

ЗАСТОСУВАННЯ СПЕЦІАЛІЗОВАНОГО ПРИСТРОЮ НЕРУЙНІВНОГО КОНТРОЛЮ ДЛЯ АНАЛІЗУ ВІБРАЦІЙНИХ СИГНАЛІВ ПІДШИПНИКОВИХ ВУЗЛІВ МЕТОДАМИ ВЗАЄМНОГО НЕСТАЦІОНАРНОГО АНАЛІЗУ

Р.М. Юзефович^{1,2}, І.М. Яворський^{1,3}, О.Ю. Дзерин¹, Г.Р. Трохим¹, І.Г. Стецько¹, І.Й. Мацько¹

¹Фізико-механічний інститут ім. Г. В. Карпенка НАН України. 79060, м. Львів, вул. Наукова, 5.

E-mail: roman.yuzefovych@gmail.com

²Національний університет «Львівська політехніка». 79013, м. Львів, вул. С. Бандери, 12

³Технологічно-природничий університет. 85796, Польща, Бидгощ, алея проф. С. Каліського, 7

Вібраційні сигнали від складних механічних систем, які знаходяться під впливом динамічних навантажень, сформовані відгуками від багатьох вузлів. При дослідженні таких сигналів виникає питання про аналіз впливу на їх структуру можливих дефектів, які виникають у кожному з елементів підшипникового вузла. Виникнення дефектів у елементах механічних систем спричиняє нелінійні ефекти у властивостях вібраційних коливань. Такі ефекти приводять як до появи нових гармонік у детермінованій складовій вібрації, так і до взаємодії цієї складової зі стохастичними коливаннями, які зумовлені флуктуаціями товщини та в'язкості змазки, змінами сил тертя, спонтанними й некерованими змінами робочих навантажень тощо. У результаті вказаної взаємодії порушується строга періодичність детермінованих коливань, вони модулюються за фазою та амплітудою. Відмічені властивості вібрацій можуть бути адекватно описані математичною моделлю у вигляді взаємних періодично корельованих випадкових процесів. У роботі представлено інтегральну функцію когерентності, яка кількісно характеризує стохастичний взаємозв'язок між властивостями нестационарності двох періодично корельованих випадкових сигналів, що проявляється в періодичній зміні за часом їх взаємних спектральних характеристик, а також покомпонентну функцію когерентності, яка визначається взаємоспектральними густинами окремих модулюючих процесів. Наведено технічні характеристики розробленого спеціалізованого пристрою неруйнівного контролю «Компакт-Вібро». Розглянуто результати, отримані з використанням цього пристрою при виконанні вібраційних обстежень промислових об'єктів України. Бібліогр. 6, рис. 32.

Ключові слова: періодично корельовані випадкові процеси, функція когерентності, пристрій неруйнівного контролю, вібраційний сигнал, діагностика

На даний час ефективними методами для вирішення задач технічної діагностики є методи статистичного аналізу зареєстрованих сигналів, що ґрунтуються на теорії та методах періодично корельованих випадкових процесів (ПКВП) [1]. Однією з таких задач є оцінювання контролю роботи елементів складних механічних систем, визначення дефектів, які зароджуються, і реагують на незначні відхилення параметрів технічного стану від норми.

Дослідження проведені у відділі «Методів і засобів відбору та обробки діагностичних сигналів» Фізико-механічного інституту ім. Г.В. Карпенка НАН України показали, що використання імовірнісної моделі зареєстрованих вібраційних сигналів у вигляді ПКВП відкриває нові можливості при діагностиці дефектів обертових механізмів на ранніх стадіях їх виникнення.

Властивості взаємкореляційних характеристик сигналів. При розв'язуванні задач вібродіагностики часто також виникає потреба аналізу взаємозв'язків між сигналами, які відібрані в різних точках механічної системи. Вібраційний сигнал, що є носієм інформації про певні дефекти

системи, має властивості як повторюваності, так і стохастичності [2–4]. Ці його властивості, з єдиної, а не з альтернативних позицій, дають можливість описати та дослідити математичну модель у вигляді ПКВП [1]. Імовірнісні характеристики ПКВП відображають модуляційну взаємодію стохастичної та детермінованої складових вібрацій, яка виникає в разі появи дефектів. І власне, останні з використанням цих характеристик, вдається виявляти вже на ранніх стадіях їх розвитку. Тому, актуальною є задача взаємного ПКВП-аналізу вібросигналів, відібраних у різних точках, що може суттєво полегшити визначення типу дефектів, а також їх розрізнення та локалізацію. Метою даної роботи є визначення основних властивостей взаємкореляційних характеристик пов'язаних між собою ПКВП [5, 6].

