

ВПЛИВ ГІРОСКОПІЧНИХ МОМЕНТІВ НА ОБЕРТОВІ ДЕТАЛІ ШПИНДЕЛЬНОГО ВУЗЛА ВЕРСТАТА ПАРАЛЕЛЬНОЇ КІНЕМАТИКИ

Strutins'kij V., Jurchishin O., Rudakov V.

TheNational Technical University of Ukraine «Kyiv Polytechnic Institute», Kyiv, Ukraine (oksanajur@mail.ru)

INFLUENCE OF GYROSCOPIC MOMENTS IS ON CIRCULATING DETAILS OF SPINDLE KNOT OF MACHINE-TOOL OF PARALLEL KINEMATICS

Рассмотрены особенности пространственного движения шпинделя станка параллельной кинематики. Показано, что пространственное движение шпинделя обуславливает возникновение гироскопических моментов на вращающихся деталях. Обоснованно негативное действие гироскопических моментов на тела качения подшипников. Определено, что проблема в общем виде заключается в разработке высокоэффективных станков параллельной кинематики с высокой частотой вращения шпинделя. Рекомендовано в станках параллельной кинематики не использовать шпиндель на опорах качения. Как альтернативный вариант предложена специальная конструкция пневмошпинделя.

Ключевые слова: станок параллельной кинематики, шпиндель, поворот, гироскопический момент, подшипник, тело качения, вращение, пневмошпиндель.

Вступ

Верстата паралельної кінематики забезпечують обробку складних криволінійних поверхонь. При цьому, шпиндель верстата здійснює просторові переміщення, зокрема, поперечно-кутові переміщення. У верстатах паралельної кінематики застосовуються компактні мотор-шпинделі з високою частотою обертання 50000 об/хв. і вище. Просторові рухи обертового шпинделя обумовлюють виникнення значних гіроскопічних моментів у шпиндельному вузлі. Гіроскопічні моменти суттєвим чином впливають на обертіві деталі шпиндельного вузла. Дослідження впливу гіроскопічних моментів є актуальним.

Проблема в загальному вигляді полягає в розробці високоефективних верстатів паралельної кінематики з високою частотою обертання шпинделя.

Проблема пов'язана із важливими науковими і практичними завданнями розробки прогресивних конструкцій металообробного обладнання.

В останніх дослідженнях і публікаціях [1] наведена значна кількість схемних і конструктивних рішень верстатів паралельної кінематики. Незалежно від типу верстата його основною складовою є високообертовий шпиндель [2]. В літературних джерелах [3] вказано, що ефективна обробка деталей має місце при частоті обертання шпинделя 50..100 тис. обертів за хвилину. Відомо, що в процесі роботи верстата має місце поперечно-кутове переміщення шпинделя із великими кутовими швидкостями [4]. При цьому, як вказано в [5, 6], виникають суттєві гіроскопічні моменти, які діють на шпиндель і тіла качення підшипників.

Результатів досліджень впливу гіроскопічних моментів на обертіві деталі шпинделя в літературних джерелах не виявлено.

До невирішених раніше частин загальної проблеми відноситься встановлення закономірностей навантажень на шпиндель, обумовлених його поворотним переносним рухом.

Метою досліджень є теоретичне визначення навантажень на обертіві деталі шпиндельного вузла при його просторовому переміщенні та розробка заходів по компенсації негативних наслідків поворотного руху шпинделя.

Задачами досліджень поставлено математичний опис динамічних навантажень, встановлення впливу даних навантажень на обертіві деталі шпинделя та розробка пропозицій по компенсації негативної дії гіроскопічних моментів на шпиндельний вузол верстата паралельної кінематики.

Просторовий поворотний рух шпинделя верстата та його характеристики

Шпиндель встановлено в рухомому виконавчому органі верстата паралельної кінематики, який здійснює поступальні та поворотні рухи (рис. 1).

