

*В.Б. Струтинський, І.В. Перфілов*

## ОБЛАДНАННЯ ДЛЯ ВИСОКОЧАСТОТНОЇ ВІБРАЦІЙНОЇ ОБРОБКИ ДЕТАЛЕЙ МІКРОРІЗАННЯМ З ФОРМУВАННЯМ СПЕЦІАЛЬНОГО МІКРОПРОФІЛЯ ПОВЕРХНІ

Наведено результати досліджень виконаних при розробці обладнання для високочастотної вібраційної обробки деталей мікрорізнанням. Для підвищення точності обладнання запропонована спеціальна методика, яка полягає у визначенні параметрів фігур Ліссажу, що формуються приводами переміщення стола. Наведено результати дослідно-промислової апробації розробленого обладнання. Підтверджена працездатність розробленого обладнання і можливість формування спеціального мікропрофіля.

**Ключові слова:** обладнання, вібрації, мікрорізнання, п'єзоприводи, мікропрофіль.

**Вступ.** Високочастотна вібраційна обробка дає можливість одержати поверхню деталі з особливими властивостями, тому розробка обладнання для високочастотної вібраційної обробки є актуальним. Проблема в загальному вигляді полягає в забезпеченні спеціального мікропрофіля обробленої поверхні. Проблема пов'язана із важливими науковими та практичними завданнями розробки пар тертя підвищеної несучої здатності та довговічності.

В останніх дослідженнях і публікаціях наведено ряд конструкцій обладнання для обробки деталей мікрорізнанням [1, 2]. В окремих публікаціях висвітлено робочі процеси мікрорізнання фрезами малого діаметра [3]. Ряд авторів наводять результати досліджень динамічних характеристик приводів мікропереміщень вібраційного обладнання [4]. Питання точності обладнання для мікропереміщень розглянуті в статті [5] та інших.

В літературних джерелах не виявлено результатів досліджень похибок обладнання для вібраційної обробки деталей мікрорізнанням.

До невирішених раніше частин загальної проблеми відноситься розробка обладнання підвищеної точності із заданими характеристиками, призначеного для формування спеціального мікропрофіля поверхні.

Метою досліджень поставлено розробку обладнання підвищеної точності для високочастотної вібраційної обробки деталей мікрорізнанням. Задачами досліджень поставлена розробка конструкції обладнання, виготовлення та вдосконалення дослідного зразка із забезпеченням його необхідних характеристик і апробація обладнання шляхом формування спеціального мікропрофіля обробленої поверхні.

### Виклад основного матеріалу досліджень

Розроблене обладнання для високочастотної вібраційної обробки включає трьох координатний вертикально-фрезерувальний верстат, який укомплектовано двох координатним столом (рис. 1).

При обробці використані консольні (пальцеві) фрези малого діаметра (0,2 – 1,0 мм). Оброблювана деталь встановлюється на двохкоординатному

вібраційному столі, оснащеному спеціальними п'єзоприводами переміщення стола в напрямках  $x$  і  $y$ . Частота і амплітуда переміщення стола в двох напрямках регулюється спеціальною мехатронною системою керування, а закон переміщення стола корегується по результатам вимірів його положення лазерними вимірювачами.

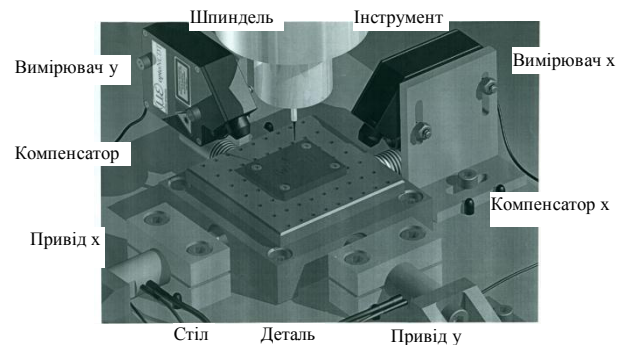


Рис. 1 - Конструктивна схема розробленого обладнання

Полоса робочих частот п'єзоприводів сягає 25 кГц і вище, при амплітудах переміщення стола в двох взаємно перпендикулярних напрямках до 0,03 мм.

