

УДК 621.822.172:621.7.079

Федориненко Д.Ю. д.т.н., доц., Бойко С.В. к.т.н., доц., Сапон С.П.
Чернігівський державний технологічний університет, Чернігів, Україна

ТОЧНІСТЬ ШПИНДЕЛЬНИХ ВУЗЛІВ НА РЕГУЛЬОВАНИХ ГІДРОСТАТИЧНИХ ОПОРАХ

Fedorynenko D., Boyko S., Sapon S.
Chernigiv State Technological University (fdy@mail.ru), Chernigiv, Ukraine

THE ACCURACY OF THE SPINDLE KNOTS ON ADJUSTABLE HYDROSTATIC BEARINGS

Розглянуті підходи до визначення статистичних закономірностей формування вихідної точності шпиндельного вузла на гідростатичних опорах регульованого типу. Визначено вплив регулювання витратними характеристиками та геометричними параметрами опор на точність шпиндельного вузла. Представлені результати експериментального дослідження точності шліфувального верстата з регульованими гідростатичними опорами шпиндельного вузла. Приведені результати спектрального аналізу партії зразків-виробів та встановлені закономірності формування суттєвих гармонік спектру залежно від статичного радіального зазору в опорах шпинделя.

Ключові слова: точність, регульована гідростатична опора, шпиндельний вузол, характеристичний вектор, статистичні характеристики.

Вступ

Сучасний розвиток машинобудівного виробництва обумовлює постійне зростання вимог щодо точності верстатів, зокрема шпиндельних вузлів як однієї з основних формують ланок верстата. Одним із найбільш ефективних засобів вирішення проблеми підвищення точності обробки на верстатах є застосування регульованих у процесі експлуатації гідростатичних підшипників в якості опор прецизійних шпиндельних вузлів, які поряд з високою жорсткістю та демпфуючою здатністю дозволяють ефективно керувати вихідними параметрами точності обертання шпинделя. Тому розробка прецизійних регульованих гідростатичних опор (ГСО) з метою підвищення точності обробки є актуальною науково-технічною проблемою, яка потребує подальших досліджень.

О.С. Проніковим для визначення показників точності шпиндельного вузла запропоновано використовувати інтегральні критерії – характеристики точності траєкторій руху фіксованих точок, які розташовуються на допоміжних базах шпинделя, або просторового положення характеристичного вектора шпинделя [1]. В.В. Селезньовою встановлений взаємозв'язок між параметрами траєкторії осі шпинделя і показниками якості оброблених поверхонь деталі на основі спектрального аналізу форми траєкторії [2].

Подальшого розвитку зазначений метод набув в роботах О.В. Пуша [3, 4], де зазначається, що для визначення характеристик точності, параметричної надійності шпиндельного вузла найбільш повним та достовірним є статистичне моделювання. На основі імовірнісного підходу ним отримані характеристики точності та параметричної надійності шпиндельних вузлів. Встановлено, що найбільший вплив на точність положення осі шпинделя і, пов'язану з нею, точність обробки чинять наступні фактори: постійна складова сили різання, діаметральний зазор в передній опорі, частота обертання шпинделя, теплові зміщення осі шпинделя, в'язкість мастила [3]. Там же відмічається, що точність обертання шпинделя на ГСО залежить, в основному, від режимів обробки різанням, тиску в карманах опори та діаметрального зазору в опорних вузлах шпинделя.

В.Б. Струтинським започатковані і розвиваються статистичні методи дослідження динаміки металорізальних верстатів [5, 6, 7]. Ним запропоновані імовірнісні підходи до аналізу динамічної якості шпиндельних вузлів, визначені статистичні закономірності формування вихідної точності обробки з урахуванням нестационарності процесу різання та випадкових зовнішніх збурень.

Слід також зазначити, що припущення стосовно просторового положення характеристичного вектора, зроблені в попередніх роботах, приводять до суттєвих похибок при визначенні статистичних характеристик точності шпинделя. Так, при визначенні точки прикладання характеристичного вектора не враховується розсіювання її положення; при аналітичному визначенні кутового положення характеристичного вектора не враховуються пружні деформації шпинделя. Отже необхідний пошук шляхів підвищення точності визначення просторового положення шпиндельного вузла.