Зв'язок між координатами довільної точки нерухомої x_0, y_0, z_0 і повернутої x, y, z систем координат виконавчого органу встановлюється напрямними косинусами [6], які утворюють матрицю:

$$[c_{ij}] = \begin{bmatrix} c_{11} & c_{12} & c_{13} \\ c_{21} & c_{22} & c_{23} \\ c_{31} & c_{32} & c_{33} \end{bmatrix} \quad (1)$$

В матриці позначено косинуси кутів між осями:

$$\begin{aligned} ox_0 &= ox_1, \quad oy_0 = ox_2, \quad oz_0 = ox_3 \\ px &= px_1, \quad py = px_2, \quad pz = px_3 \\ c_{ij} &= \cos(ox_i, px_j), \quad i, j = 1, 2, 3. \end{aligned}$$

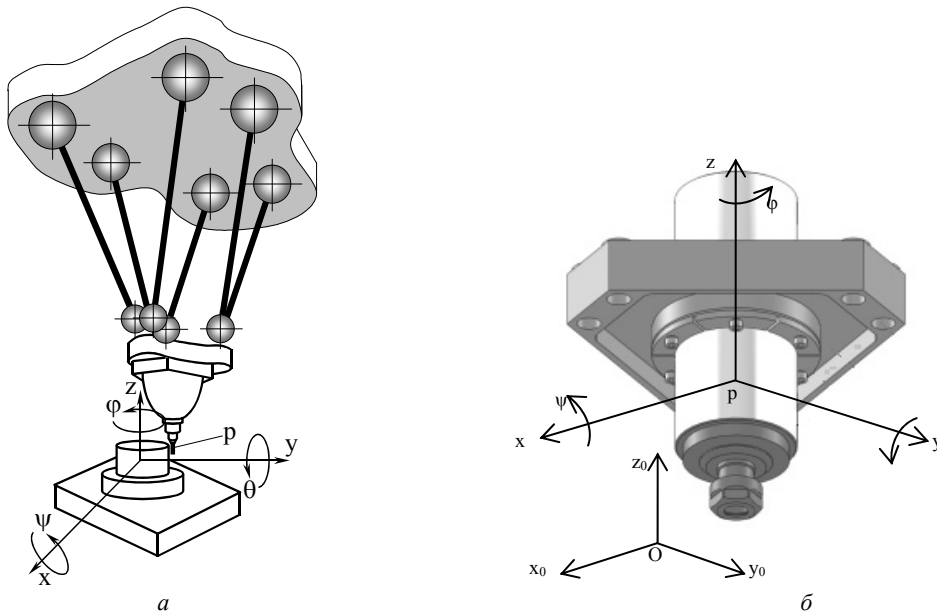


Рис. 1. Схема верстата паралельної кінематики (а) та виконавчий орган верстата паралельної кінематики з високооборотним електрошпинделем(б)

Матриця напрямних косинусів є ортогональною. Її визначник дорівнює одиниці, а її обернена матриця співпадає із транспонованою матрицею.

Поворот виконавчого органу являє собою обертання кожного радіуса вектора точок виконавчого органу навколо деякої осі L, точки якої є інваріантними (рис. 2а).

