

УДК 621.91.015-185-531.7

В.О. Залога, д-р техн. наук, Р.М. Зінченко, канд. техн. наук,  
Ю.В. Шаповал, Суми, Україна

## **ПІДВИЩЕННЯ СТАБІЛЬНОСТІ ПРОЦЕСУ РІЗАННЯ ШЛЯХОМ ЗМІНИ ШВИДКОСТІ РІЗАННЯ В ПРОЦЕСІ ОБРОБКИ**

*В даній статті проаналізовано можливість підвищення вібростійкості процесу різання при точінні за рахунок керування швидкістю різання в процесі обробки. Розроблено методику дослідження вібраційних процесів при точінні. В результаті обробки експериментальних даних встановлено, що при накладенні коливної руху на обертання шпинделя зменшується загальний рівень коливань по всій довжині спектру, що відображається на якості обробленої поверхні.*

*В данной статье проанализирована возможность повышения виброустойчивости процесса резания при точении за счет управления скоростью резания в процессе обработки. Разработана методика исследования вибрации при точении. В результате обработки экспериментальных данных установлено, что при наложении колебательного движения на вращение шпинделя уменьшается общий уровень колебаний по всей длине спектра, что отражается на качестве обработанной поверхности.*

*This article examines the possibility of increasing vibration in cutting process in turning control by cutting speed in processing. A technique for examining the vibration when turning processes. As a result of experimental data revealed that the imposition of the vibrational motion in spindle decreases the overall level fluctuations along the entire length of the spectrum, as shown on the treated surface.*

При обробці металів різанням відомі як позитивні, так і негативні дії коливань, - як тих, що виникають в технологічній системі безпосередньо в процесі різання (автоколивань), так і вимушених, що спеціально вводяться в зону різання [1]. З одного боку, при певних амплітудах й частотах ці коливання можуть призводити до покращення процесу руйнування й відділення від заготовки зрізаного шару та зменшення інтенсивності зношування інструменту і підвищенню його стійкості за рахунок: полегшення пластичної деформації, зменшення коефіцієнта тертя на передній і задніх поверхнях леза інструменту, покращенню відведення стружки, помітного зниження сил різання і виділення тепла, зменшення адгезійних явищ тощо [2-5]. З іншого боку, циклічне навантаження інструменту, що обов'язково супроводжує процес різання при наявності вібрацій, може викликати, як правило, при збільшених амплітудах коливань, втомне руйнування тих ділянок різальних кромek інструменту, що знаходяться в контактi зі зрізуваним шаром, стружкою та поверхнями на оброблюваній деталі (заготовці). Тому при перевищенні деякого граничного значення амплітуди коливань починає швидко підвищується інтенсивність зношування

інструменту і, відповідно, знижуватися його стійкість [1-5]. Цьому сприяє і суттєве збільшення довжини шляху, який проходить інструмент у контакті зі стружкою і поверхнями на оброблюваній деталі [1]. Крім того, при збільшенні амплітуди коливань погіршується (збільшується) шорсткість обробленої поверхні. Слід зазначити, що при чистовій обробці будь-яких матеріалів будь-які коливання у технологічній системі мають негативний вплив на якість поверхні. Одним з ефективних напрямків управління вібраційними процесами при механічній обробці є зміна швидкості різання. Метою даної роботи є розробка методики управління вібростійкістю інструменту при точінні шляхом зміни швидкості різання.

Відомо [2], що одним з найбільш перспективних методів керування стабільністю (вібростійкістю) процесу точіння є зміна частоти обертання шпинделя. Для дослідження впливу зміни швидкості головного руху на вібрації при точінні на базі токарного верстату 16К20 з ЧПК розроблено експериментальний стенд (рис.1).

Експериментальний стенд оснащений датчиками обертів шпинделя, вібрацій, току та напруги силового перетворювача приводу головного руху, за допомогою яких можна вимірювати миттєву потужність двигуна та оцінювати зміну крутного моменту.