Метою даної роботи є визначення і аналіз показників точності шпиндельного вузла на основі імовірнісного підходу та оцінювання ефективності застосування ГСО регульованого типу для підвищення точності шпиндельного вузла верстата.

Результати досліджень

Початок вектора R знаходиться в перетині пружної осі шпинделя з поверхнею його допоміжної бази. Траєкторії точки прикладання вектора R характеризують динамічну якість шпиндельного вузла верстата. Положення точки прикладання вектора R (точки O_2 на рис. 1, б) деформованого шпинделя визначається вектором ρ_R . Напрямок вектора R відносно площини розміщення опорної точки O_1 (торця недеформованого шпинделя) характеризується кутами α_R, β_R .

Переміщення у просторі точки O_2 (точки прикладання характеристичного вектора R) у момент часу t будуть повністю характеризовані випадковим вектором ρ_R , що визначається системою трьох корельованих випадкових величин. Для їх характеристики застосовані попарні кореляційні моменти проєкцій вектора ρ_R на осі декартової системи координат ρ_x, ρ_y, ρ_z , які утворюють тензор 2-го рангу у вигляді

$$K_{xyz} = \begin{bmatrix} \overline{\rho_x^2} & \overline{\rho_x \rho_y} & \overline{\rho_x \rho_z} \\ \overline{\rho_y \rho_x} & \overline{\rho_y^2} & \overline{\rho_y \rho_z} \\ \overline{\rho_z \rho_x} & \overline{\rho_z \rho_y} & \overline{\rho_z^2} \end{bmatrix}, \quad (1)$$

де компоненти тензора представляють собою усереднені в часі математичні сподівання центрованих складових проєкцій ρ_x, ρ_y, ρ_z випадкового вектора переміщень ρ_R .

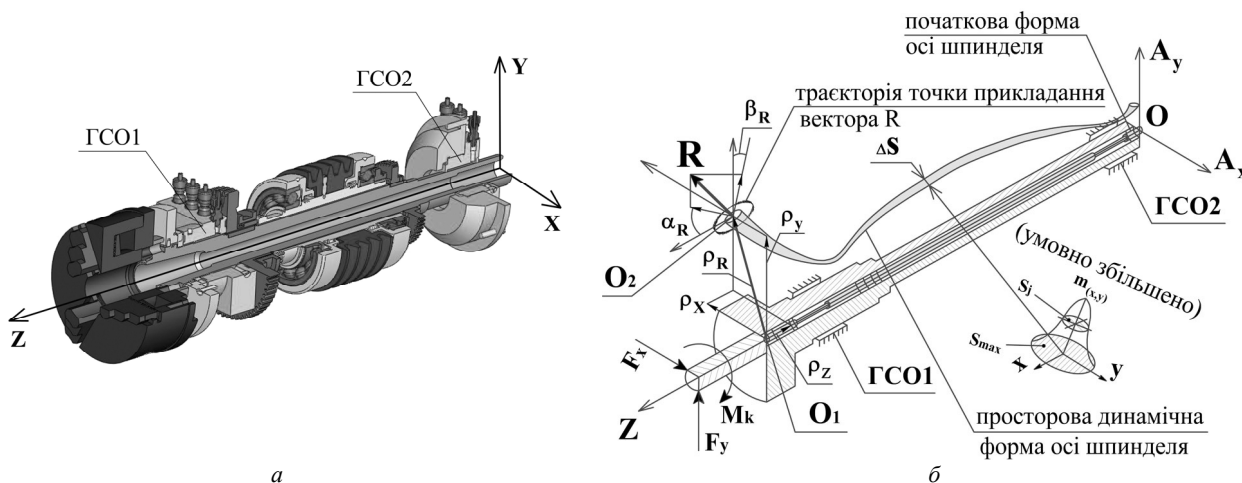


Рис. 1. 3D модель шпиндельного вузла а) та визначення положення вектора R шпинделя б): A_x, A_y – безрозмірні амплітуди коливань у площинах XOZ і YOZ відповідно