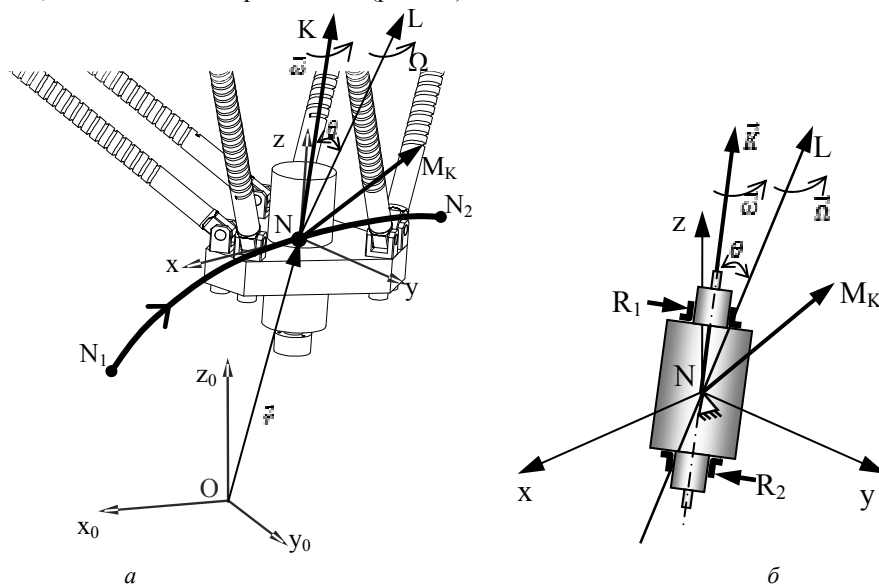


Рис. 2. Просторове переміщення виконавчого органу верстата як поворот навколо миттєвої осі обертання L (а) та прецесійний рух обертового шпинделя з виникненням гіроскопічного моменту M_K (б)

Кут повороту δ навколо даної осі визначається матрицею напрямних косинусів згідно співвідношень

$$\cos \delta = \frac{1}{2} [Tr(c_{ij}) - 1] = \frac{1}{2} (c_{11} + c_{22} + c_{33} - 1) \quad (2)$$

Положення осі обертання відносно осей нерухомої системи координат $0x_0 y_0 z_0$ характеризується трьома напрямними косинусами c_1, c_2, c_3 , які визначаються через матрицю повороту (1) згідно залежностей:

$$c_1 = \frac{c_{32} - c_{23}}{2 \sin \delta}, \quad c_2 = \frac{c_{13} - c_{31}}{2 \sin \delta}, \quad c_3 = \frac{c_{21} - c_{12}}{2 \sin \delta}.$$

Загальна матриця повороту може бути визначена через параметри, що характеризують вісь обертання у вигляді:

$$[c_{ij}] = \cos \delta \begin{bmatrix} 1 & 0 & 0 \\ 0 & 1 & 0 \\ 0 & 0 & 0 \end{bmatrix} + (1 - \cos \delta) \begin{bmatrix} c_1^2 & c_1 c_2 & c_1 c_3 \\ c_2 c_1 & c_2^2 & c_2 c_3 \\ c_3 c_1 & c_3 c_2 & c_3^2 \end{bmatrix} + \sin \delta \begin{bmatrix} 0 & -c_3 & c_2 \\ c_3 & 0 & -c_1 \\ -c_2 & c_1 & 0 \end{bmatrix} \quad (3)$$

Параметри, які входять в залежність (3) змінюються в часі.

Визначення гіроскопічних моментів, які діють на обертові деталі шпинделя

При повороті виконавчого органу навколо миттєвої осі обертання L вісь шпинделя, який має велику кутову швидкість власного обертання $\bar{\omega}$ також повертається навколо вісі L з кутовою швидкістю $\bar{\Omega}$. Кутова швидкість пов'язана з кутом повороту δ (2) диференціальною залежністю $\Omega = \frac{d\delta}{dt}$. Таким чином шпиндель

здійснює прецесійний рух з кутовою швидкістю прецесії $\bar{\Omega}$. Враховуючи, що $\bar{\Omega} \ll \bar{\omega}$ для визначення динамічних навантажень на шпиндель застосовано наближену теорію руху гіроскопів[6]. Головний момент кількості руху шпинделя складає

$$\bar{K} = I \bar{\omega} \quad (4)$$

де I – момент інерції шпинделя, відносно власної осі обертання.

Гіроскопічний момент, який діє на шпиндель, визначається із векторної залежності:

$$\bar{M}_k = I \bar{\omega} \times \bar{\Omega} \quad (5)$$

Модуль гіроскопічного моменту відповідно (5) дорівнює

$$|\bar{M}_k| = I |\bar{\omega}| \cdot |\bar{\Omega}| \sin \theta, \quad (6)$$

де θ – кут між віссю шпинделя і миттєвою віссю повороту виконавчого органу.

