

1. Калюжнюк М.М. Рудь В.К. *Сваебойные работы при реконструкции: (Влияние колебаний на здания и сооружения)*. – Л., 1989. 2. ВСН 490-87. *Проектирование и устройство свайных фундаментов и шпунтовых ограждений в условиях реконструкции промышленных предприятий и городской застройки*, М., 1988. 3. *Фундаменти будівель і споруд: Довід. Посібник* Ю.Л. Винников, В.А. Муха, А.В. Яковлев та ін. – К., 2002. 4. ДСН 3.3.6.039-99. *Державні санітарні норми виробничої загальної та локальної вібрації*.

УДК 621.314:621.396.66

І.Ю. ІСАЄВ¹, І.Б. КРАВЕЦЬ¹, Г.Т. ЧЕРЧИК¹, І.М. ЯВОРСЬКИЙ^{1,2}

¹Фізико-механічний інститут ім. Г.В.Карпенка НАН України, м. Львів,

²Institute of Telecommunications, University of Technology and Agriculture, Bydgoszcz, Poland

ДОСЛІДЖЕННЯ РЕГУЛЯРНОЇ ТА ВИПАДКОВОЇ СКЛАДОВИХ СИГНАЛУ ВІБРАЦІЇ ПІДШИПНИКА КОЧЕННЯ

© Ісаєв І.Ю., Кравець І.Б., Черчик Г.Т., Яворський І.М., 2006

Виконано відбір вібраційних сигналів бездефектного і дефектного підшипників кочення на механічному випробувально-діагностичному стенді. Запропоновано нестационарну модель сигналів вібрації у вигляді адитивної суми регулярної та випадкової складових.

Здійснено аналіз випадкової складової і показано, що в ній не містяться приховані періодичності. Це дає змогу виявляти дефекти підшипника кочення лише за регулярною складовою вібраційних сигналів.

Vibration signals sampling for ideal and faulty frictionless bearings are fulfilled on the basis of mechanical diagnostic test bench. Non-stationary model for vibration signals in the form of regular and random components additional sum is suggested. Analysis for model random component is carried out. Absence of hidden periodicities in the random component is shown. This result allows us to carry out frictionless bearing defect identification only on the basis of regular component.

Вібрації, що виникають в роботі механізмів обертової дії, переважно генеруються через наявність у системі дефектів монтажу, неспіввісності та дисбалансу, що призводять до порушення внутрішньої геометрії підшипникового вузла і розвитку пошкоджень на внутрішній та зовнішній доріжках, тілах кочення та сепараторі. Сили, що виникають внаслідок розвитку пошкоджень поверхні і складових частин підшипника, мають як регулярний, так і випадковий характер, що проявляються у мультитопіковості стаціонарної спектральної густини та характерній формі кореляційної функції. Здійснити розділення регулярної та випадкової складових сигналів вібрації у межах моделі стаціонарних випадкових процесів не видається можливим [1–3], тому необхідно використовувати адекватні нестационарні імовірнісні моделі [4–7].

Моделі періодично та майже-періодично корельованих випадкових процесів (ПКВП та МПКВП відповідно) описують як регулярні, періодичні коливання, так і випадкові, стохастичні зміни у характері коливань [2,3]. Математичне сподівання ПКВП та МПКВП описує детерміновану складову вібрації механічної системи, а коефіцієнти m_k є параметрами форми цієї складової.

$$m(t+T) = m(t) = \sum_{i=-\infty}^{\infty} m_k e^{ik\omega_0 t}, \quad \omega_0 = 2\pi/T.$$

Кореляційна функція описує періодичну мінливість за часом t кореляційних зв'язків між віддаленими на інтервал u значеннями флукуаційної складової вібрації, причому дисперсія $D(t) = b(t, 0)$ визначає потужність цих флукуацій.

$$b(t + T, u) = b(t, u) = \sum_{k=-\infty}^{\infty} B_k(u) e^{ik\omega_0 t}.$$

Дослідження регулярної та випадкової складових сигналів вібрації, отриманих від підшипників кочення і є метою цієї роботи.

Частотні методи виявлення дефектів підшипників кочення. У вібраційному сигналі і на графіках його стаціонарної спектральної густини наявні характерні ознаки дефектів підшипників кочення, залежні від типу дефекту. Найчастіше дефекти проявляються у вигляді несинхронних піків спектральної густини, неkratних частоті обертання ротора. В часовому сигналі наявні ударні імпульси, що виникають завдяки контакту тіл кочення з дефектами доріжок підшипника і сепаратора або доріжок з дефектами тіл кочення.