За допомогою модулятора (рис. 1) сигнал завдання, який подається системою числового програмного керування (ЧПК), перетворюється за синусоїдальним законом, причому амплітуду та частоту коливань можна змінювати (рис. 2).

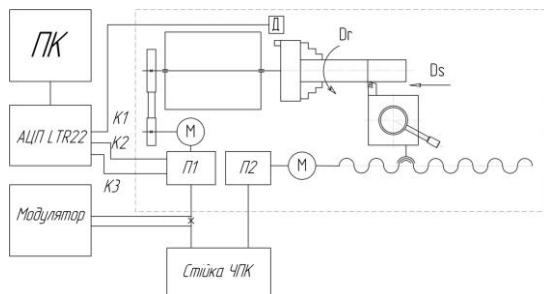


Рисунок 1 – Схема експериментального стенду для змінювання швидкості головного руху при точінні:

ПК – персональний комп'ютер, АЦП – аналогово-цифровий перетворювач, Модулятор – перетворювач сигналу завдання приводу головного руху по синусоїдальному закону, П1 – силовий перетворювач приводу головного руху, П2 – силовий перетворювач приводу подач, Д – індуктивний датчик Balluff 516-324, К1 – канал підключення БВК, К2 – канал підключення датчика току силового перетворювача, К3 – канал підключення датчика напруги якоря двигуна

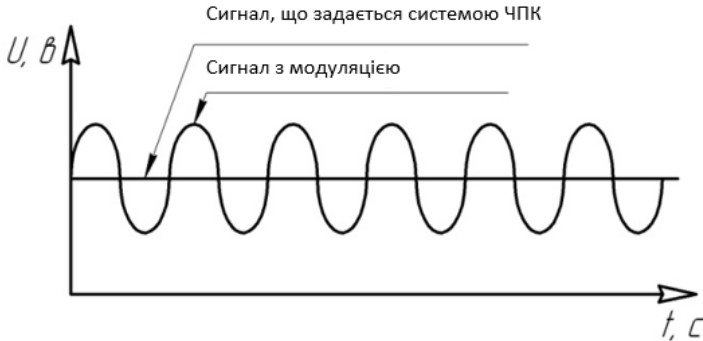


Рисунок 2 – Перетворення сигналу завдання модулятором

Принцип роботи експериментального стенду полягає в наступному. Вібрація, що генерується в системі «верстат - інструмент – деталь», реєструється датчиком і у вигляді аналогового сигналу передається на АЦП, який в свою чергу перетворює сигнал в цифровий вигляд і передає на комп'ютер. Далі за допомогою розробленої авторами програмою проводиться обробка даних, в ході якої будуються спектри сигналів і розраховується потужність вібраційного сигналу. Блок - схема розрахунку представлена на рис. 3.



Рисунок 3 – Блок-схема обробки сигналу

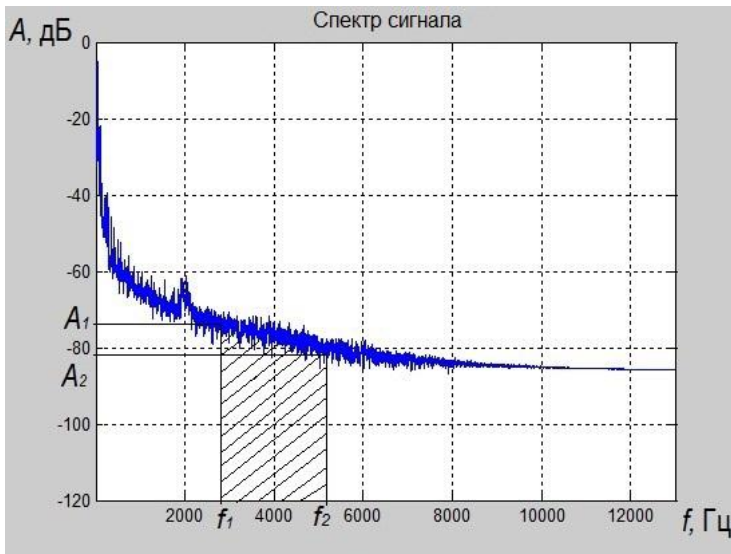


Рисунок 4 – Графічна інтерпретація потужності вібраційного сигналу

Потужність вібраційного сигналу - це інтегральна характеристика спектра, що обчислюється за формулою:

$$E = \int_{f_1}^{f_2} A(f) df. \quad (1)$$

Графічно це не що інше, як площа фігури, обмежена кривою між точками  $A_1$  та  $A_2$  (рис. 4), які відповідають потужностям вібраційних сигналів у системі, і прямими, що відповідають частотам  $f_1$  та  $f_2$  (ділянкам тимчасового інтервалу), отриманих методом швидкого перетворення Фур'є.

На аналогово-цифровий перетворювач від датчика струму Ш-40-0,02 і дільника напруги подається сигнал який перетворюється в цифровий вигляд і передається на вхід в комп'ютер.

Для дослідження вібростійкості процесу точіння розроблено з використанням індуктивного датчика Balluff BES 516-324 [6] методику визначення реальної у даний час частоти обертання шпинделя, алгоритм якої зображено на рис.5.

Для перевірки даної методики змінювали частоту обертання шпинделя, а також частоту та амплітуду коливання швидкості обертання.

**Методика визначення фактичної частоти обертання шпинделя**

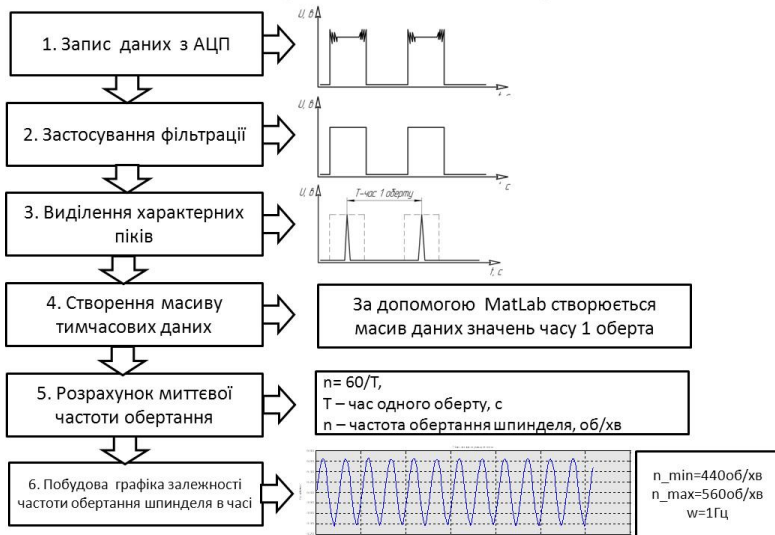


Рисунок 5 – Алгоритм визначення реальної частоти обертання шпинделя

За допомогою АЦП сигнали всіх датчиків оцифровуються та передаються на персональний комп'ютер. За допомогою програми MathLab розраховується миттєве значення швидкості обертання та будуються відповідні графіки.