Забезпечення вказаних динамічних параметрів рухомого стола здійснюється спеціальною системою пружного підвісу (рис. 2).

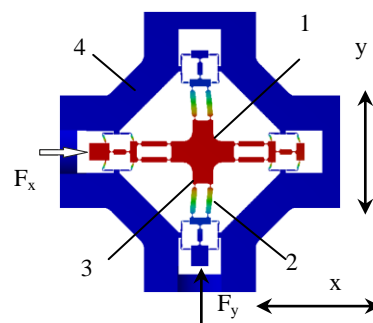


Рис. 2 – Принципова схема паралелограмного механізму пружного підвісу двохкоординатного стола

Пружний підвіс виготовлено у вигляді однієї деталі, яка має центральну частину 1 жорстко зав'язану із столом та тяги 2 із шарнірами 3, які з'єднують центральну частину із корпусом 4.

Пружний підвіс забезпечує незалежне переміщення стола в двох взаємно-перпендикулярних напрямках  $x$  і  $y$ . Конструкція підвісу дає повну розв'язку приводів переміщення стола. При цьому переміщення стола в напрямку  $x$  не впливає на переміщення стола у взаємно-перпендикулярному напрямку  $y$ . Незалежність переміщень забезпечена конструктивним виконанням паралелограмного механізму та реалізацією пружних шарнірів.

Шарніри являють собою ділянки тяг 2 із напівкруглими виборками 3 по краям (рис. 3). Шарніри забезпечують вільне переміщення центральної частини відносно нерухомого корпусу 4. Переміщення здійснюється за допомогою штоків 5, які зв'язані із п'єзоприводами.

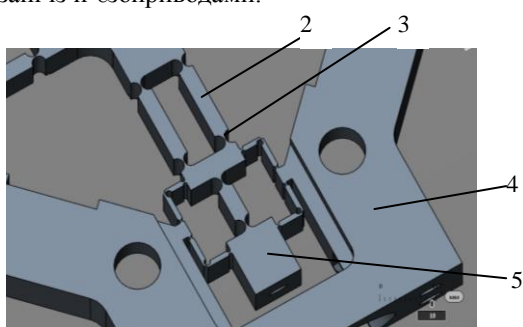


Рис. 3 - Конфігурація паралелограмного механізму стола

П'єзоприводи встановлені у двох взаємно перпендикулярних напрямках на столі (рис. 4).

Приводи через пружні зв'язки забезпечують динамічні зусилля на стіл в двох напрямках  $x$  і  $y$ . З протилежних приводом сторін стола встановлені пружні компенсатори зусилля у вигляді пружин із спеціальним регулюванням початкових зусиль.

Для забезпечення необхідних динамічних характеристик стола передбачені демпфери коливань стола.

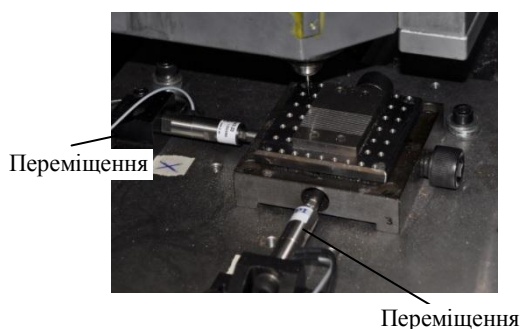


Рис. 4 - Встановлення приводів переміщення двохкоординатного стола

Демпфери коливань мають вигляд циліндрів поміщених у гільзи. При цьому зазори між циліндрами і гільзами заповнені в'язкою рідиною. Демпфери коливань забезпечують необхідний опір переміщеного стола в двох взаємно-перпендикулярних напрямках.

Приводи керуються мехатронною системою, яка включає окремі блоки та комунікації у вигляді прямих і зворотніх зв'язків (рис. 5).

Мехатронна система має набір засобів для реалізації необхідних законів переміщення стола по двох координатах.