Підшипники кочення мають власні частоти прояви дефектів, що залежні від геометричних розмірів підшипника. Ці частоти розраховують для внутрішньої та зовнішньої доріжок, сепаратора, шарикових чи роликових елементів.

Дефекти монтажу і неспіввісності вала ротора і підшипника на ранніх стадіях проявляються за наявності частот, кратних основній частоті обертання. Перекося призводять до підвищення навантаження на підшипник і подальшого прискореного зношення. Розвиток дефектів призводить до появи гармонік власних частот підшипника спочатку у високочастотному діапазоні і поступовому зсуві високочастотних піків в діапазон низьких частот [8]. Одночасно зростає потужність основних піків спектральної густини.

Час роботи підшипника з дефектом багато в чому залежить від частоти обертання ротора. Для невисоких частот обертання підшипник з викришуванням і розшаруванням металевої поверхні доріжок може експлуатуватися достатньо довгий час, що недопустимо для підшипників, що експлуатуються за високих частот обертання.

При описанні вібраційних сигналів моделями ПКВП і МПКВП, їхні імовірнісні характеристики – математичне сподівання, кореляційна функція, спектральна густина та їхні компоненти – добре пристосовуються для ідентифікації характеру зміни гармонічних складових прихованих періодичностей. Дефекти механізмів можуть проявлятися як в появі нових гармонічних складових, так і в їхній модуляції. Характеристики ПКВП є носіями інформації про подібні зміни. Тому вони можуть бути використані при діагностиці як безпосередньо, так і при формуванні певних діагностичних ознак.

Багатоканальна система збирання й обробки сигналів вібрації. Для використання результатів теоретичних і експериментальних досліджень була створена багатоканальна система збирання й обробки сигналів вібрації в комплекті з механічним випробувально-діагностичним стендом. Функціональна схема системи збирання та обробки сигналів вібрації показана на рис. 1. До її складу входять давачі вібрації і температури з вихідними підсилювачами, лінії передачі сигналів, вхідні узгоджуючі підсилювачі, фільтри Бесселя, вихідні узгоджувальні підсилювачі з регульованим коефіцієнтом підсилення, багатоканальний аналогово-цифровий перетворювач (АЦП), контролер керування АЦП і зв'язку з персональним портативним комп'ютером (ПК), ПК, осцилограф.

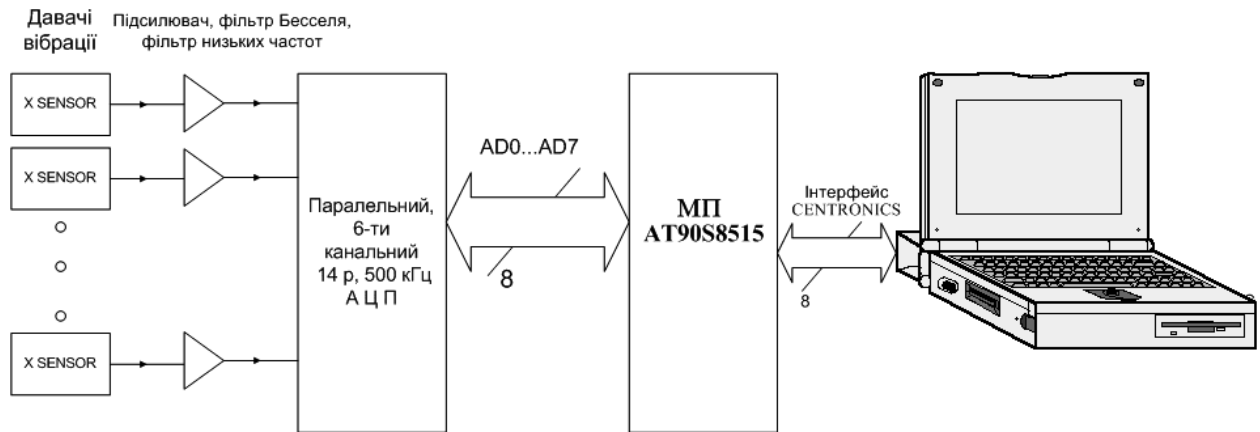


Рис. 1. Портативна система збирання та обробки вібраційних сигналів

Аналіз стаціонарного наближення сигналів вібрації. На рис. 2-3 показано стаціонарне наближення спектральної густини сигналу вібропришвидження (mV/g) бездефектного та дефектного підшипника кочення, отриманих за допомогою розроблених вібростенда та системи збирання та обробки вібраційних сигналів. Параметри відбору сигналів: частота дискретизації – 20кГц, частота зрізу низькочастотного фільтра – 10 кГц, час відбору сигналу – 10 с, частота обертання ротора – 2934 об/хв.