Задачу взаємного аналізу для спрощення розглянемо тільки для двох ПКВП-сигналів $\xi(t)$ та $\eta(t)$. Їх математичні сподівання та кореляційні функції є періодичними функціями часу

$$m_{\xi}(t) = E\xi(t) = m_{\xi}(t + T),$$

$$b_{\xi}(t, u) = E \dot{\xi}(t) \dot{\xi}(t+T) = b_{\xi}(t+T, u),$$

$$\dot{\xi}(t) = \xi(t) - m_{\xi}(t), \quad m_{\xi}(t) = E \eta(t) = m_{\eta}(t+T),$$

$$b_{\eta}(t, u) = E \dot{\eta}(t) \dot{\eta}(t+T) = b_{\eta}(t+T, u),$$

$$\dot{\eta}(t) = \eta(t) - m_{\eta}(t),$$

і можуть бути подані рядами Фур'є:

$$m_{\xi}(t) = \sum_{k \in \mathbb{Z}} m_k^{(\xi)} e^{ik\omega_0 t}, \quad m_{\eta}(t) = \sum_{k \in \mathbb{Z}} m_k^{(\eta)} e^{ik\omega_0 t},$$

$$b_{\xi}(t, u) = \sum_{k \in \mathbb{Z}} B_k^{(\xi)}(u) e^{ik\omega_0 t},$$

$$b_{\eta}(t, u) = \sum_{k \in \mathbb{Z}} B_k^{(\eta)}(u) e^{ik\omega_0 t}.$$

Припустимо, що взаємкореляційна функція $b_{\xi\eta}(t, u) = E \dot{\xi}(t) \dot{\eta}(t+u)$ також змінюється за часом періодично. Тоді

$$b_{\xi\eta}(t, u) = \sum_{k \in \mathbb{Z}} B_k^{(\xi\eta)}(u) e^{ik\omega_0 t}, \quad (1)$$

де

$$B_k^{(\xi\eta)}(u) = \frac{1}{T} \int_0^T b_{\xi\eta}(t, u) e^{-ik\omega_0 t} dt.$$

Величини $B_k^{(\xi\eta)}(u)$ будемо називати взаємкореляційними компонентами. Оскільки

$$b_{\xi\eta}(t, u) = E \dot{\xi}(t) \dot{\eta}(t+u) = E \dot{\eta}(t+u) \dot{\xi}(t) = b_{\eta\xi}(t+u, -u),$$

то

$$\sum_{k \in \mathbb{Z}} B_k^{(\xi\eta)}(u) e^{ik\omega_0 t} = \sum_{k \in \mathbb{Z}} B_k^{(\eta\xi)}(-u) e^{ik\omega_0(t+u)},$$

а звідси

$$B_k^{(\xi\eta)}(-u) = B_k^{(\eta\xi)}(u) e^{-ik\omega_0 u}. \quad (2)$$

Для нульового взаємкореляційного компонента маємо $B_0^{(\xi\eta)}(-u) = B_0^{(\eta\xi)}(u)$.

Кожен із сигналів $\xi(t)$ та $\eta(t)$ як ПКВП може бути поданий у вигляді ряду

$$\xi(t) = \sum_{k \in \mathbb{Z}} \xi_k(t) e^{ik\omega_0 t}, \quad (3)$$

$$\eta(t) = \sum_{k \in \mathbb{Z}} \eta_k(t) e^{ik\omega_0 t}. \quad (4)$$

З випадковими процесами $\xi(t)$ та $\eta(t)$, які описують амплітудну та фазову стохастичні модуляції гармонічних складових вібрисигналів, безпосередньо пов'язана інформація про ті чи інші дефекти обертових вузлів. Тому, на основі взає-

