefficient of pair correlation, the results of which determination and evaluation their reliability are shown in Table 1.

The results of calculation coefficient of pair correlation, which are listed in table 1, indicates a high degree of consistency experimental and theoretical dependences of the mathematical expectation value of the radius-vector of the trajectories from the pressure in the pockets of hydrostatic bearings of spindle.

Due to the low value and unconfirmed reliability determination of coefficient of pair correlation for the values mean-square deviation of the radius-vector, obtained theoretically and experimentally to assert about their close relationship impossible.

This is because that, mean-square deviation of the radius-vector of the trajectories at a spindle rotation frequency n = 1500 min^{-1} from the regulation of pressure in the range of 2 – 4,5 MPa practically independent: the difference between the maximum and minimum experimental value of mean-square

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%. Відмінність СКВ величини радіус-вектора траєкторій, отриманого чисельним моделюванням з ідеалізованими опорними поверхнями ГСО від експериментальних значень СКВ не перевищує 13,8%. Кількісно взаємозв'язок теоретичних та експериментальних залежностей оцінювали за допомогою коефіцієнту парної кореляції, результати визначення якого та оцінки його достовірності наведено в таблиці 1.

Результати розрахунку коефіцієнту парної кореляції, наведені в таблиці 1, вказують на високий ступінь узгодженості експериментальних та теоретичних залежностей математичного сподівання величини радіус-вектора траєкторій від тиску в карманах ГСО шпинделя.

Внаслідок невисокого значення та непідтвердженої достовірності визначення коефіцієнта парної кореляції для значень СКВ радіус-вектора, отриманих теоретичним та експериментальним шляхом стверджувати про їх тісний взаємозв'язок не можна.

Це пояснюється тим, що СКВ радіус-вектора траєкторій при частоті обертання шпинделя n=1500 хв$^{-1}$ від регулювання тиску в діапазоні 2 – 4,5 МПа практично не залежить: різниця між максимальним і мінімальним експериментальним значенням СКВ радіус-вектора становить 10,6%, а максимальне та мінімальне значення

deviation of the radius-vector is 10,6%, and the maximum and minimum values of mean-square deviation of the radius-vector of the trajectories obtained under the same conditions on a mathematical model differ only by 4,5%.

СКВ радіус-вектора траєкторій отримані при таких самих умовах за мАтематичною моделлю відрізняються лише на 4,5%.

Table 1

Визначення кореляційного зв'язку експериментальних та теоретичних залежностей математичного сподівання та середньоквадратичного відхилення величини радіус-вектора від тиску в карманах ГСО / *Determination of the correlation connection of experimental and theoretical dependences of mathematical expectation and mean-square deviation values of the radius-vector from pressure in the pockets of HB*

pressure in the HB / *тиск в ГСО, p, MPa*	mathematical expectation / *математичне сподівання m_R*		pressure in the HB / *тиск в ГСО, p, MPa*	mean-square deviation / *середньоквадратичне відхилення, σ_R*	
	mathematical model / *математична модель, m_{R1}, μm*	experiment / *експеримент, m_{R2}, μm*		mathematical model / *математична модель, σ_{R1}, μm*	experiment / *експеримент, σ_{R2}, μm*
2,00	16,71	20,05	2,00	7,19	8,39
2,50	16,02	16,98	2,50	6,90	7,74
3,00	14,76	15,67	3,00	6,97	7,81
3,50	14,30	14,94	3,50	6,87	7,75
4,00	14,36	14,98	4,00	7,11	7,49
4,50	14,54	15,10	4,50	7,20	7,55
Coefficient of correlation / *Коефіцієнт кореляції* $r_{m_{R1},m_{R2}} = 0{,}959$			Coefficient of correlation / *Коефіцієнт кореляції* $r_{\sigma_{R1},\sigma_{R2}} = 0{,}191$		
The error of correlation coefficient / *Похибка коефіцієнта кореляції*		Δ_r=0,032	The error of correlation coefficient / *Похибка коефіцієнта кореляції*		Δ_r=0,393
$\frac{r_{m_{R1},m_{R2}}}{\Delta_r} = \frac{0{,}955}{0{,}032} = 29{,}9 > 4$			$\frac{r_{\sigma_{R1},\sigma_{R2}}}{\Delta_r} = \frac{0{,}191}{0{,}394} = 0{,}484 < 4$		