Компоненти тензора кореляційних моментів K_{xyz} обчислюються інтегруванням проєкцій випадкового вектора ρ_R на проміжку часу $(0; T)$. Кутове розташування проєкцій вектора R у площинах XOZ (α_R) та YOZ (β_R) визначено статистичними моментами 1-го та 2-го порядку випадкових величин кутів нахилу відповідних дотичних до пружної осі шпинделя в точці O_2 .

Таким чином, у загальному випадку положення вектора R у просторі визначають п'ять показників ($\rho_x, \rho_y, \rho_z, \alpha_R, \beta_R$), кожен з яких пов'язаний з вихідними параметрами точності обробки на верстатах.

Чисельно визначені траєкторії руху точки прикладання вектора R побудовані на рис. 1, б в припущенні співпадання їх центра з математичним сподіванням густини ймовірності $m_{(x,y)}$ положення деформованої осі шпинделя. Величина ΔS (див. рис. 1, б) характеризує випадкові відхилення осі шпинделя, які обумовлені стохастичними величинами початкової χ та динамічної ξ форм положення осі шпинделя.

Кількісною характеристикою поля розсіяння положень пружної осі шпинделя є максимальна площа S_{max} , що визначається як опорна площа відповідної двовимірної гістограми

$$S_{max} = \iint_{S_{max}} dx dy = 9\pi \left[(\sigma_{x_i}^2 + \sigma_{x_i}^2) (\sigma_{y_i}^2 + \sigma_{y_i}^2) \right]^{\frac{1}{2}},$$

де $\sigma_{x_i}^2, \sigma_{y_i}^2$ – дисперсії, що характеризують випадкову величину χ початкової форми осі шпинделя; $\sigma_{x_i}^2, \sigma_{y_i}^2$ – дисперсії, що характеризують випадкову величину ξ динамічної форми осі шпинделя; індекс i вказує на номер поперечного перерізу шпинделя.

Початкова форма пружної осі обумовлена положенням геометричних осей реальних поверхонь обертання шпинделя, яка визначена в евклідовому просторі без прикладеного зовнішнього навантаження. В загальному випадку просторове початкове положення осі шпинделя може бути задане дискретним набором математичних сподівань координат центрів тяжіння m_{x_c} , m_{y_c} поперечних перерізів та координатою z_i розташування зазначених перерізів по довжині шпинделя:

$$m_{x_c} = \int_{-\infty}^{+\infty} x_c \cdot f(x) dx, \quad m_{y_c} = \int_{-\infty}^{+\infty} y_c \cdot f(y) dy,$$

де x_c , y_c – координати центру тяжіння i -го поперечного перерізу шпинделя; $f(x)$, $f(y)$ – закони розподілу густини ймовірностей вздовж відповідних координатних осей.

Координати x_c , y_c визначаються так:

$$x_c = \frac{\int_0^{2\pi} \int_0^{\rho(\varphi)} \rho^2 \cos(\varphi) d\rho d\varphi}{\int_0^{2\pi} \int_0^{\rho(\varphi)} \rho d\rho d\varphi}, \quad y_c = \frac{\int_0^{2\pi} \int_0^{\rho(\varphi)} \rho^2 \sin(\varphi) d\rho d\varphi}{\int_0^{2\pi} \int_0^{\rho(\varphi)} \rho d\rho d\varphi},$$

де $\rho(\varphi)$ – функція відхилень профілю поперечного перерізу шпинделя в полярній системі координат, яка представлена у вигляді ряду Фур'є.