мкореляційних функцій $R_{pq}^{(\xi\eta)}(u)$, а отже і взаємкореляційних компонентів, можна судити про наявність чи відсутність зв'язків між дефектами. Якщо кореляційні зв'язки між компонентами $\xi_p(t)$ та $\eta_q(t)$ різних номерів p та q відсутні, тобто $R_{pq}^{(\xi\eta)}(u) = R_p^{(\xi\eta)}(u) \delta_{pq}$ (δ_{pq} – символ Кронекера), то всі взаємкореляційні компоненти, крім нульового, дорівнюють нулю. Взаємкореляційна функція в цьому випадку не змінюється з часом, а це означає, що два ПКВП-сигнали є стаціонарно зв'язаними. Очевидно, що при $R_p^{(\xi\eta)}(u) = 0$ ці сигнали взагалі будуть некорельованими.

Для характеристики пов'язаності двох ПКВП-сигналів у частотній області введено інтегральну функцію когерентності:

$$\gamma_k^{(\xi\eta)}(\omega) = \frac{\left| f_k^{(\xi\eta)}\left(\omega + k \frac{\omega_0}{2}\right) \right|}{\left[f_0^{(\xi\eta)}\left(\omega - k \frac{\omega_0}{2}\right) f_0^{(\xi\eta)}\left(\omega + k \frac{\omega_0}{2}\right) \right]^{\frac{1}{2}}}. \quad (5)$$

Ця величина характеризує ступінь корельованості між спектральними компонентами сигналу $\xi(t)$ на частоті $\omega - k \frac{\omega_0}{2}$ та сигналу $\eta(t)$ на частоті $\omega + k \frac{\omega_0}{2}$. Визначення цієї величини зводиться до знаходження характеристик корельованості гармонічних складових двох періодично нестаціонарно зв'язаних сигналів (3) і (4) – їх взаємоспектральних компонентів. Така корельованість ніяк не може бути відображена в характеристиках їх стаціонарних наближень. Функція когерентності, побудована на основі останніх, дозволяє проаналізувати тільки взаємозв'язки між спектральними густинами середньої потужності сигналів. Вибрана характеристика нестаціонарного взаємозв'язку сигналів не змінюється при лінійних перетвореннях. Властивість інваріантності дає можливість використати введену величину при розв'язуванні різноманітних задач, в тому числі, при виявленні нелінійних спотворень сигналів, розділення їх джерел, ідентифікації шляхів їх поширення і т. п. [4]

У випадку, коли існують такі $k \neq l$, що $f_{kl}^{(\xi\eta)}(\omega) \neq 0$, $f_{kl}^{(\xi\eta)}(\omega)$ – взаємоспектральні густини стаціонарних компонентів $\xi_k(t)$ та $\eta_l(t)$, періодично нестаціонарні процеси будуть взаємозв'язаними, а для визначення характеристик такої зв'язності введено покомпонентну функцію когерентності, яка визначається формулою:

$$\gamma_{kl}(\omega) = \frac{\left| f_{kl}^{(\xi\eta)}(\omega) \right|}{\left[f_{kk}^{(\xi)}(\omega) f_{ll}^{(\eta)}(\omega) \right]^{\frac{1}{2}}}. \quad (6)$$

Ця функція, як і величина (5), не змінюється при лінійних перетвореннях і визначається взаємоспектральними характеристиками окремих випадкових процесів, які модулюють несучі гармоніки ПКВС. У порівнянні з інтегральною функцією когерентності вона дає змогу детальніше проаналізувати взаємозв'язаність ПНВС, уникаючи при цьому впливу переносу частот, який виникає при модуляції.

Пристрій неруйнівного контролю. У ФМІ ім. Г.В. Карпенка НАНУ розроблений пристрій неруйнівного контролю «Компакт-Вібро» (рис. 1), у якому поєднано відбір вібраційного сигналу, застосування методів періодично нестаціонарних випадкових процесів, методи взаємного кореляційного і спектрального аналізів, а також методики цифрової обробки відібраних сигналів для ранньої діагностики обертових механізмів.

На рис. 2 наведена схема структурна пристрою неруйнівного контролю для ранньої діагностики об'єктів. Схеми електричні принципові уточнені та відкоректовані на підставі натурних випробувань на реальних промислових об'єктах.