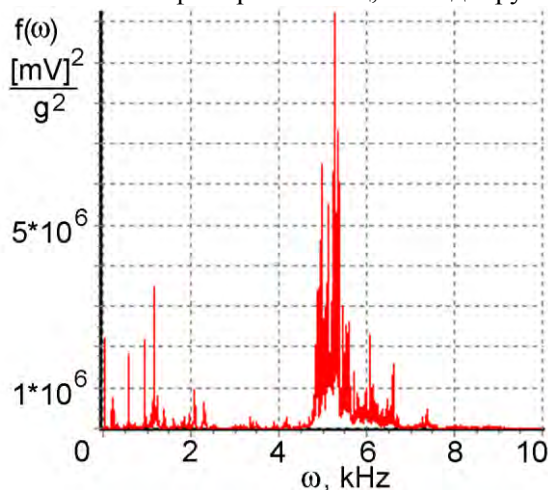


Рис. 2. Спектральна густина стаціонарного наближення вібраційного сигналу дефектного підшипника 6205RS

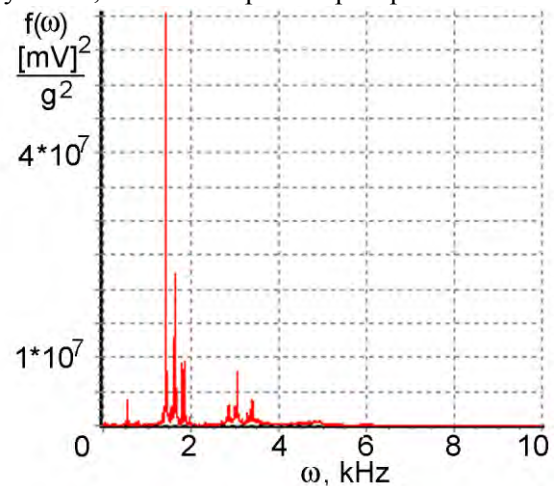


Рис. 3. Спектральна густина стаціонарного наближення вібраційного сигналу бездефектного підшипника 6205RS

Зі співвідношень для розрахунку власних діагностичних частот підшипника 6205RS знаходимо – частота тіл кочення $f_{rol} = 4$ Гц, частота сепаратора $f_c = 19.4$ Гц, частота миготіння тіл кочення по зовнішньому кільцю $f_{out} = 176.4$ Гц, частота миготіння тіл кочення по внутрішньому кільцю $f_{in} = 264.7$ Гц. Для бездефектного підшипника смуга частот до 2.3 кГц містить видимі піки частоти обертання ротора f_{rt} і кратних до неї, а також незначні піки на частотах $f_{rt} \pm f_{rol}$, $f_{out} \pm f_{rol}$. Така картина характерна для неякісного монтажу підшипника і неспіввісності з валом ротора. Вищі кратні та комбінаційні гармоніки власних частот підшипника проявляються в діапазоні частот 4.5 – 7 кГц, що відповідає приблизно 30-м – 50-м гармонікам власних частот підшипника. Інтерпретація цих високих гармонік власних частот підшипника практично не здійснюється, оскільки відомо, що практично значущими є власні частоти до 20 ступеня кратності [8]. Якщо порівняти вигляд спектральної густини бездефектного і дефектного підшипників (рис. 2–3), то можна зауважити зміщення піків з високою

енергією в діапазон нижчих частот. Крім того, для дефектного підшипника значно зростають амплітуди піків і можна зауважити широкосмугове підняття середньої енергії вібраційного сигналу. Дисперсія вібросигналу від бездефектного підшипника складає $1.2 \cdot 10^6 [mV/g]^2$, а для дефектного підшипника – $2.1 \cdot 10^6 [mV/g]^2$.