Модуль моменту (6) залежить від кута θ між миттєвою віссю обертання та віссю шпинделя і досягає максимуму при $\theta = \pi/2$.

Згідно властивостей векторного добутку вектор гіроскопічного моменту (5) направлений перпендикулярно до площини утвореною віссю обертання шпинделя та віссю миттєвого повороту виконавчого органу (див. рис. 2б).

Так як вісь миттєвого повороту проходить через вісь симетрії виконавчого органу, а відповідно через вісь симетрії шпинделя, то гіроскопічний момент завжди буде перпендикулярним до радіальної площини шпинделя.

Високі частоти обертання шпинделя приводять до виникнення значних гіроскопічних моментів, тому несуча система верстата паралельної кінематики повинна компенсувати їх негативну дію. Компенсація гіроскопічних моментів забезпечується реакціями опор шпинделя R_1, R_2 , які створюють компенсуючий момент.

Якщо верстат паралельної кінематики містить шпиндель на опорах кочення, то тіла кочення обертаються разом із шпинделем, але вектор їх кутової швидкості направлений протилежно вектору кутової швидкості шпинделя (рис. 3).

На кожне тіло кочення діє гіроскопічний момент

$$\bar{M}_1 = I_1 \bar{\omega}_1 \times \bar{\Omega}$$

де $\bar{\omega}_1$ – вектор кутової швидкості тіла кочення; I_1 – момент інерції тіла кочення.

Гіроскопічний момент, що діє на тіло кочення, направлений протилежно моменту, що діє на шпиндель. В підшипнику наявна певна кількість тіл кочення. Гіроскопічні моменти, що діють на тіла кочення є паралельними однаковими по величині і діють в центральній площині, перпендикулярній осі обертання шпинделя (рис. 4).

Із кінематичних співвідношень впливає зв'язок кутових швидкостей шпинделя та тіла кочення

$$\omega_1 = \frac{r_b}{r_k} \omega,$$

де r_b – радіус доріжки кочення внутрішнього кільця підшипника; r_k – радіус тіла кочення.

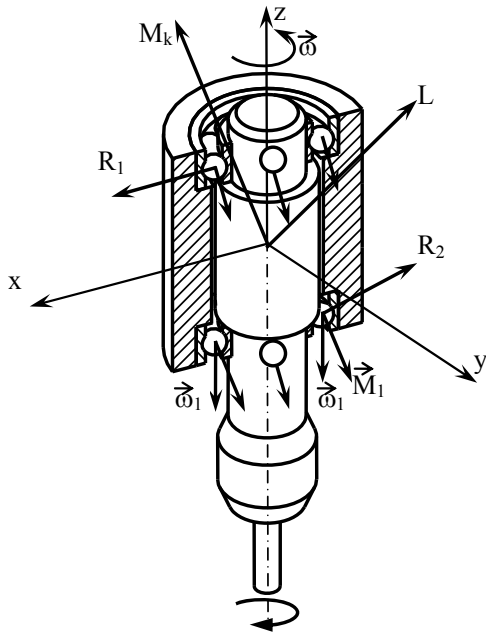


Рис. 3. Дія гіроскопічних моментів на шпиндель та тіла кочення підшипників шпинделя