Допоміжними елементами служать буферні каскади та кабелі з'єднання. Живлення пристрою неруйнівного контролю відбувається від шини USB 2.0 персонального комп'ютера (ПК). Аналоговий вібраційний сигнал перетворюється в цифровий 12-ти розрядним аналого-цифровим перетво-

рювачем та за допомогою шини USB передається для запам'ятовування та обробки на ПК. Обробка вібраційних сигналів відбувається спеціалізованим програмним забезпеченням. На екран монітора виводяться середньоквадратичні значення віброприскорення або віброшвидкості вібраційних сигналів, кореляційна функція, а також спектральні характеристики сигналів.

У режимі налаштування перед початком запису можна вибрати тип сигналу (віброприскорення чи віброшвидкість), номер каналу, частоту квантування, час запису вібраційного сигналу на жорсткий диск ПК, смугу частот вхідного сигналу, коефіцієнт підсилення.

Живлення пристрою забезпечується двоканальним DC-DC перетворювачем. Струм споживання не перевищує 80 мА. Електронні компоненти розміщені на друкованій платі розміром 80×130 мм. Довжина сигнальних кабелів більше 7 м. Для надання механічної міцності та додаткового екранування в жорстких умовах експлуатації сигнальні кабелі змонтовані в гнучких броньованих кожухах.

Розроблений пристрій «Компакт-Вібро» дозволяє здійснювати відбір та запис сигналів: віброприскорення від 0,1 до 196,2 м/с² в діапазоні частот від 5 Гц до 12 кГц при нерівномірності АЧХ до ±3 дБ; віброшвидкості від 0 до 100 мм/с в діапазоні частот від 5 Гц до 1 кГц при нерівномірності АЧХ до ±3 дБ.

Взаємний нестаціонарний аналіз вібраційних сигналів. Проведено детальний аналіз структури вібраційних сигналів відібраних з підшипникових вузлів центрифуги Flottweg Z4E ($P = 19$ кВт, $N = 3650$ об./хв) за допомогою розробленого пристрою неруйнівного контролю «Компакт-Вібро» в режимі роботи при навантаженні. Відповідно до стандартів ДСТУ ISO 2372, ISO 10816-1-97 даний електродвигун відноситься до другого класу механізмів. Частоту дискретизації при відборі вібраційних сигналів вибрано 10 кГц, час запису реалізацій 20 с. Згідно з



Рис. 1. Загальний вигляд пристрою неруйнівного контролю

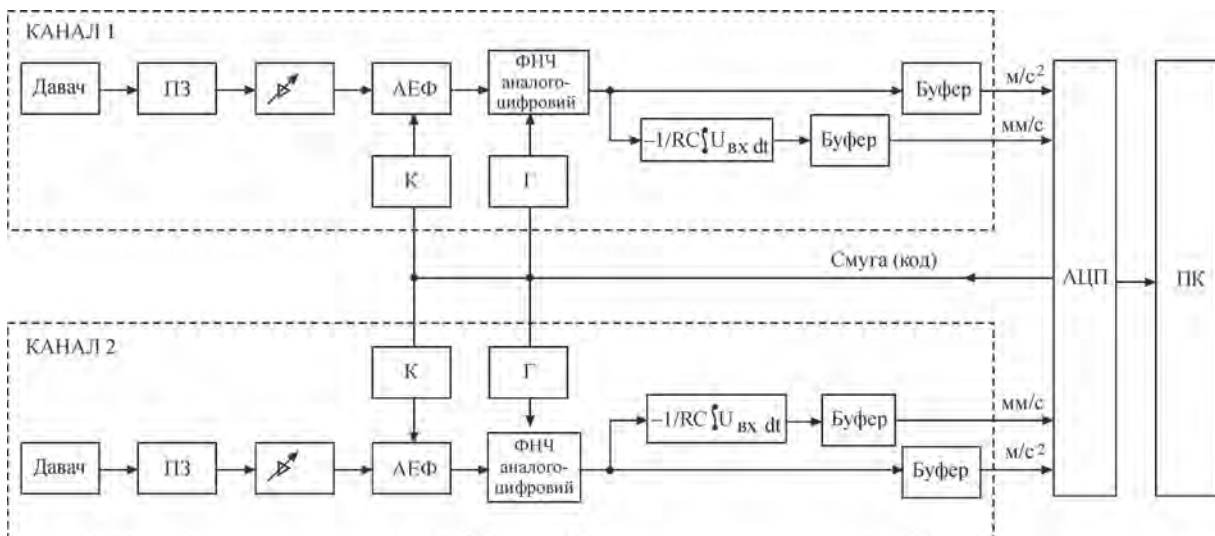


Рис. 2. Схема структурна пристрою неруйнівного контролю для ранньої діагностики об'єктів