Модель вібраційного сигналу. Подамо модель вібраційного сигналу $\xi(t)$ як суму регулярної та випадкової складової:

$$\xi(t) = m(t) + \eta(t),$$

де $m(t) = \sum_{k=-N_1}^{N_1} m_k e^{i\omega_k t}$ – регулярна складова, ω_k – значущі частоти, N_1 – кількість значущих частот, $\eta(t)$ – ПКВП з основною частотою обертання f_{rt} . Компоненти m_k відповідають за форму регулярної складової і в частотному діапазоні їм відповідають піки спектральної густини на частотах ω_k .

Дослідження випадкової складової сигналів вібрації. Розглянемо кожний з двох сигналів на діапазоні 0 – 2 кГц. Застосувавши методи лінійної фільтрації, компонентної фільтрації ПКВП та фільтрації МПКВП за методом найменших квадратів, виділимо випадкову складову сигналу. Графіки стаціонарної спектральної густини випадкової складової вібраційних сигналів бездефектного та дефектного підшипників подані на рис. 4–5. Стаціонарна спектральна густина для бездефектного підшипника (рис. 4) отримана після вилучення 75 значущих спектральних гармонік і має вигляд, наближений до білошумового процесу. Дисперсія випадкової складової сигналу становить $5.74 \cdot 10^4 [mV/g]^2$. На графіку стаціонарної спектральної густини для дефектного підшипника (рис.5) залишилося підняття спектра в діапазоні 1.2 – 2 кГц, що свідчить про критичну дефектність підшипника. Також зауважимо широкосмугове підняття амплітуди спектра у всьому частотному діапазоні. Дисперсія випадкової складової сигналу становить $5.95 \cdot 10^5 [mV/g]^2$, що на порядок вище від дисперсії для бездефектного підшипника.

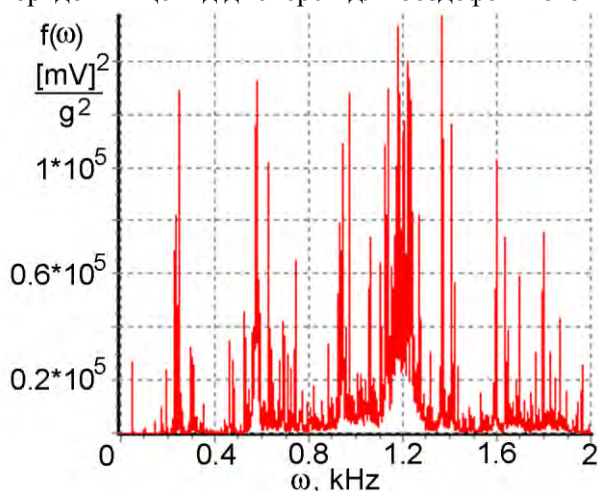


Рис. 4. Спектральна густина стаціонарного наближення випадкової складової вібраційного сигналу дефектного підшипника 6205RS

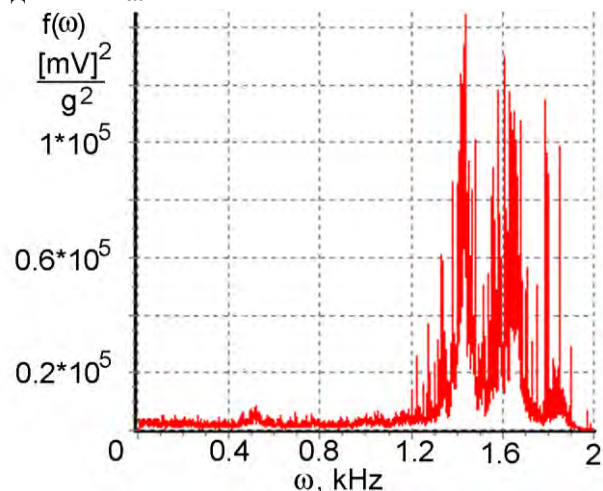


Рис. 5. Спектральна густина стаціонарного наближення випадкової складової вібраційного сигналу бездефектного підшипника 6205RS

Графіки кореляційної поверхні для випадкової складової вібраційних сигналів бездефектного та дефектного підшипників подано на рис. 6–7.