В процесі розробки обладнання визначені його динамічні характеристики та проведена корекція системи керування з метою поліпшення параметрів динамічних характеристик. Проведені експериментальні виміри перехідних процесів в приводах без корекції (рис. 6).

По перехідній функції визначені основні параметри динамічної системи. Максимальне перерегулювання в приводі без корекції складає 60%; коливальність 6-8 коливань, а час перехідного процесу 3...4 мс. Такі показники динамічних

характеристик не є прийнятним для процесу мікрорізання. Тому проведена корекція системи керування (рис. 7).



Рис. 4 - Блок схема системи керування приводами переміщення двохкоординатного стола

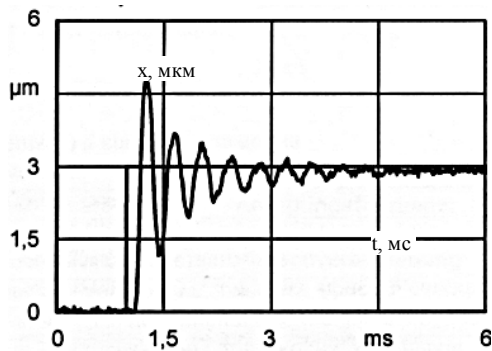


Рис. 6 - Експериментально визначена перехідна функція переміщення стола по одній із координат без корекції системи керування

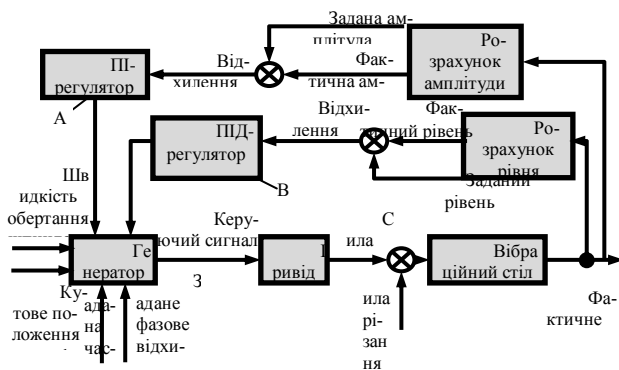


Рис. 7 - Введення корегуючих блоків А і В у мехатронну систему керування приводів переміщення стола

Корекція проведена за допомогою пропорційно інтегруючого блока (ПІ-регулятор) та пропорційно-інтегро-диференціального блока (ПІД-регулятор) [6]. Вказані блоки А і В включені в систему зворотнього зв'язку привода. Корекція в системі зворотнього зв'язку є найбільш ефективною і дозволяє суттєвим чином поліпшити динамічні характеристики системи.

Вибрані необхідні параметри корегуючих блоків та забезпечена їх працездатність в складі системи керування [7]. Після корекції проведені виміри перехідних функцій приводів переміщення стола. В результаті корекції вони набули аперіодичного характеру (рис. 8).

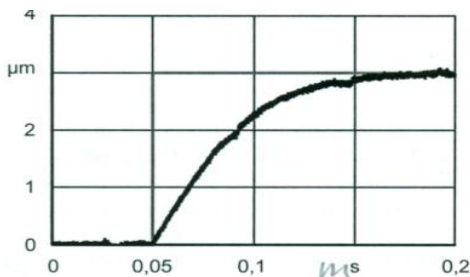


Рис. 8. Експериментально визначений перехідний процес в приводі після корекції

Встановлено, що параметри системи після корекції значно поліпшились. Час перехідного процесу

системи керування з приводами склав 0,12...0,16 мс. Таким чином проведена корекція суттєво підвищила швидкодію системи приводів і ліквідувала схильність системи до підвищеної коливальності.

В процесі розробки вібраційного стола визначено параметри динамічної точності його позиціонування. Це здійснено по спеціальній методиці засобами мехатронної системи керування. Згідно розробленої методики задавались траєкторії переміщення стола у вигляді фігур Ліссажу [8]. Базовою фігурою Ліссажу є еліпс. Він є результатом синусоїдального переміщення стола в двох взаємно перпендикулярних напрямках, але з однаковою (близькою частотою).

Фактично виміряна траєкторія переміщення стола дещо відрізняється від еліпса (рис. 9).