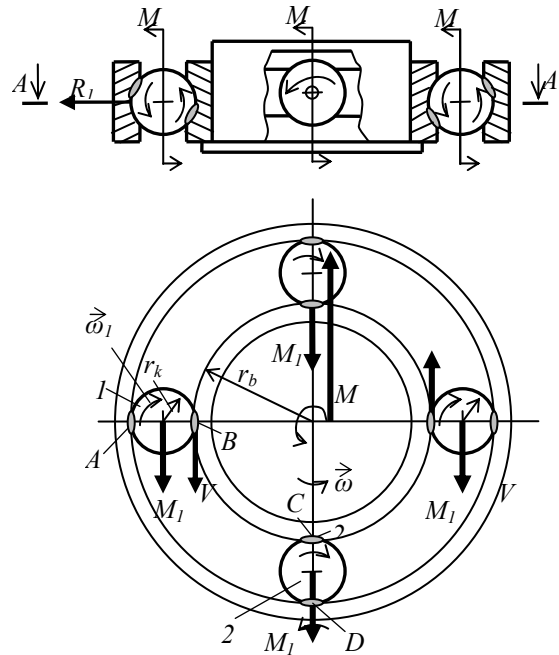


Рис. 4. Схема дії гіроскопічних моментів на тіла кочення підшипника

Використавши дану залежність, одержимо взаємозв'язок гіроскопічних моментів, що діють на шпиндель та тіла кочення

$$\overline{M}_1 = -\frac{I_1}{I} \cdot \frac{r_b}{r_k} \overline{M}_k$$

Знак мінус в даній формулі вказує на протилежні напрямки гіроскопічних моментів, що діють на шпиндель та на тіла кочення.

Тіло кочення контактує з доріжками в областях А і В та С і D. При наявності гіроскопічних моментів M_1 тіло кочення в позиції 1 буде обертатись і в областях А і В буде мати місце взаємне зміщення (ковзання) тіла кочення відносно доріжок підшипника. В позиції 2 дія моменту M_1 приведе до повороту (вертіння) тіла кочення відносно осі, що проходить через області С і D.

В контакті між тілом кочення і доріжкою підшипника мають складні процеси взаємодії поверхонь. При наявності змащення в контакті між тілом кочення і доріжкою виникає тонка плівка мастила. Згідно еластогідродинамічної теорії змащення [7] форма контактуючих поверхонь при коченні без вертіння близька до плоскої еліптичної ділянки (рис. 5).

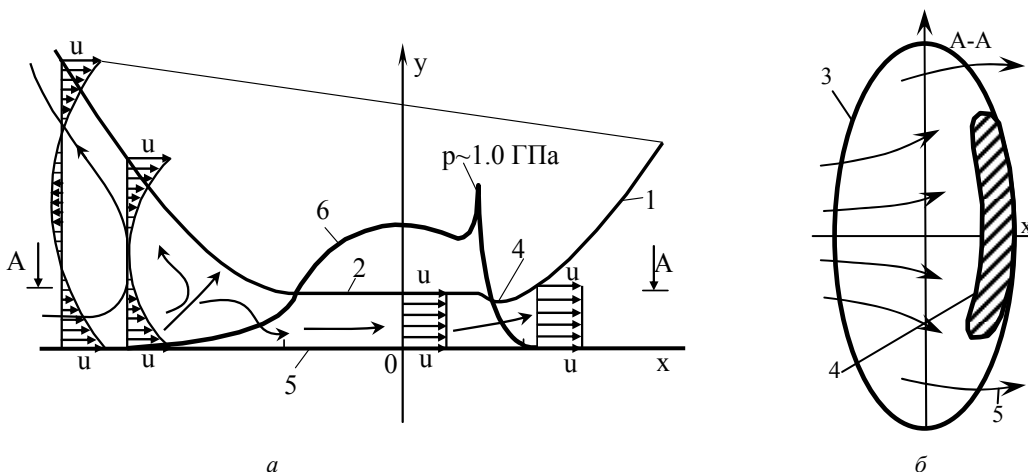


Рис. 5. Деформація тіла кочення з утворенням еліптичного контакту при коченні без вертіння: а – течія мастила в центральному перетині; б – еліптична ділянка контакту

Тіло кочення 1 деформується з утворенням площадки 2, обмеженої еліптичним контуром 3. На периферійній ділянці площадки утворюється обмежений криволінійний виступ 4. В плівці мастила між тілом кочення і доріжкою 5 виникає значний тиск рідини, який характеризується опуклою епюрою 6.