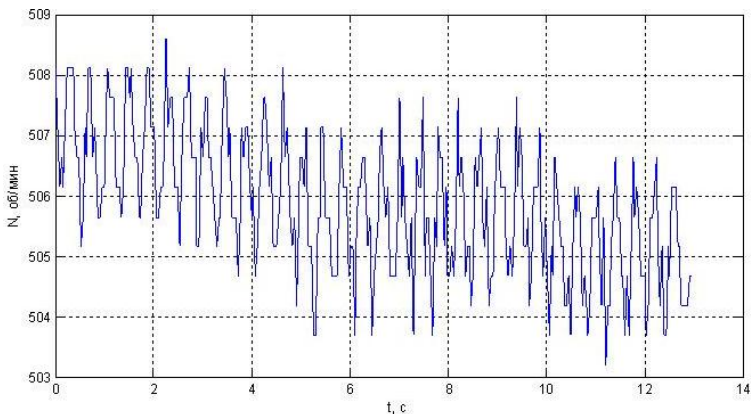


Рисунок 6 – Швидкість обертання шпинделя без модуляції заданої частоти

На рис. 6 зображений графік зміни частоти обертання в часі без використання модулятора. На графіку можна побачити незначні коливання частоти обертання шпинделя під час роботи силового перетворювача головного приводу.

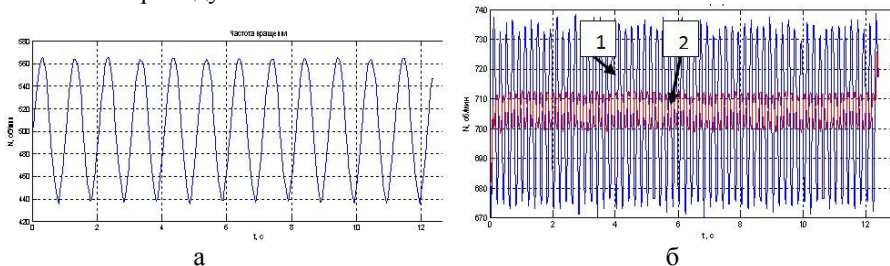


Рисунок 7– Модуляція частоти обертання при:  
 $n = 500$  об/мин;  $\omega = 1$  Гц (а) та  $n = 700$  об/мин;  $\omega = 5$  Гц (б)

На рис. 7 показано промодульовані частоти обертання шпинделя при різних несучих частотах обертів, амплітудах та частотах модуляції. На рисунках: 1 - частоту обертання шпинделю по датчику; 2 – усереднена лінія по методу застосування вікна «ковзного середнього» (розмір вікна 10 точок). Таким чином з рис. 7 видно, що за допомогою розробленої методики можна змінювати реальну частоту обертання шпинделя за синусоїдальним законом.

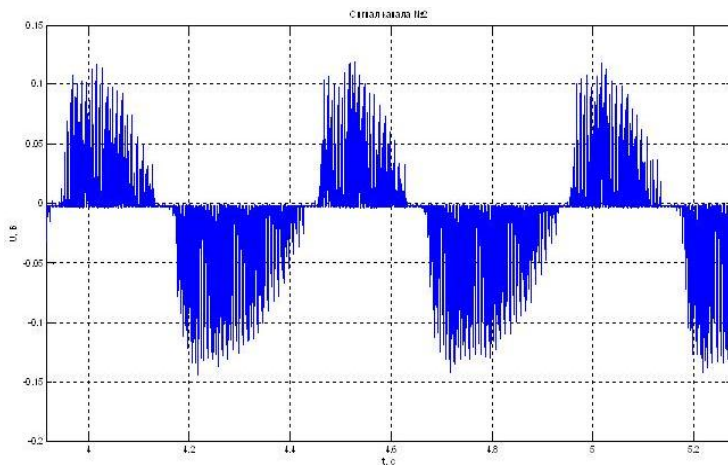


Рисунок 8 – Динаміка роботи силового перетворювача приводу головного руху під час коливального обертання

На рис. 8 показано динаміку роботи силового перетворювача приводу головного руху. Графік відображає зміну значення функції, яка пропорційна крутному моменту головного двигуна. З графіка видно, що без навантаження верстата різанням розгін і гальмування шпинделя відбувається за рахунок реверсу полярності на якорі головного двигуна.