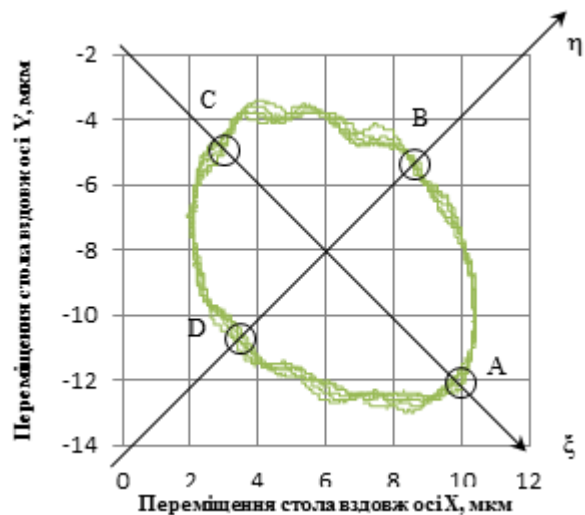


Рис. 9 - Експериментальне визначення динамічних похибок переміщення стола при типових траєкторіях руху (фігури Ліссажу) еліптичного виду

Для фактичних вимірних траєкторій руху стола розглянуті характерні перетини вимірних реалізацій еліптичних фігур Ліссажу в напрямку вісей координат  $\eta$  і  $\xi$  з центром в нульовому положенні стола. В якості характерних вибрані перетини в областях А, В, С, D, що відповідають діаметральним ділянкам еліптичної області.

В даних перетинах визначена множина координат точок перетину еліпсів із вісями координат. Вона має вигляд набору точок  $a_{Ai}$  з координатами  $\xi_{Ai}$  (рис. 10).

Набір точок перетину множини траєкторій з діаметральною площиною еліпса піддано статистичному аналізу. Знайдені математичні середні положення точок перетину в областях А, В, С і D. Вони визначені шляхом розрахунків згідно формул:

$$\xi_{mk} = \frac{1}{N} \sum_{i=1}^N \xi_{ki}, \quad k = A, C,$$

$$\eta_{m\ell} = \frac{1}{N} \sum_{i=1}^N \eta_{\ell i}, \quad \ell = B, D,$$

де  $N$  – число траєкторій еліптичного виду піддане аналізу;  $\xi_{ki}$  – координати точки перетину траєкторії із віссю координат  $\xi$ ,  $\eta_{\ell i}$  – координата точки перетину із віссю координат  $\eta$ .

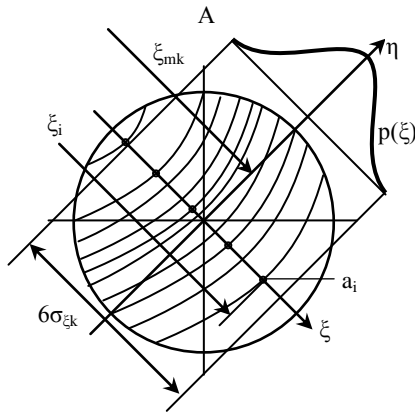


Рис. 10 – Схема статистичного аналізу еліптичних траєкторій в області А, що відповідає діаметральній ділянці еліптичної фігури Ліссажу

Математичні середні траєкторій в чотирьох областях А, В, С, D використані для аналізу розсіяння (дисперсії) значень траєкторій відносно математичних середніх. Оцінки розсіяння траєкторій в перетинах А, В, С і D визначені залежностями:

$$\sigma_{\xi k}^2 = \frac{1}{N-1} \sum_{i=1}^N (\xi_{ki} - \xi_{mk})^2, \quad k = A, C,$$

$$\sigma_{\eta \ell}^2 = \frac{1}{N-1} \sum_{i=1}^N (\eta_{\ell i} - \xi_{m\ell})^2, \quad \ell = B, D.$$

Проведена наближена оцінка випадкових змін траєкторій стола в областях А, В, С і D. По вимірним координатам точок побудовані гістограми частотей попадання точки перетину траєкторії із віссю координат у відповідний розряд (рис. 11).