Значення тиску є надзвичайно великим і сягає 0,4-1,0 Гпа. Між тілом кочення і доріжкою завжди є плівка мастила. Це запобігає зношенню деталей підшипника та поліпшує режим його роботи.

При дії гіроскопічних моментів має місце поворот тіла кочення 1 відносно осі y , що проходить через центр площадки контакту (рис. 6).

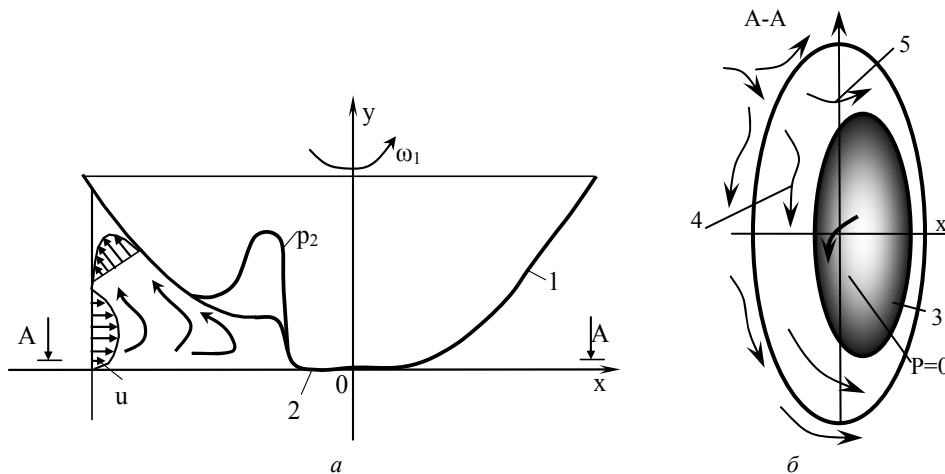


Рис. 6. Схема взаємодії тіла кочення і доріжки при наявності вертіння, обумовленого гіроскопічним моментом, що діє на тіло кочення: *a* – центральний перетин, *б* – область контакту та схема течії мастила

Поворот тіла кочення 1 обумовлює виникнення відцентрових сил в шарі мастила. При цьому, в центральній області контакту 2 тиск падає і тіло кочення відновлює свою форму з утворенням механічного контакту між тілом кочення і доріжкою. Область контакту має еліптичну форму 3. Мастило не попадає в область контакту, обтікаючи її двома потоками 4 і 5. Тиск в плівці мастила в області контакту падає ($p=0$).

Наявність механічного контакту приводить до виникнення сил сухого тертя виділення енергії, а відповідно, суттєвого підвищення температури в області контакту. Даний режим роботи підшипника кочення є недопустимим. Тому використання шпindelних вузлів на опорах кочення у верстатах паралельної кінематики є недоцільним.

Запропоновано альтернативний варіант у вигляді спеціального високо обертового пневмошпинделя (рис.7).