Зсув та кут повороту контуру поперечного перерізу по довжині шпинделя визначаються амплітудою A_1 та початковою фазою ψ_{01} першої гармоніки ряду Фур'є: $A_1 = e$, $\psi_{01} = \frac{\pi}{2} - \arctg \frac{y_c}{x_c}$, де e – ексцентриситет контуру

($e = \sqrt{x_c^2 + y_c^2}$); x_c , y_c – проекції ексцентриситету на координатні площини XOZ і YOZ відповідно. Величини x_c , y_c характеризують початкове положення пружної осі, яке обумовлене геометричними відхиленнями поверхонь обертання в поздовжньому напрямку шпинделя, для математичного опису яких доцільно використовувати ряд спеціального типу, що є сумою тригонометричних та гіперболічних базисних функцій [6].

На основі формули (1) за допомогою пакету MathCAD визначені компоненти тензора кореляційних моментів шпиндельного вузла токарного верстата (рис. 2), показано на рис. 1, а. При моделюванні показників точності здійснювалося варіювання величиною статичного зазору δ_0 в опорах шпинделя для двох систем живлення ГСО: дросельної (рис. 2, а) та з пропорційними клапанами витрат рідини (рис. 2, б). Пропорційні клапани витрат змінюють пропускну здатність залежно від електричного опорного сигналу. Електричний сигнал змінюється спеціальним чином залежно від зміщення шпинделя під навантаженням з боку процесу різання. Докладно питання створення систем автоматичного керування точністю положення шпинделя на основі регульованих ГСО висвітлені в роботах [8, 9].

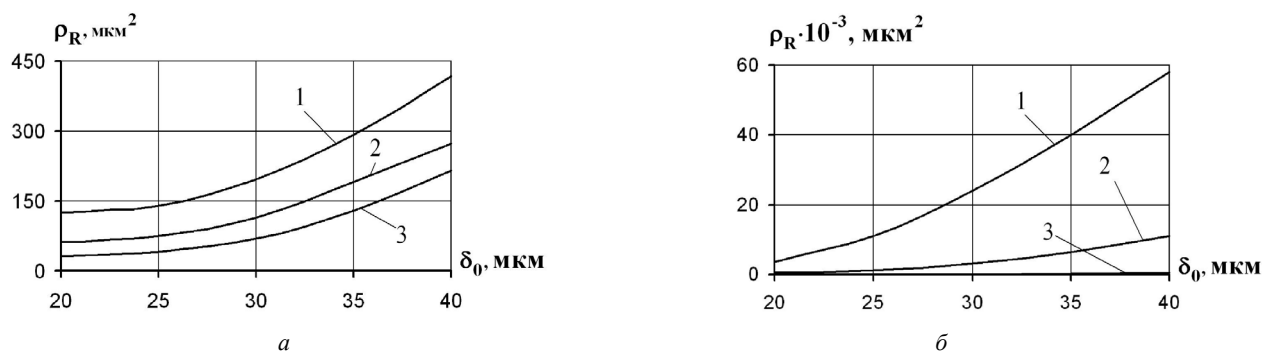


Рис. 2. Компоненти тензора кореляційних моментів випадкового вектора ρ_R : 1 - $\overline{\rho_x^2}$; 2 - $\overline{\rho_y^2}$; 3 - $\overline{\rho_x \rho_y}$

Як видно з рис. 2, застосування регульованих пропорційних клапанів витрат рідини в системі живлення опор шпинделя призводить до зменшення математичних сподівань центрованих складових проекцій $\overline{\rho_x^2}$, $\overline{\rho_y^2}$, $\overline{\rho_x \rho_y}$ випадкового вектора переміщень ρ_R шпинделя у всьому діапазоні регулювання зазору δ_0 , що обумовлює підвищення точності обертання шпинделя.

Випадкові реалізації кутів нахилу α_R , β_R на проміжку часу $(0, T)$ визначаються відхиленнями нахилу пружної осі відносно центрованих значень $\overline{\alpha_R}$, $\overline{\beta_R}$ при дії навантаження з боку процесу різання. В результаті

моделювання встановлено, що система живлення шпindelних ГСО мало впливає на значення кутів α_R , β_R . Також встановлено, що регулювання величиною зазору δ_0 в ГСО шпindelа призводить до відповідної зміни статистичних характеристик кутів α_R , β_R . Так, математичне сподівання кутів нахилу зменшується майже в 1,5 рази, а дисперсія – в 2 рази в процесі регулювання зазору з 40 мкм до 20 мкм. Це пояснюється залежністю поперечно-кутової жорсткості опор від значення зазору δ_0 . Зазначене явище обумовлює зменшення відхилень від циліндричності та конусності оброблених різанням поверхонь заготовок.