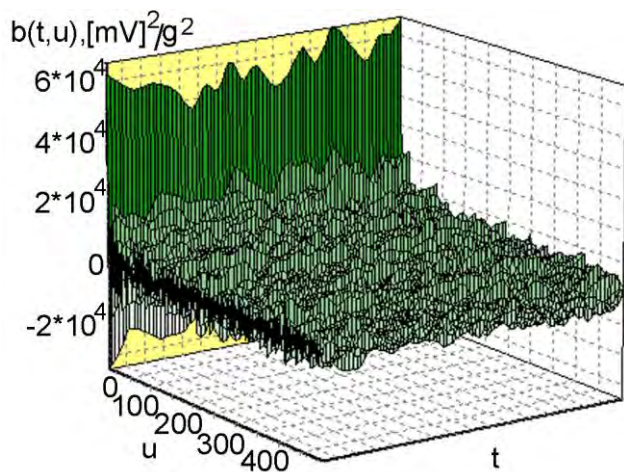


Рис. 6. Кореляційна поверхня випадкової складової вібраційного сигналу бездефектного підшипника 6205RS

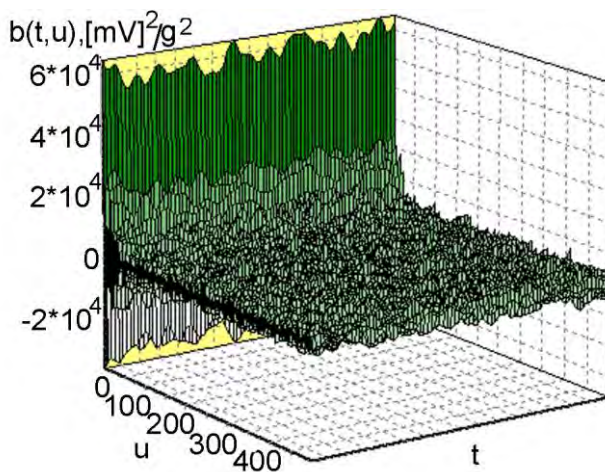


Рис. 7. Кореляційна поверхня випадкової складової вібраційного сигналу дефектного підшипника 6205RS

З рис. 6–7 видно, що кореляційна поверхня швидко зникає зі збільшенням зсуву, що говорить про відсутність прихованих періодичностей у випадковій складовій вібраційних сигналів. Цей результат підтверджують графіки кореляційних компонентів (рис. 8–9), а також результати спектрального аналізу. Отже, переважна частина інформації про наявність дефектів підшипника міститься у регулярній складовій досліджуваних вібраційних сигналів.

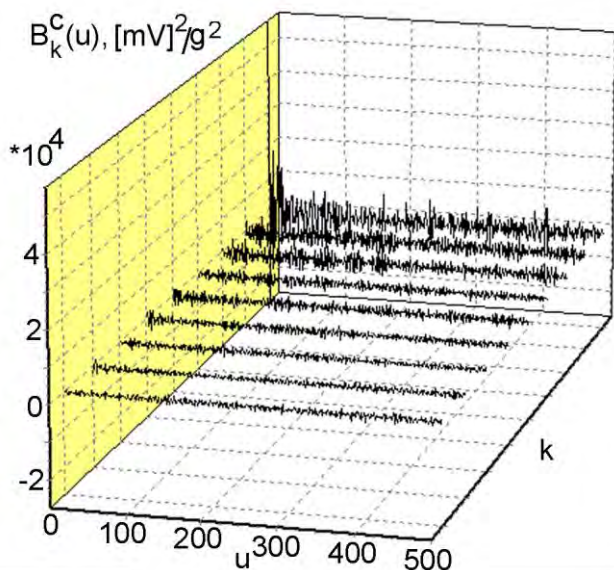


Рис. 8. Кореляційні компоненти випадкової складової вібраційного сигналу бездефектного підшипника 6205RS

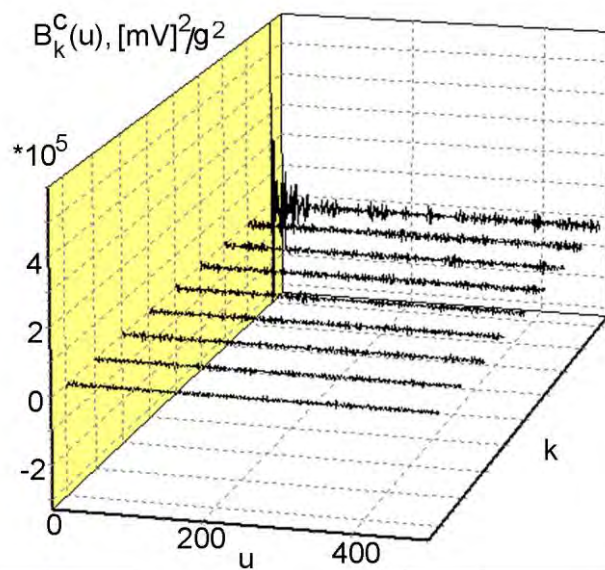


Рис. 9. Кореляційні компоненти випадкової складової вібраційного сигналу дефектного підшипника 6205RS