По експериментально визначеним гістограмам зроблено висновок про якісні характеристики законів розподілу координат траєкторій в характерних областях. Закони розподілу є одновершинними близькими до симетричних.

По оцінкам математичних середніх і дисперсій побудовані наближені закони розподілу розташування траєкторій в перетинах.

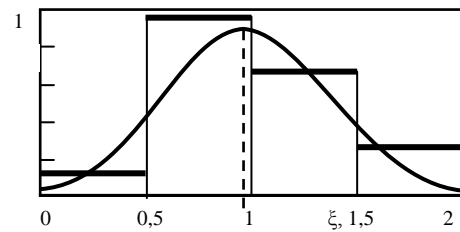
Для цього використано нормальні закони розподілу, в яких щільності ймовірності визначено у вигляді:

$$p_k(\xi) = \frac{1}{\sqrt{2\pi}\sigma_{\xi k}} e^{-\frac{(\xi_k - \xi_{mk})^2}{2\sigma_{\xi k}^2}}, \quad k = A, C,$$

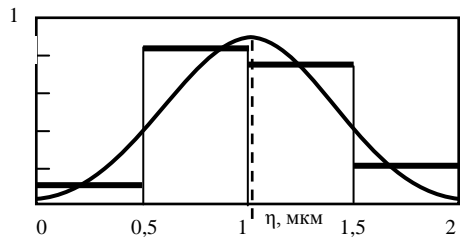
$$p_\ell(\eta) = \frac{1}{\sqrt{2\pi}\sigma_{\eta \ell}} e^{-\frac{(\eta_\ell - \eta_{m\ell})^2}{2\sigma_{\eta \ell}^2}}, \quad \ell = B, D,$$

Закони розподілу розраховані по даним залежностям відповідають експериментально визначеним. Відхилення, які спостерігаються, мають місце в області малої ймовірності значень траєкторії і не є суттєвими.

На основі знайдених статистичних характеристик встановлено область розташування фігури Ліссажу. Математичні середні послужили основою для побудови номінальної еліптичної траєкторії. Номінальна траєкторія відповідає еліпсу зміщеному відносно початку координат.



а



б

Рис. 11 - Гістограми відносної частоти точок перетину траєкторії переміщення стола в областях А і В відповідно: а – з віссю  $\xi$ , б – з віссю  $\eta$

Більша  $a$  та менша  $b$  напівосі еліпса визначено у вигляді:

$$a = \frac{1}{2}(\xi_{mA} + \xi_{mC}), \quad b = \frac{1}{2}(\xi_{mB} + \xi_{mD}).$$

Зміщення центра еліпса відносно початку координат у напрямках  $\xi$  та  $\eta$  складають:

$$\xi_C = \xi_{mA} - a, \quad \eta_C = \eta_{mC} - b.$$

Таким чином рівняння еліпса в координатах  $\xi$  та  $\eta$  набуває вигляду:

$$\frac{(\xi - \xi_C)^2}{a^2} + \frac{(\eta - \eta_C)^2}{b^2} = 1.$$

Зміщення центра еліпса відносно початку системи координат, як правило, є незначним. Тому можна прийняти  $\xi_C \approx 0$ ,  $\eta_C \approx 0$  і визначити рівняння еліпса у вигляді:

$$\xi^2 / a^2 + \eta^2 / b^2 = 1.$$

Одержані параметри визначають фактичний зсув фаз між переміщеннями стола у двох напрямках:

$$\varphi = 2 \arctg b/a.$$

Дане значення використане для уточнення фактичних параметрів приводів. Вимірні відхилення траєкторій від еліпса є мірою оцінки динамічної похибки позиціонування стола. В результаті визначена систематична складова динамічної похибки, яка використана для корекції положення стола в системі ЧПК [9].

Розроблене обладнання застосовано при обробці деталей з метою формування спеціального мікропрофіля поверхні. Обробка ділянок деталі здійснена малорозмірною кінцевою фрезою (рис. 12).