Для дослідження вібростійкості процесу точіння було розроблено методику, алгоритм практичної реалізації якої представлено на рис. 9: спочатку проводиться налагодження верстата і встановлення режимів обробки (подача, глибина різання, частота обертання шпинделя у відповідності з потрібною швидкістю різання); проводиться експеримент із фіксацією даних з давача вібрації та давача обертів шпинделю послідовно для обробки із модуляцією частоти обертання та без модуляції; обробка даних за розробленими методиками і побудова спектрів та графіків, які характеризують процес обробки; оцінювання рівня вібрацій при ввімкненій та вимкненій модуляції; оцінювання якості обробки поверхні шляхом порівняння зі зразки (шаблонами) шорсткості.

Дана методика була перевірена експериментально. Дослідження проводилися в два паралельні етапи. На першому етапі проводилась реєстрація сигналу без модуляції і відразу, не зупиняючи процес різання, проводився запис сигналу із модуляцією. При цьому в якості оброблюваного матеріалу використовувалася загартована сталь 40X (твердість HRC 52-57). Різець - PDJNR2525P15. Ріжуча пластина (рис.10) - DNMG150608 (виробництво SANDVIK Coromant), матеріал пластини - сплав CT35M.

У якості режимів обробки використовували перебором наступні значення: подачі – 0.15, 0.3, 0.4, 0.5 мм/об; глибини різання – 0.1, 0.5, 1 мм; частоти обертання шпинделю – 250, 300, 500 об/хв. Діаметр оброблюваної поверхні – 60мм. Коливальні процеси фіксувались за допомогою вібраційного датчика 8 (рис.2) та записувались на два канали: канал 1 – коливання в напрямі від передньої бабки до задньої; канал 2 – вгору – вниз у головній січній площині.

Результати проведених експериментів оброблялись за розробленою методикою і будувались відповідні графіки спектрів. Всі дослідження проводились із модуляцією частоти обертання шпинделя 10 Гц. Для наглядності і забезпечення можливості порівняння отриманих графіків спектрів за допомогою операції зменшення прозорості у програмному продукті Photoshop виконано накладення одне на одного зображень спектрів, отриманих з модуляцією та без неї. Приклади отриманих графіків наведено на рис.11 та 12.



Рисунок 9 – Методика досліджень вібростійкості процесу точіння



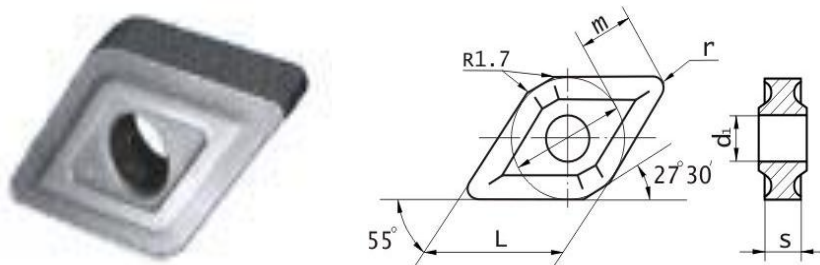


Рисунок 10 – Ріжуча пластина

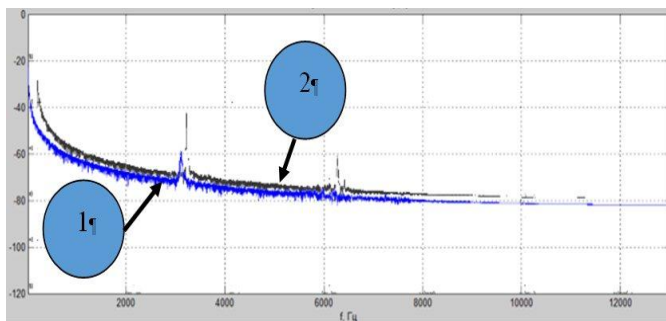


Рисунок 11 – Порівняння спектрів із модуляцією (1) та без модуляції (2) при:  
S-0.5 мм/об; n – 300 об/хв; t – 0.5 мм; канал 2