Здійснювалася експериментальна перевірка теоретично отриманих закономірностей. Точність верстата з регульованими ГСО шпindelа оцінювалася за показниками точності обробки партії зразків-виробів (рис. 3, а), а саме: за відхиленням від круглості (рис. 3, б) та шорсткістю оброблених поверхонь (рис. 3, в). Встановлено, що регулювання величиною зазору δ_0 в ГСО шпindelа дозволяє підвищити точність верстата за показниками математичного сподівання відхилень від круглості (в 2,2 рази), математичного сподівання шорсткості (в 1,3 рази), середнього квадратичного відхилення шорсткості оброблених поверхонь (у 1,5 рази) партії зразків-виробів.

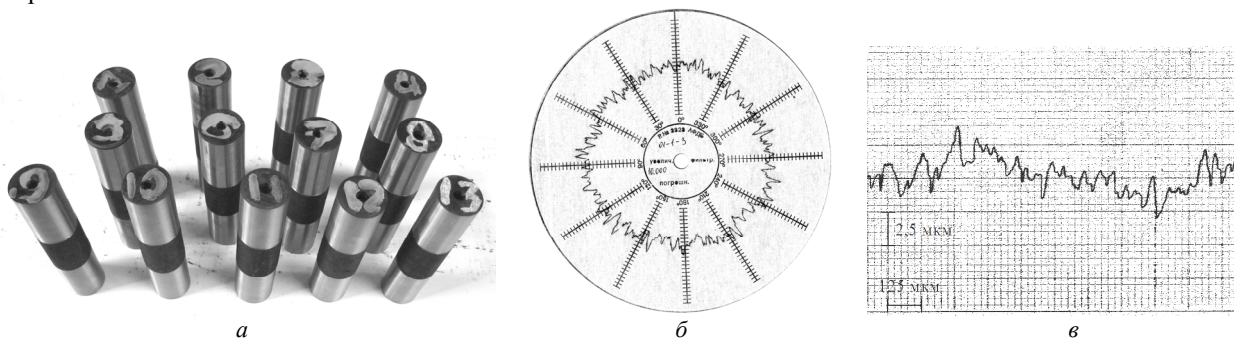


Рис. 3. Дослідна партія зразків-виробів а) та типова круглограма б), профілограма в) оброблених шліфуванням поверхонь ($\delta_0=20$ мкм)

Частотний склад круглограм партії зразків-виробів встановлювався методами спектрального аналізу контуру оброблених шліфуванням поверхонь (рис. 4). Зменшення зазору в регульованих ГСО шпindelа сприяє спаданню амплітудних значень всіх суттєвих гармонік спектру. Причому, найбільший вплив регулювання величиною δ_0 чинить на амплітуду другої гармоніки. Відмічені особливості якісно співпадають з тенденціями, що визначені в результаті спектрального аналізу траєкторій руху точки прикладання вектора R.