Висновки

Під час дефектоскопії обертових елементів машин і конструкцій переважно використовують частотні методи теорії стаціонарних випадкових процесів. Піки спектральної густини генеруються через наявність у системі дефектів монтажу, неспіввісності та дисбалансу, що призводить до порушення геометрії підшипника і виникнення викривлення та розшарування металеві поверхні

доріжок, пошкодження сепаратора і тіл кочення. Проте через нестационарність сигналів вібрації використання нестационарних методів ПКВП веде до побудови адекватніших моделей вібраційних сигналів. Запропонована модель вібраційного сигналу як адитивної суми регулярної та випадкової складових дає змогу виконувати аналіз не тільки гармонічних та модуляційних складових вібрації, а й знаходити закономірності у випадковій складовій вібрації, що проявляються у властивостях нестационарних дисперсії, кореляційній функції, спектральній густині та їхніх компонентів.

1. Слуцкий Е.Е. Избранные труды. Теория вероятностей. Математическая статистика. – М., 1970. 2. Gardner, W.A. Cyclostationarity in Communications and Signal Processing, IEEE Press, New York, 1994. 3. Javors'kyj I.M. The Probabilistic Analysis of Stochastic Oscillation (Part I) // Information Technologies and Systems. – 1999. – Vol. 2. – № 1. – P. 42-64. 4. R.B. Randall, J. Antoni, S. Chobsaard, The relationship between spectral correlation and envelope analysis in the diagnostics of bearing faults and other cyclostationary machine signals, Mechanical Systems and Signal Processing 15 (5) (September 2001) 945–962. 5. Мыслович М.В., Марченко Б.Г. Вибродиагностика подшипниковых узлов электрических машин. – К., 1992. 6. Capdessus C., Sidahmed M. and Lacoume J.L. Cyclostationary Processes: Application in Gear Fault Early Diagnostics // Mechanical Systems and Signal Processing. – 2000. – 14(3). – pp.371-385. 7. Михайлишин В.Ю., Яворський І.М., Василюк Ю.Т., Драбич О.П., Ісаєв І.Ю. Імовірнісні моделі та статистичні методи аналізу сигналів вібрації для діагностики машин та конструкцій // Фізико-хімічна механіка матеріалів. – 1997. – Т. 33. – №5.– С. 61–74. 8. http://www.vibration.ru/v_defekt.shtml

УДК 621.9.048

М.О. КАЛМИКОВ, С.В. КОРНЄЄВ, Г.Л. МЄЛКОНОВ*,
СНУ ім. В. Даля, Луганськ,
*ПТ “Союзавто”

ПІДВИЩЕННЯ ЕФЕКТИВНОСТІ ВІБРАЦІЙНОЇ ОБРОБКИ ДЕТАЛЕЙ

© Калмиков М.О., Корнєєв С.В., Мелконов Г.Л., 2006

Запропоновано метод підвищення продуктивності обробки деталей у вібрувальних U-подібних контейнерах без підвищення енергоємності верстата введенням в процес обробки додаткового інструменту, розташованого по контуру робочої частини контейнера у вигляді його облицювання.

In the article is offered the method of increase of productivity of treatment of details in the vibrating containers of U-vivid form without the increase of power-hungryness of machine-tool, by introduction of the additional instrument located contoured working part of container as its revetment to the process of treatment.

В умовах ринкової економіки, коли необхідно в короткі терміни за мінімальної собівартості продукції перебудувати виробництво на випуск нової продукції, виникає необхідність в застосуванні на оздоблювально-зачисних операціях, на операціях з округлення гострих крайок і зняття задирок ефективного і продуктивного устаткування. Одним з таких видів устаткування є вібраційні верстати з U-подібною формою контейнера. Це універсальне устаткування з раціональними режимами, вибір яких здійснювався протягом тривалого періоду за допомогою експериментальних і теоретичних досліджень (з 60-х років ХХ століття дотепер) [1, 2].

Велика кількість класифікаційних ознак, зумовлених істотною відмінністю різноманітних схем вібраційної обробки і відповідних цим схемам верстатів, пояснює відсутність у низці робіт із