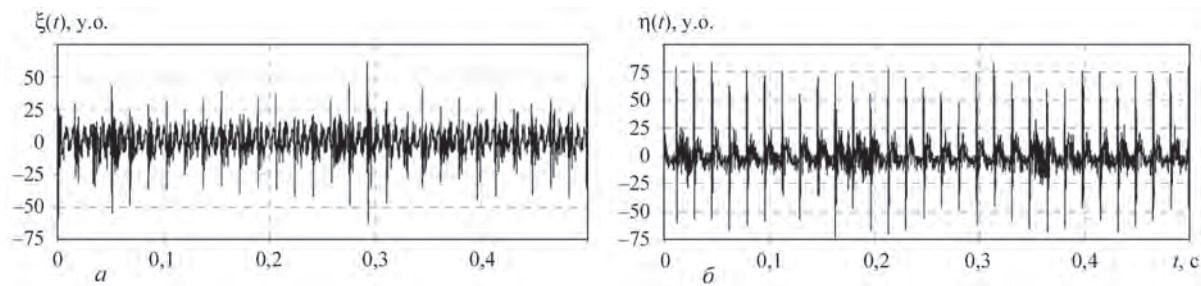


Рис. 3. Фрагмент реалізації вертикальної (а) та горизонтальної (б) складової вібрації центрифуги

[1, 2] така довжина реалізації вібраційного сигналу забезпечує похибку обробки не більше 5 %.

На рис. 3 наведено фрагменти реалізації вертикальної та горизонтальної складових вібрації. З наведених рисунків чітко видно коливання основної гармонічної складової (60 Гц).

Графіки кореляційної функції (рис. 4) вібраційного сигналу в стаціонарному наближенні вказують на те, що у сигналі присутня потужна детермінована складова, а співвідношення сигнал/шум для вертикальної складової складає 2:1, а для горизонтальної – 4:1. Хвости кореляційної функції як для горизонтальної, так і вертикальної складових мають характер незаникаючих коливань і містять потужні викиди з частотою, що відповідає частоті обертання валу (60 Гц).

Спектральна густина потужності вертикальної та горизонтальної складових вібраційного сигналу в стаціонарному наближенні містить основну гармонічну складову, що відповідає частоті обертання валу (60 Гц), та кратні до неї гармоніки, причому для вертикальної складової найпотужнішою є третя гармоніка на яку припадає понад 70 % потужності детермінованих коливань вібраційного сигналу (рис. 5, а). Для горизонтальної складової спектральна густина потужності вібраційного сигналу в стаціонарному наближенні зосереджена у смузі частот до 2500 Гц (рис. 5, б).

З використанням методу найменших квадратів [6] розділено детерміновану та стохастичну складові вібраційного сигналу та проведено аналіз кожної з них окремо.

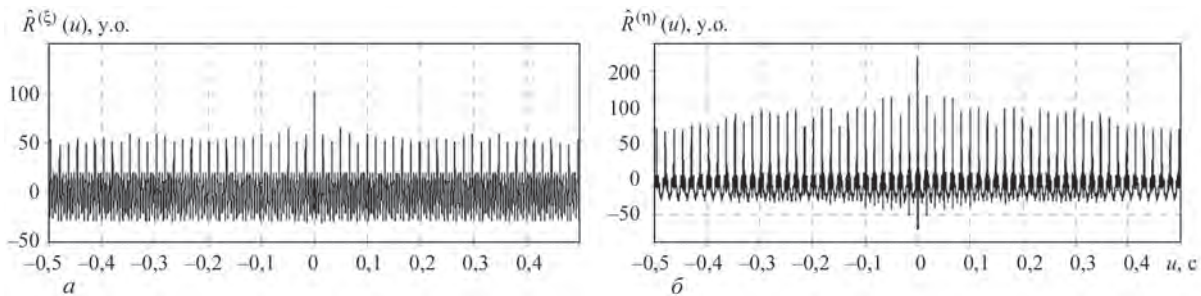


Рис. 4. Кореляційна функція вертикальної (а) та горизонтальної (б) складової вібрації центрифуги