Аналіз результатів, отриманих за запропонованим алгоритмом, показав, що при накладенні модуляції виникають два варіанти: по-перше, зменшується загальний рівень коливань при модуляції в середньому на 5дБ по всій довжині спектру; по-друге, в середньому зменшується амплітуда як піків на 20дБ (рис. 12, поз.1 та 2) так і коливань по всьому спектру на 5-10дБ (рис.12, поз. 4). Встановлено також і той факт, що, чим більший рівень звуку при у процесі різання (тобто є «писк»), тим більшою є різниця між спектрами вібрацій до та після модуляції.

Результати проведених досліджень показали, що процес модуляції суттєво впливає на якість (шорсткість) обробленої поверхні. На рис.13, представлено фотографію обробленої поверхні без модуляції і з ввімкненою модуляцією.

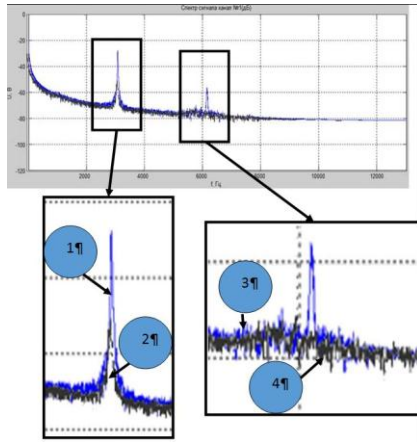
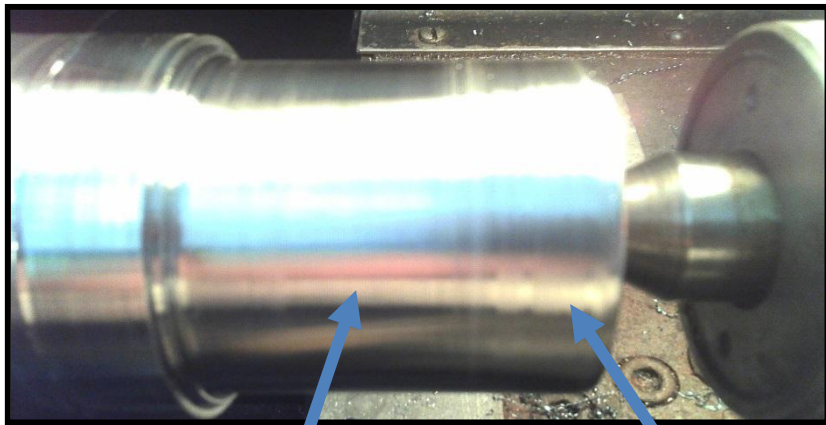


Рисунок 12 – Порівняння спектрів із модуляцією (2) та без модуляції (1) при:  
 $S=0.5\text{мм/об}$ ;  $n=300\text{об/хв}$ ;  $t=0.5\text{мм}$ ; канал 1



З модуляцією

Без модуляції

Рисунок 13 – Фотографія обробленої поверхні

Як видно з фотографії, оброблена поверхня без використання коливального руху деталі має ризки та хвилясту поверхню. Поверхня, яка оброблена з промодульованим сигналом заданої частоти руху головного двигуна не має цих дефектів.

### **Висновки**

1. На базі токарного верстата з ЧПК розроблено експериментальний стенд, оснащений модулятором та первинними датчиками обертів шпинделя, току та напруги силового перетворювача приводу головного руху, вібрацій. За допомогою модулятора сигнал, який подається системою числового програмного керування, перетворюється за синусоїдальним законом, причому амплітуду та частоту коливань можна змінювати.

2. Для дослідження вібростійкості процесу точіння розроблено методику визначення реальної частоти обертання шпинделя, яка включає в себе: зчитування даних, примінення фільтрації, виділення характерних піків, створення масиву часових даних, розрахунок миттєвої частоти обертання шпинделю.