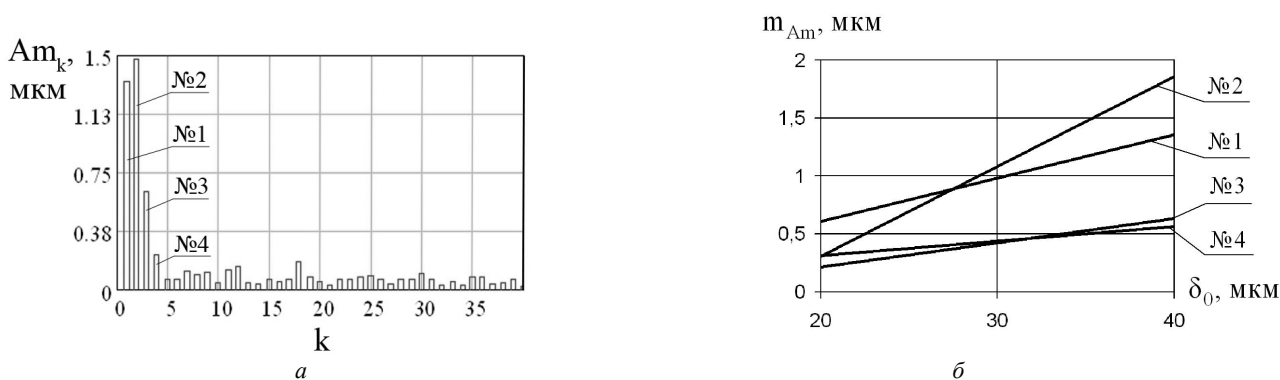


Рис. 4. Спектр амплітуд Am_k гармонік а) ($\delta_0=40$ мкм) та математичне сподівання амплітуд суттєвих гармонік m_{Am} б) поверхонь партії зразків-виробів (номер на графіках відповідає номеру гармоніки спектру)

Порівнянням результатів спектрального аналізу зразків-виробів встановлено, що верстат із шпindelними регульованими ГСО забезпечує зниження значення амплітуди овальності контуру оброблених поверхонь в 6 – 7 разів, амплітуд ексцентричності, огранювання контуру – в 2 – 3 рази. Це пояснюється значним підвищенням жорсткості і демпфування у верстаті, оснащеному регульованими ГСО спеціальної конструкції.

Висновки

Розроблена математична модель для визначення точності шпindelного вузла на основі дослідження просторового положення характеристичного вектора з урахуванням випадкових характеристик початкової, динамічної форм пружної осі шпindelа. Це дозволило підвищити точність існуючих методів визначення характеристик точності шпindelних вузлів на ГСО.

Встановлено, що застосування в системі живлення пропорційних клапанів витрат рідини, регулювання величиною статичного зазору в ГСО є ефективними засобами підвищення точності обертання шпинделя. Так, регулювання величиною зазору δ_0 в опорах в межах 20 – 40 мкм дозволяє підвищити точність обертання шпинделя в 2 – 3 рази, а використання пропорційних клапанів витрат рідини в системі живлення опор дозволяє підвищити точність обертання шпинделя на порядок в порівнянні з дросельною системою регулювання.

Перспективним напрямком подальших досліджень є розробка адаптивних систем керування положенням шпинделя на основі мехатронних модулів, які, поряд з точністю обертання в межах часток мікрометра, забезпечували б високу швидкість та надійність системи керування.

Аннотация. Рассмотрены подходы к определению статистических закономерностей формирования исходной точности шпиндельного узла на гидростатических опорах регулируемого типа. Определено влияние регулирования расходными характеристиками и геометрическими параметрами опор на точность шпиндельного узла. Представлены результаты экспериментального исследования точности шлифовального станка с регулируемым гидростатическими опорами шпиндельного узла. Приведены результаты спектрального анализа партии образцов - изделий и установлены закономерности формирования существенных гармоник спектра в зависимости от статического радиального зазора в опорах шпинделя.

Ключевые слова: точность, регулируемая гидростатическая опора, шпиндельный узел, характеристический вектор, статистические характеристики

Abstract.

Purpose. Definition and analysis of the indicators of the spindle knot accuracy on the basis of the probability approach and evaluating the effectiveness of hydrostatic bearings adjustable types to increase the accuracy of the machine tools spindle knot.

Design/methodology/approach. In the work implemented probabilistic approach to determine the precision of spindle knot. Accuracy was assessed by the statistical characteristics of random spindle characteristic vector.

Findings. Approaches to the definition of statistical regularities of the formation of the source precision spindle knot on a hydrostatic bearings adjustable type. The influence of regulation of consumption characteristics and geometric parameters of bearings on the accuracy of the spindle knot. The results of the experimental studies of the accuracy of grinding machine tools with adjustable hydrostatic supports of spindle knot. Results of spectral analysis of the party samples of the products and regularities of the formation of significant harmonic spectrum depending on the static radial gap in the pillars of the spindle.