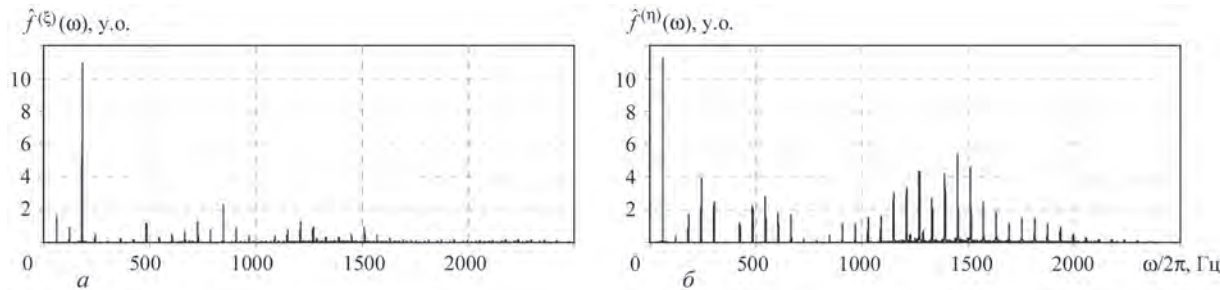


Рис. 5. Спектральна густина вертикальної (а) та горизонтальної (б) складової вібрації центрифуги

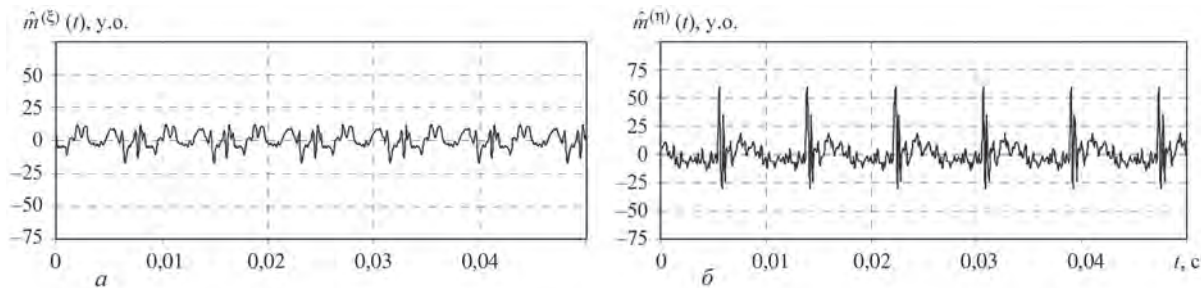


Рис. 6. Математичне сподівання вертикальної (а) та горизонтальної (б) складової вібрації центрифуги

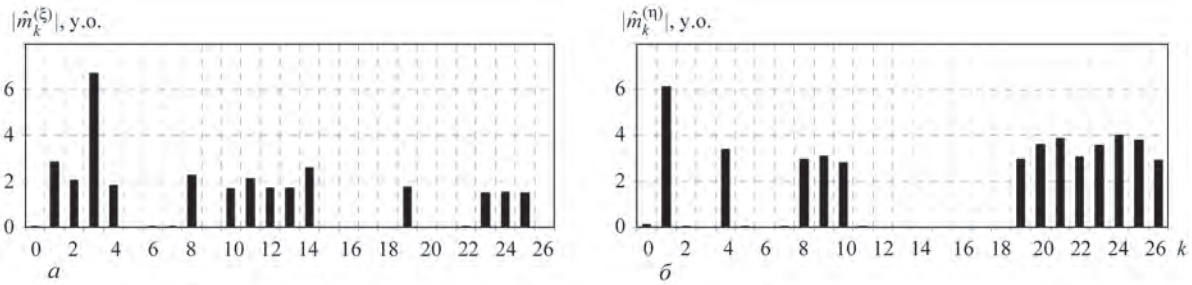


Рис. 7. Компоненти математичного сподівання вертикальної (а) та горизонтальної (б) складової вібрації центрифуги

На рис. 6 наведено графіки математичного сподівання вертикальної та горизонтальної складових сигналу, на яких чітко проявляються коливання основного періоду, при чому для горизонтальної складової спостерігаються викиди з частотою, що відповідає частоті обертання валу.