3. Розроблені методики дозволили виконати аналіз динамічного стану системи у процесі роботи силового перетворювача приводу головного руху. Експериментально підтверджено, що зміна значення функції потужності вібраційного сигналу пропорційна крутному моменту головного двигуна, а саме: без навантаження верстата різанням, розгін і гальмування шпинделя відбувається за рахунок реверсу полярності на якорі головного двигуна.

4. Розроблено методику дослідження вібраційних процесів за наступним алгоритмом: проводиться налагодження верстата і встановлення режимів оброблення (подача, глибина різання, швидкість різання – частота обертання шпинделю); проводиться експеримент із фіксацією даних з датчиків вібрацій та обертів шпинделю послідовно для обробки із модуляцією частоти обертання та без модуляції; обробка даних за розробленими методиками і побудова спектрів та графіків, які характеризують процес обробки; оцінювання рівню вібрацій при ввімкненій та вимкненій модуляції; оцінювання якості обробленої поверхні по зразкам (шаблонам) шорсткості.

5. В результаті обробки експериментальних даних встановлено, що при накладенні модуляції виникають два варіанти: перший – зменшується амплітуда коливань як по всьому спектру (у середньому на 5-10 дБ), так і деяких піків (у середньому на 20 дБ); другий – зменшується загальний рівень коливань по всій довжині спектру в середньому на 5дБ.

**Список використаних джерел:** 1. *Жарков И. Г.* Вибрации при обработке лезвийным инструментом / И. Г. Жарков. – Л.: Машиностроение, 1986. – 184 с. 2. *Кудинов В. А.* Динамика станков / В. А. Кудинов. – М.: Машиностроение, 1967. – 367 с. 3. *Тлустьй И.* Автоколебания в металлорежущих станках / И. Тлустьй. – М.: Машгиз, 1956. – 359 с. 4. *Ташлицкий Н.И.*

Первичный источник энергии возбуждения автоколебаний при резании металлов / Н. И. Ташлицкий // Вестник машиностроения. – 1960. – № 2. – С. 10–20. 5. Кучугуров М.В., Внуков Ю.Н., Дядя С.И., Способ и устройство для исследования регенеративных автоколебаний при точении / М. В. Кучугуров, Ю. Н. Внуков, С. И. Дядя. // Резание и инструмент в технологических системах. – 2013. – №83. – С.42-54. 6. Каталог Бесконтактных датчиков BALLUFF [Электронный ресурс]. – URL: <http://westsidedelivers.com/BALLUFF-BES516324S4C.asp>

**Bibliography (transliterated):** 1. Zharkov I. G. Vibracii pri obrabotke lezviynym instrumentom / I. G. Zharkov. – L.: Mashinostroenie, 1986. – 184 c. 2. Kudinov V. A. Dinamika stankov / V. A. Kudinov. – M.: Mashinostroenie, 1967. – 367 c. 3. Tlustyj I. Avtokolebanija v metallorezhushhiih stankah / I. Tlustyj. – M.: Mashgiz, 1956. – 359 c. 4. Tashlickij N.I. Pervichnyj istochnik jenerгии возбужdenija avtokolebanij pri rezanii metallov / N. I. Tashlickij // Vestnik mashinostroenija. – 1960. – № 2. – С. 10–20. 5. Kuchugurov M.V., Vnukov Ju.N., Djadja S.I., Sposob i ustrojstvo dlja issledovanija regenerativnyh avtokolebanij pri tochenii / M. V. Kuchugurov, Ju. N. Vnukov, S. I. Djadja. // Rezanie i instrument v tehnologicheskikh sistemah. – 2013. – №83. – S.42-54. 6. Katalog Beskontaknyh datchikov BALLUFF [Jelektronnyj resurs]. – URL: <http://westsidedelivers.com/BALLUFF-BES516324S4C.asp>

*Надійшла до редколегії 23.12.2014*