Одержаний мікропрофіль має спеціальний мікрорельєф, який формується відповідним алгоритмом системи ЧПК. Типові різновиди спеціального мікропрофіля реалізовані в процесі обробки включають зигзагоподібні та віяльні поверхні (рис. 13).

В результаті обробки підтверджена можливість формування спеціального мікропрофіля, що є пози-

тивним результатом апробації розробленого обладнання.

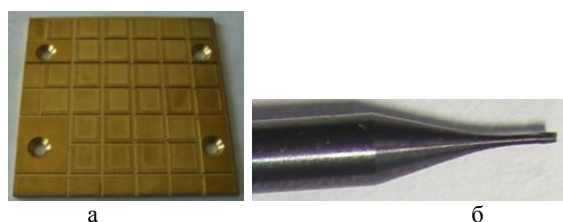


Рис. 12 - Заготовка з ділянками обробки мікрофрезеруванням та фреза діаметром 0,5 мм, яка використана в процесі обробки: а – заготовка, б – інструмент

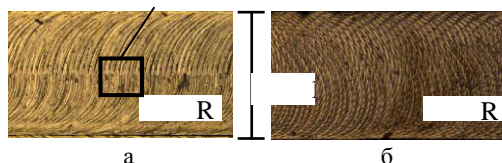


Рис. 13 - Типові спеціальні мікропрофілі поверхні сформовано шляхом обробки деталей на розробленому обладнанні: а – мікропрофіль із зигзагоподібними виступами і впадинами; б – система виступів віяльного виду сформована на обробленій поверхні

#### Висновки

1. Підтвержена можливість створення обладнання для високочастотної вібраційної обробки деталей мікрорізанням на частотах до 25 кГц з амплітудами вібрацій до 0,03 мм. Це досягається використанням п'єзоприводів стола, який встановлено на пружному підвісі паралелограмного виду.

2. Для надійної роботи системи керування необхідна корекція системи введення ПІ-регулятора та ПІД-регулятора в систему зворотнього зв'язку. При цьому швидкодія приводів підвищується до 0,12...0,16 мс і виключається коливальність перехідних процесів приводів.

3. Аналіз точності розробленого обладнання доцільно проводити на основі експериментальних вимірів переміщення стола відповідно реалізації фігури Ліссажу еліптичного типу. При вимірах встановлюється середнє значення вісей еліпса та відхилення від середнього значення у двох взаємно перпендикулярних напрямках. Встановлено, що закон розсіяння траєкторії близький до нормального, а характеристика розсіяння траєкторій мало змінюються по периметру еліпса.

4. Результати обробки деталей на розробленому обладнанні підтвердили надійність його роботи і високу точність. Обладнання дає можливість формувати спеціальний мікропрофіль поверхні. Сформульовано мікрорельєф поверхні у вигляді петлеподібних та зигзагоподібних виступів і впадин та мікропрофіль із віяльною схемою розташування виступів.

5. Як напрямок подальших досліджень рекомендується розробити метод аналізу характеристик одержаного мікропрофіля та дати рекомендації по застосуванні деталей із спеціальним мікропрофілем в парах рідинного тертя.