Компоненти Фур'є математичного сподівання для вертикальної і горизонтальної складових зображено на рис. 7. Для вертикальної складової вібрації центрифуги значущими є чотирнадцять гармонік, а для горизонтальної – тринадцять.

Графіки стохастичної складової для вертикальної та горизонтальної складових вібраційного сигналу центрифуги показано на рис. 8. З графіків видно, що в стохастичній складовій присутні викиди з частотою, що відповідає частоті обертання валу.

Заникаючий хвіст кореляційної функції для вертикальної та горизонтальної вібрації стохастичної складової центрифуги (рис. 9) свідчить про відсутність у ній детермінованих коливань. З графіків кореляційних функцій чітко видно, що на їх хвостах присутні викиди, що відповідають частоті обертання валу (60 Гц).

Спектральна густина потужності стохастичної складової вертикальної вібрації в стаціонарному наближенні має резонансне підняття в області частот від 500 до 2500 Гц, а горизонтальної вібрації – в області частот від 1000 до 2000 Гц та містить піки, кратні до частоти обертання вала (рис. 10).

Використовуючи когерентний кореляційний функціонал для пошуку прихованих періодичностей другого порядку у стохастичних складових вертикальної та горизонтальної вібрації виявлено

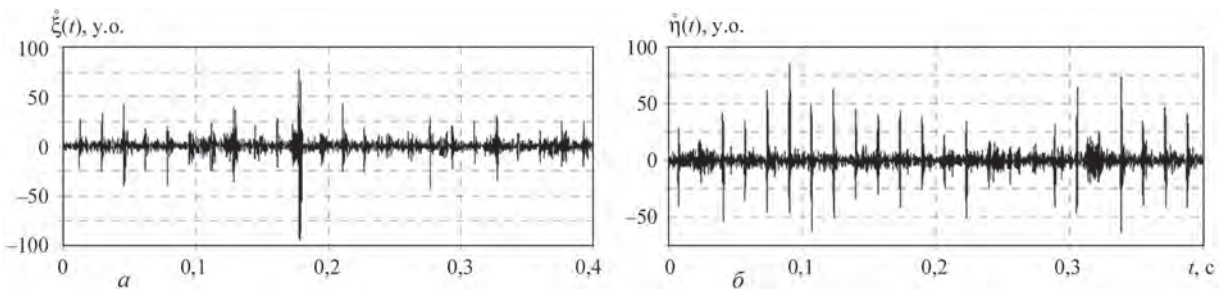


Рис. 8. Стохастична складова сигналу вертикальної (а) та горизонтальної (б) складової вібрації центрифуги

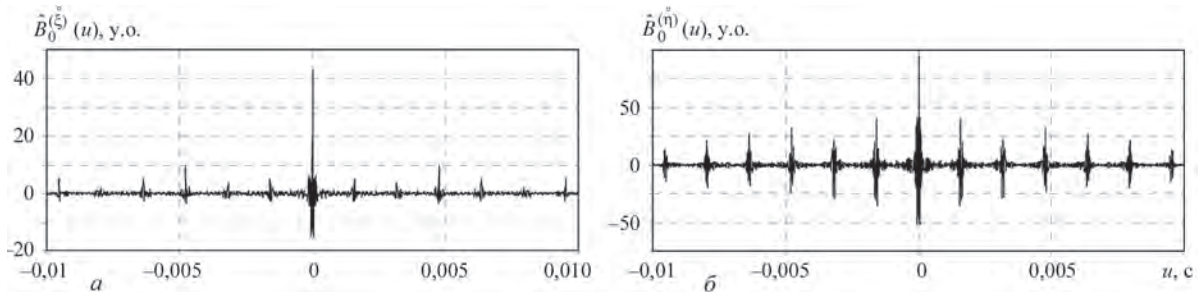


Рис. 9. Кореляційна функція стохастичної складової вертикальної (а) та горизонтальної (б) складової вібрації центрифуги