The influence of adjustment pressure in the pockets of HB to asymmetry A_R and kurtosis E_R value of the radius-vector of the trajectories spindle shown graphically in Fig. 5. Dissipate value of the radius-vector of the experimental trajectories spindle, when the pressure in the pockets of hydrostatic bearings is regulated has asymmetry and kurtosis in the range of 2–4.5 MPa, the latter being appears more significantly.

Вплив регулювання тиском в карманах ГСО на асиметрію A_R та ексцес E_R величини радіус-вектора траєкторій шпинделя графічно відображено на рис. 5. Розсіювання величини радіус-вектора експериментальних траєкторій шпинделя при регулюванні тиску в карманах ГСО в діапазоні 2–4,5 МПа має асиметрію A_R та ексцес E_R, причому останній проявляється більш суттєво.

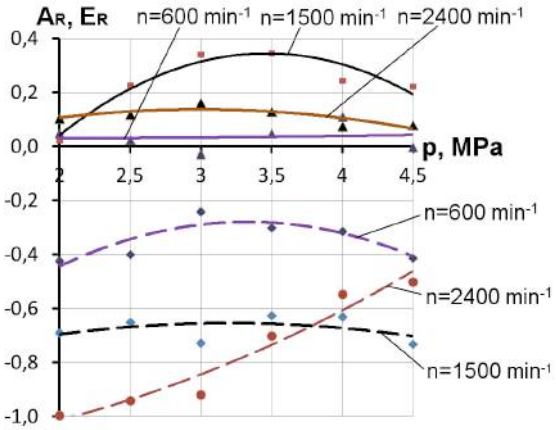


Fig. 5 – Asymmetry and kurtosis (dashed lines) of dissipation value of the radius-vector of the experimental trajectories spindle, when the pressure in the hydrostatic bearings is regulated / *Асиметрія та ексцесс розсіювання величини радіус-вектора експериментальних траєкторій шпинделя при регулюванні тиску в карманах ГСО*

Within the limits of pressure 3 – 3,5 MPa, at a spindle rotation frequency n = 600 min^{-1} the dissipation provisions of radius-vector is very close to the normal distribution law, as evidenced by the minimum absolute values of asymmetry and kurtosis. Changing the pressure almost no effect on the asymmetry of the distribution curve at a spindle rotation frequency 2400 min^{-1} and 600 min^{-1}. At a rotation frequency 1500 min^{-1} regulation pressure in the pockets HB practically does not influence on the value of excess E_R. Increasing the pressure in the pockets of HB from 2 MPa to 4,5 MPa

В межах тиску 3–3,5 МПа, при частоті обертання n=600 $хв^{-1}$ розсіювання положень радіус-вектора максимально наближене до закону нормального розподілу, про що свідчать мінімальні абсолютні значення асиметрії та ексцесу. Зміна величини тиску практично не впливає на асиметрію кривої розподілу при частоті обертання шпинделя 2400 $хв^{-1}$ та 600 $хв^{-1}$. При частоті обертання 1500 $хв^{-1}$ регулювання тиску в карманах ГСО практично не впливає на величину ексцесу E_R. Підвищення тиску в карманах ГСО з 2 МПа

reduces kurtosis of distribution curve at a rotation frequency 2400 min^{-1}.

By means of the package MathCAD was carried spectral analysis of experimental trajectories of spindle (Fig. 6, 7).

до 4,5 МПа сприяє зменшенню ексцесу кривої розподілу при частоті обертання 2400 хв$^{-1}$.