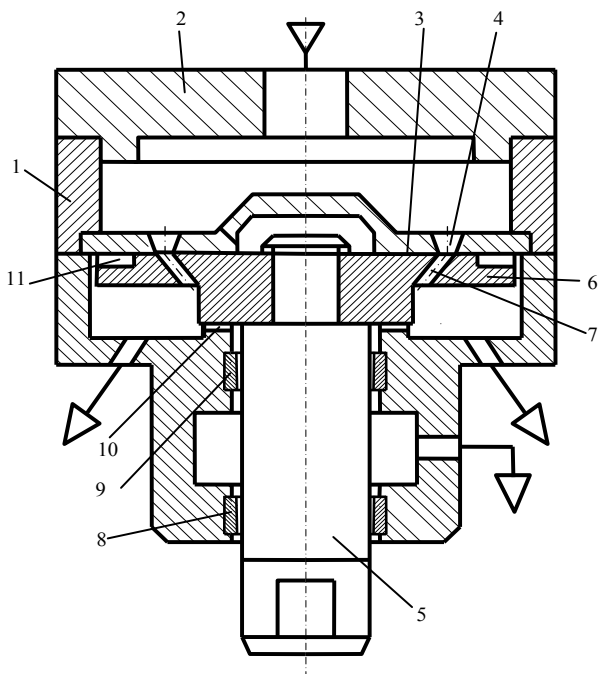


Рис. 7. Конструктивна схема пневмошпинделя

паралельної кінематики по причині дії значних гіроскопічних моментів на тіла кочення. Дані гіроскопічні моменти викликають інтенсивне вертіння тіл кочення, періодичне проковзування тіл кочення відносно доріжок та квазіперіодичний гвинтовий рух тіл кочення. При цьому порушуються умови регламентного режиму роботи підшипника кочення.

Пневмошпиндель має корпус 1 із кришкою 2. В корпусі встановлено напрямний апарат 3 всоплових отворах 4 якого формуються направлені струмені повітря. Обертовий шпиндель 5 має турбіну 6 із сопловими отворами 7. Шпиндель встановлено в радіальних аеродинамічних підшипниках 8, 9. Для компенсації осьових зусиль і гіроскопічних моментів служать секційні аеродинамічні підшипники 10 і 11.

Пневмошпиндель має компактну конструкцію і ефективно компенсує наявні гіроскопічні моменти, які виникають при повороті виконавчого органу верстата паралельної кінематики.

Висновки

1. Показано, що при просторовому переміщенні виконавчого органу верстата паралельної кінематики виникає гіроскопічний момент, вектор якого перпендикулярний радіальній площині шпинделя, яка проходить через вісь миттєвого повороту виконавчого органу. Модуль гіроскопічного моменту пропорційний кутовій швидкості шпинделя, синусу кута між віссю миттєвого повороту виконавчого органу та кутовій швидкості миттєвого повороту.

2. Шпиндель на опорах кочення не рекомендується використовувати у верстатах

3. У верстатах паралельної кінематики доцільно застосовувати високо обертовий пневмошпindel на аеродинамічних опорах. При цьому, осеві аеродинамічні опори рекомендується виконати секційного типу для забезпечення ефективної компенсації гіроскопічних моментів, що діють на шпindel.

4. Як напрямок подальших досліджень рекомендується провести дослідну перевірку розробленого пневмошпинделя та визначення особливостей динамічних процесів верстата паралельної кінематики із пневмошпindelом.

Анотація. Розглянуто особливості просторового руху шпинделя верстата паралельної кінематики. Показано, що просторовий рух шпинделя обумовлює виникнення гіроскопічних моментів на обертові деталі. Обґрунтовано негативну дію гіроскопічних моментів на тіла кочення підшипників. Визначено, що проблема в загальному вигляді полягає в розробці високоефективних верстатів паралельної кінематики із високою частотою обертання шпинделя. Рекомендовано у верстатах паралельної кінематики не використовувати шпindel на опорах кочення. Як альтернативний варіант запропонована спеціальна конструкція пневмошпинделя.

Ключові слова: верстат паралельної кінематики, шпindel, поворот, гіроскопічний момент, підшипник, тіло качення, вертіння, пневмошпindel.

Abstract. The features of spatial motion of spindle of machine-tool of parallel kinematics are considered. It is shown that spatial motion of spindle stipulates the origin of gyroscopic moments on rotatable components. Negative effect of gyroscopic moments on the rolling bodies of bearing is grounded. For certain, the problem in general lies in development of high-efficiency machine-tools of parallel kinematics with high-frequency of spindle rotation.

The aim of research is theoretical determination of loading on the rotatable details of spindle knot at its spatial moving and development of measures to offset the negative effects of the rotational motion of the spindle.

Tasks of the research are to put mathematical description of the dynamic loading, to establish the effect of these loads on the rotatable details of spindle and to develop suggestions on indemnification of negative effects of gyroscopic moments on the spindle knot of machine-tool of parallel kinematics.