**Список літератури:** 1. Xinhua Long Active vibration control for peripheral milling processes [Text] / Xinhua Long, Hao Jiang, Guahg Meng // Journal of Materials Processing Technology 213 (2013). - pp. 660-670. 2. Wadikhaye, S.P. Design of a compact serial-kinematic scanner for high-speed atomic force microscopy an analytical approach [Text] / Wadikhaye, S.P., Yong, Y.K, Moheimani, S.O.R. // Published in Micro & Nano Letters, 2012. - Vol.7. - pp. 309-313. 3. Gwo-Liang Chern, Yuan-Chin Chang Using two-dimensional vibration cutting for micro-milling [Text] / Gwo-Liang Chern, Yuan-Chin Chang // International Journal of Machine Tools & Manufacture 46 (2006). - pp. 659-666. 4. Elfizy, A.T. Design and control of a dual-stage feed drive [Text] / Elfizy, A.T., Bone, G.M., Elbestawi, M.A. // International Journal of Machine Tools & Manufacture 45 (2005). - pp. 153-165. 5. Shorya Awtar Design of a large range XY nanopositioning system [Text] / Shorya Awtar, Gaurav Parmar // Proceeding of the ASME 2010 International Design Engineering Technical Conferences & Computers and Information in Engineering Conference IDETC/CIE 2010, August 15-18, 2010, Montreal, Quebec, Canada. - pp. 170-175. 6. Бесеєрський, В.А. Теорія систем автоматического регулювання [Текст] / Бесеєрський, В.А., Попов, Е.П. // М.: Наука, 1972. - 768 с. 7. Черкашенко, М.В. Метод логического проектирования дискретных систем управления машин-автоматов с пневмо- или гидроприводом. Пневматика и гидравлика. Приводы и системы управления [Текст] / Черкашенко, М.В. // М.: Машиностроение, 1981. Вып. 8. - С. 181-189. 8. Мэнли, Р. Анализ и обработка записей колебаний / Мэнли, Р. // - М.: Машиностроение, 1972. - 368 с. 9. Крацов, Н.В. Технологические особенности обработки крупномодульных закаленных зубчатых колес [Текст] / Крацов, Н.В., Тимофеев, Ю.В., Ключко, А.А. [и др.]; Науч. ред. Пермяков, А.А. // ВолГТУ – Тольятти: ЗАО «ОНИКС», 2012 – 254 с.

**Bibliography (transliterated):** 1. Xinhua Long Active vibration control for peripheral milling processes [Text] Xinhua Long, Hao Jiang, Guahg Meng Journal of Materials Processing Technology 213 (2013). - pp. 660-670. Print 2. Wadikhaye, S.P. Design of a compact serial-kinematic scanner for high-speed atomic force microscopy an analytical approach [Text]. Wadikhaye, S.P., Yong, Y.K, Moheimani, S.O.R./ Published in Micro & Nano Letters, 2012. - Vol.7. - pp. 309-313. Print 3. Gwo-Liang Chern, Yuan-Chin Chang Using two-dimensional vibration cutting for micro-milling [Text]. Gwo-Liang Chern, Yuan-Chin Chang. International Journal of Machine Tools & Manufacture 46 (2006). - pp. 659-666. Print 4. Elfizy, A.T. Design and control of a dual-stage feed drive [Text] Elfizy, A.T., Bone, G.M., Elbestawi, M.A. International Journal of Machine Tools & Manufacture 45 (2005). - pp. 153-165. Print 5. Shorya Awtar Design of a large range XY nanopositioning system [Text] Shorya Awtar, Gaurav Parmar. Proceeding of the ASME 2010 International Design Engineering Technical Conferences & Computers and Information in Engineering Conference IDETC/CIE 2010, August 15-18, 2010, Montreal, Quebec, Canada. - pp. 170-175. Print 6. Besekerskij, V.A., Popov, E.P. Teorija sistem avtomaticheskogo regulirovanija Moscow: Nauka, 1972. 768 p. Print 7. Cherkashenko, M.V. Metod logicheskogo proektirovanija diskretnykh sistem upravlenija mashin-avtomatov s pnevmo- ili gidroprivodom. Pnevmatika i gidravlika. Privody i sistemy upravlenija. Moscow: Mashinostroenie, 1981. pp.181-189. Print 8. Mjenli, R. Analiz i obrabotka zapisej kolebanij Moscow: Mashinostroenie, 1972. 368 p. Print 9. Kravcov, N.V., Timofeev, Ju.V., Klochko, A.A. [i dr.]; Nauch. red. Permjakov, A.A. Tehnologicheskie osobennosti obrabotki krupnomodul'nyh zakalennyh zubchatyh koles. VolGTU – Tol'jatti: ZAO «ONIKS», 2012. 254 p. Print.

Поступила (received) 21.02.2015

**Струтинський Василь Борисович** – док. техн. наук, проф., зав. кафедри конструювання верстатів та машин, НТУУ «КПІ», Київ; тел.: (044)- 454-94-61, e-mail: kvm\_mmi@mail.ru;

**Перфілов Іван Васильович** – аспірант НТУУ «КПІ», Київ; тел.: (044)- 454-94-61.