Засобами пакету MathCAD здійснений спектральний аналіз експериментальних траєкторій шпинделя (рис. 6, 7).

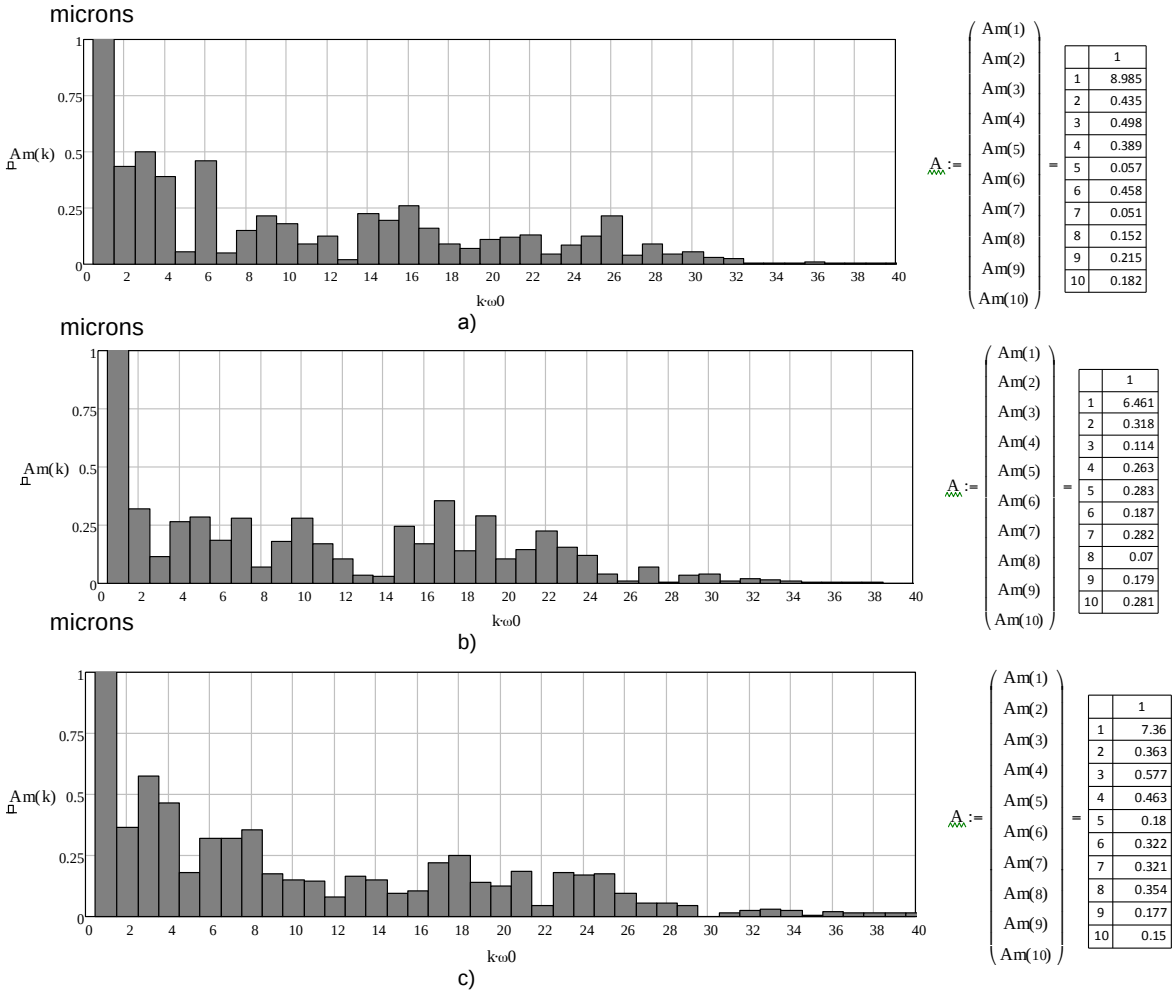


Fig. 6 – Spectrums of harmonic amplitudes of the trajectories spindle, when the pressure in the HB is regulated / *Спектри амплітуд гармонік траєкторій шпинделя при регулюванні тиску в карманах ГСО: a) p=2,5 MPa, b) p=3,5 MPa, c) p=4,5 MPa*