It is recommended not to use the spindle of bearings rolling in parallel kinematics machines. As an alternative, a special design of pneumatic spindle is offered.

Keywords: parallel kinematics machine tool, spindle, rotating, gyroscopic moment, bearing, body rolling, spinning, pneumatic spindle

1. Крижанівський В. А. Технологічнеобладнання з паралельноюкінематику: Навчальнийпосібник для ВНЗ. Під ред. Ю. М. Кузнецова / В.А.Крижанівський, Ю.М.Кузнецов, І.А.Валявський, Р.А.Склярів. – Кіровоград, 2004. – 449 с.
2. Кузнецов Ю.М.Компоновка верстатів з механізмами паралельної структури / Ю.М.Кузнецов, Д.О.Дмитрієв, Г.Ю. Діневич. – Херсон: ПП Вишнемирський В.С., 2009. – 456 с.
3. Афонин В.Л. Обрабатывающее оборудование на основе механизмов параллельной структуры / Под общ. ред В.Л. Афонина // В.Л.Афонин, П.В.Подзоров, В.В.Слепцов. – М.: Изд-во МГТУ Станкин, Янус. – К., 2006. – 452с.
4. Струтинський С.В. Визначення основних конструктивних параметрів сферичних опорних вузлів просторового механізму методом Монте-Карло / С.В. Струтинський // Всеукраїнський щомісячний науково-технічний журнал “Машинознавство”. – 2007. - №5. – С.37-43.
5. Бушуев В.В. Практика конструирования машин: Справочник / В.В.Бушуев. – М.: Машиностроение, 2006. – 448с.
6. Лойцянский Л. Г. Курс теоретической механики: в 2-х томах. Т. II. Динамика. – 6-е изд. перераб. и доп. / Л.Г. Лойцянский, А.И. Лурье– М.: Наука, 1983. – 640 с.
7. Трение, изнашивание и смазка. Справочник. В 2-х кн. Кн. 2./ Под ред. И.В. Крагельского и В.В. Алисина. – М.: Машиностроение, 1979. – 358 с.

REFERENCES

1. Krizhaniv'skij V. A., Kuznecov Ju. M., Valjavs'kij I.A., Skljarov R.A. Tehnologichne obladnannja z paralel'noju kinematikoju: Navchal'nij posibnik dlja VNZ. [A technological equipment is with a parallel kinematics]. Kirovograd, 2004, 449 p.
2. Kuznecov Ju.M., Dmitriev D.O., Dinevich G.Ju. Komponovka verstativ z mehanizmami paralel'noj strukturi [Arrangement of machine-tools iswith the mechanisms of parallel structure]. Herson: PP Vishnemir'skij V.S., 2009, 456 p.
3. Afoin V.L.,Podzorov P.V., Slepcov V.V. Obrabatyvajuwee oborudovanie na osnove mehanizmov paralel'noj struktury. [Processing equipment on the basis of mechanisms of parallel structure]. Moscow. Izd-vo MGTU Stankin, Janus, 2006, 452p.
4. Strutins'kij S.V. Vseukraïns'kij womisjachnij naukovu-tehničnij zhurnal “Mashinoznavstvo”. [Allukrainian monthly scientific and technical magazine engineering "Science"]. 2007. No 5. pp.37-43.
5. Bushuev V.V. Praktika konstruirovanija mashin: Spravochnik [Practice of constructing of machines]. Moscow, Mashinostroenie, 2006. 448 p.
6. Lojčjanskij L. G., Lur'e A.I. Kurs teoreticheskoj mehaniki. T. II. Dinamika. [Course of theoretical mechanics]. Moscow, Nauka, 1983, 640 p.
7. Trenie, iznashivanie i smazka. Spravochnik. V 2-h kn. Kn. 2. Podred. I.V. Kragel'skogo i V.V. Alisina. [Friction, wear and greasing]. Moscow, Mashinostroenie, 1979. 358 p.