Originality/value. Certain statistical regularities of formation of the initial accuracy of rotation of a spindle on the basis of research of the spatial position of the characteristic vector spindle.

Keywords: Precision, Adjustable hydrostatic bearing, Spindle knot, Characteristic vector of spindle

Бібліографічний список використаної літератури

1. Проников А.С. Программный метод испытания металлорежущих станков / А.С. Проников. – М.: Машиностроение, 1985. – 287 с.
2. Селезнева В.В. Связь параметров траектории оси шпинделя с показателями качества детали / В.В. Селезнева // Станки и инструмент. – 1985. – № 1. – С. 8 – 10.
3. Пуш А.В. Шпиндельные узлы: качество и надежность / А.В. Пуш. – М.: Машиностроение, 1992. – 288 с.
4. Пуш А.В. Шпиндельные узлы. Проектирование и исследование: монография / А.В. Пуш, И.А. Зверев. – М.: Станкин, 2000. – 197 с.
5. Струтинський В.Б. Математичне моделювання металорізальних верстатів / В.Б. Струтинський, П.П. Мельничук. – Житомир: ЖІТІ, 2002. – 572 с.
6. Струтинський В.Б. Математичне моделювання процесів та систем механіки / В.Б. Струтинський. – Житомир: ЖІТІ, 2001. – 612 с.
7. Струтинський В.Б. Стохастичні процеси у гідроприводах верстатів: монографія / В.Б. Струтинський, В.М. Тіхенко. – Одеса: Астропринт, 2009. – 456 с.
8. Струтинський В.Б. Статистична динаміка шпиндельних вузлів на гідростатичних опорах: монографія / В.Б. Струтинський, Д.Ю. Федориненко. – Ніжин: ТОВ „Видавництво „Аспект-Поліграф”, 2011. – 464 с.
9. Регульовані гідростатичні підшипники для шпиндельних вузлів / [Ю.О. Сахно, Д.Ю. Федориненко, С.В. Бойко, В.С. Волик]. – Ніжин: ТОВ “Видавництво”Аспект-Поліграф”, 2009. – 172 с.

References

1. Pronikov A.S. Programmnyj metod ispytaniya metallorezhushchih stankov. Moscow: Mashinostroenie, 1985. 287 p.
2. Selezneva V.V. Svyaz parametrov traektorii osi shpindelja s pokazateljami kachestva detali. Stanki i instrument. 1985. no. 1. P. 8 – 10.
3. Push A.V. Shpindelnye uzly: kachestvo i nadezhnost'. Moscow: Mashinostroenie, 1992. 288 p.
4. Push A.V., Zverev I.A. Shpindelnye uzly. Proektirovanie i issledovanie: monografija, Moscow: Stankin, 2000. 197 p.
5. Strutynskij V.B., Mel'nychuk P.P. Matematychnе modeljuvannja metalorizal'nyh verstativ, Zhytomyr: ZhITI, 2002. 572 p.
6. Strutynskij V.B. Matematychnе modeljuvannja procesiv ta system mehaniky. Zhytomyr: ZhITI, 2001. 612 p.
7. Strutynskij V.B., Tihenko V.M. Stohastychni procesy u gidropryvodah verstativ: monografija. Odesa: Astroprynt, 2009. 456 p.
8. Strutynskij V.B., Fedorynenko D.Y. Statystychna dynamika shpyndelnyh vuzliv na gidrostatychnykh oporah: monografija, Nizhyn: TOV „Vydavnyctvo „Aspekt-Poligraf”, 2011. 464 p.
9. Sahno Y.O., Fedorynenko D.Y., Bojko S.V., Volyk V.S.. Regulovani gidrostatychni pidshyynyky dlja shpyndelnyh vuzliv. Nizhyn: TOV “Vydavnyctvo”Aspekt-Poligraf”, 2009. 172 p.

Подана до редакції 30.09.2013