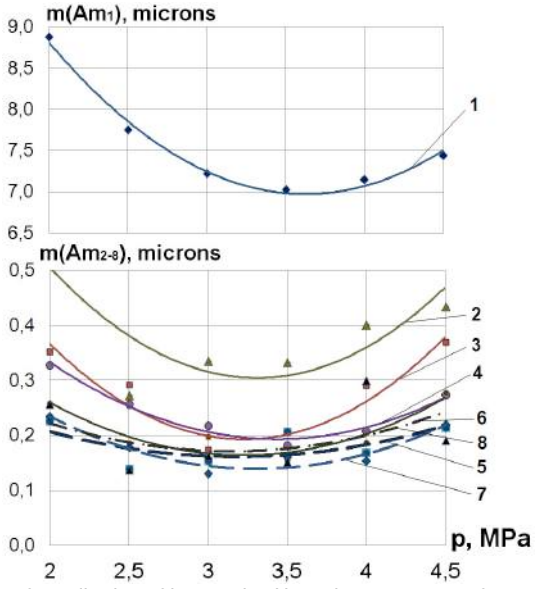


Fig. 7 – Mathematical expectations of amplitudes of harmonics №1-8 by spectrums of experimental trajectories spindle, when the pressure in the HB is regulated at n=const=1500 min^{-1} (number of curve corresponds to the number harmonic of spectrum) / *Математичні сподівання амплітуд гармонік №1-8 спектрів експериментальних траєкторій шпинделя при регулюванні тиску в карманах ГСО при n=const=1500 хв$^{-1}$ (номер кривої відповідає номеру гармоніки спектру)*

The spectral analysis experimental trajectories spindle has allowed to establish the following regularities. Increasing pressure in the pockets HB in a range from 2 MPa to 3,5 MPa leads to a shift spindle axis in the direction of the geometric center of HB, as evidenced by a decrease on 20,6% mathematical expectation of first harmonic of spectrum trajectories, but with increasing pressure to 4,5 MPa is observed a slight increase the mathematical expectation of radius-vector and 1st harmonic. Mathematical expectation amplitudes of harmonic №2–8, also tends to decrease an average of 45%, when the pressure in the range from 2 MPa to 3.5 MPa increases and the growth in average 35% with increasing pressure in pockets HB of spindle from 3,5 MPa to 4,5 MPa.

CONCLUSIONS

The analysis of experimental results allowed to set regularities formation geometric accuracy of the machine tool in terms of accuracy trajectories of spindle, depending on the oil pressure in the HB at presence of the static imbalance:

– rational value of the pressure in the pockets of the HB, at which ensures minimum mathematical expectation and mean-square deviation values of the radius-vector of the trajectories is in a range of 3 – 3,5 MPa, which is about 65 – 75% of maximum of the working pressure range in the HB of this type;

– comparing the experimental and theoretical dependence the statistical characteristics of the radius-vector of trajectories spindle from oil pressure in hydrostatic bearings shows their qualitative consistency, the maximum difference between theoretical and experimental data does not exceed 16.7%.

REFERENCES

[1]. Push A.V. (1992) – Spindle units: quality and reliability, Moscow: Mechanical engineering. – 286 p.

[2]. Sapon S.P., Avanesov Y.V. (2013) – Experimental determination of the trajectories of the spindle on hydrostatic supports, Scientific Herald of the DSEA, № 1(11E), pg. 93 – 99.

[3]. Sapon S.P. (2014) – The simulation trajectories of spindle with adjustable hydrostatic bearings, Visnyk of Chernihiv State Technological University. Series “Technical sciences”, №2(73)., pg. 83 – 92.

[4]. Sapon S.P. (2013) – Method of experimental determination the precision of spindle rotation, Visnyk of Chernihiv State Technological University. Series “Technical sciences”, №1(63)., pg. 66 – 74.

[5]. Stepnov M. N., Shavryn A. V. (2005) – Statistical methods for processing the results of mechanical testing: reference book, Moscow: Mechanical engineering. – 399 p.

[6]. Kolker J.D. (1976) – Mathematical analysis of the accuracy machining of parts, Kyiv: Technique. – 200 p.

[7]. Strutynskyi V. B., Fedorynenko D. Y. (2011) – Statistical dynamics of spindle units with hydrostatic bearings, Nizhyn: TOV Vydavnytstvo Aspekt-Poligraf. – 464 p.

Спектральний аналіз експериментальних траєкторій шпинделя дозволив встановити наступні закономірності. Збільшення тиску в карманах ГСО в діапазоні 2–3,5 МПа призводить до зміщення осі шпинделя в напрямку геометричного центру ГСО, про що свідчить зниження на 20,6% математичного сподівання 1-ої гармоніки спектру траєкторій, проте при підвищенні тиску до 4,5 МПа спостерігається незначне зростання математичного сподівання радіус-вектора та 1-ї гармоніки. Математичне сподівання амплітуд гармонік №2–8 також має тенденцію до зниження в середньому на 45% при підвищенні тиску в діапазоні з 2 МПа до 3,5 МПа та зростання в середньому на 35% при збільшенні тиску в карманах ГСО шпинделя з 3,5 МПа до 4,5 МПа.

ВИСНОВКИ

Проведений аналіз експериментальних результатів дозволив встановити закономірності формування геометричної точності верстата за показником точності траєкторій шпинделя залежно від тиску мастила в ГСО при наявності статичного дисбалансу:

– раціональна величина тиску в карманах ГСО, при якій забезпечуються мінімальні значення математичного сподівання та СКВ величини радіус-вектора траєкторій знаходиться в діапазоні 3–3,5 МПа, що становить приблизно 65–75% максимАльного значення робочого діапазону тиску в ГСО такого типу;

– порівняння експериментальних та теоретичних залежностей статистичних характеристик радіус-вектора траєкторій шпинделя від тиску мастила в ГСО показує їх якісну узгодженість, максимальна розбіжність між теоретичними та експериментальними даними не перевищує 16,7%.

БІБЛІОГРАФІЧНІ ПОСИЛАННЯ

[1]. Пуш А.В. (1992) – Шпиндельные узлы: Качество и надежность. – М.: Машиностроение. – 286 с.

[2]. Сапон С. П. Аванесов Є. В. (2013) – Експериментальне визначення траєкторій руху шпинделя на гідростатичних опорах, Науковий вісник ДДМА, № 1(11Е). – С. 93–99.

[3]. Сапон С. П. (2014) – Моделювання траєкторій руху шпинделя на регульованих гідростатичних опорах, Вісник Чернігівського державного технологічного університету. Серія «Технічні науки», №2(73). – С. 83–92.

[4]. Сапон С. П. (2013) – Методика експериментального визначення точності обертання шпинделя, Вісник Чернігівського державного технологічного університету. Серія технічні науки, №1(63). – С. 66–74.

[5]. Степнов М. Н., Шаврин А. В. (2005) – Статистические методы обработки результатов механических испытаний: справочник. – М.: Машиностроение. – 399 с.

[6]. Колкер Я. Д. (1976) – Математический анализ точности механической обработки деталей. – К.: Техника, 1976. – 200 с.

[7]. Струтинський В.Б. Федориненко Д.Ю.(2011) – Статистична динаміка шпиндельних вузлів на гідростатичних опорах: монографія. – Ніжин: ТОВ „Видавництво „Аспект-Поліграф”, – 464 с.

View publication stats