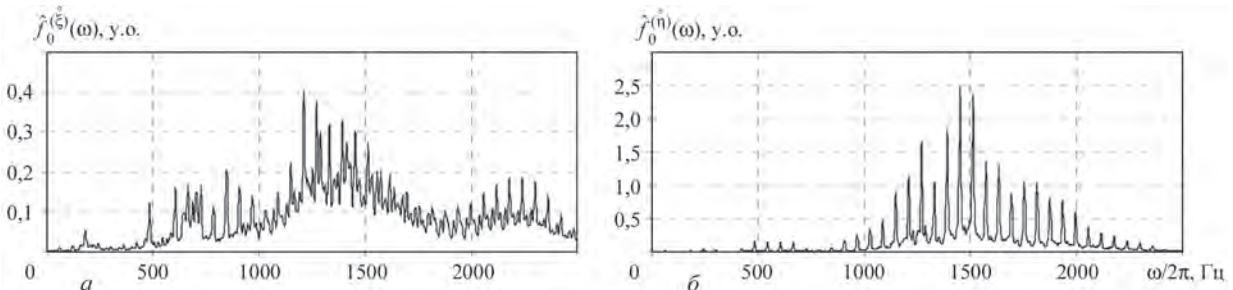


Рис. 10. Спектр стохастичної складової вертикальної (а) та горизонтальної (б) складової вібрації центрифуги

потужну модуляцію стаціонарними випадковими процесами частоти 60,45 Гц, що відповідає частоті обертання валу. Залежність даних функціоналів від пробного періоду показано на рис. 11.

Оцінивши значення періоду нестаціонарності проведемо ПКВП аналіз структури стохастичної складової вібраційного сигналу. За допомогою компонентного методу оцінено дисперсію та її компоненти Фур'є. Відношення мінімального значення дисперсії для вертикальної складової за період до максимального складає 0,03 (рис. 12, а), а для горизонтальної – 0,035 (рис. 12, б).

Серед значущих компонентів дисперсії для вертикальної складової вібраційного сигналу центрифуги є перші вісім (рис. 13, а), а для горизонтальної – сімнадцять (рис. 13, б).

Проведемо аналіз нульових (рис. 14), перших двох косинусних кореляційних компонентів вертикальної та горизонтальної стохастичних складових кореляційної функції стохастичної складової сигналу центрифуги (рис. 15, 16).

Як видно з наведених рисунків усі складові косинусних кореляційних компонентів вертикальної та горизонтальної складових мають вигляд швидкозатухаючих коливань, на хвостах яких присутні потужні викиди. Значущими є нульові кореляційні компоненти вертикальної та горизонтальної складових, другий компонент вертикальної складової вібрації, а також перший, другий, косинусний компонент горизонтальної складової. Рештою складових можна знехтувати.

Проведемо також аналіз перших двох синусних кореляційних компонентів вертикальної та

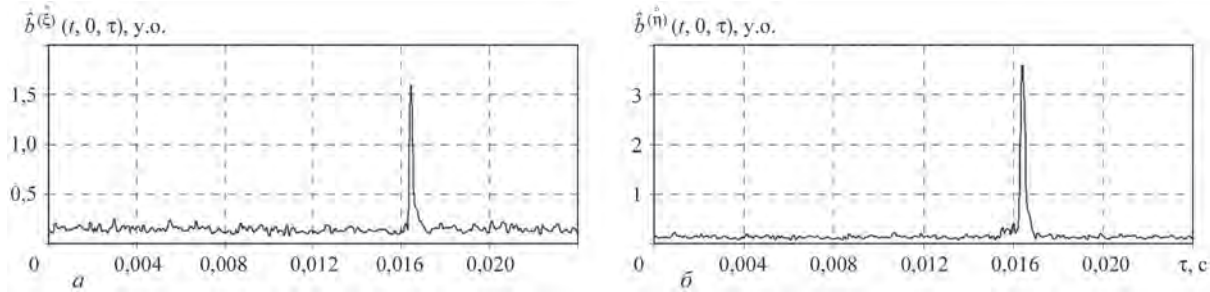


Рис. 11. Функціонал визначення періоду стохастичної складової вертикальної (а) та горизонтальної (б) складової вібрації центрифуги

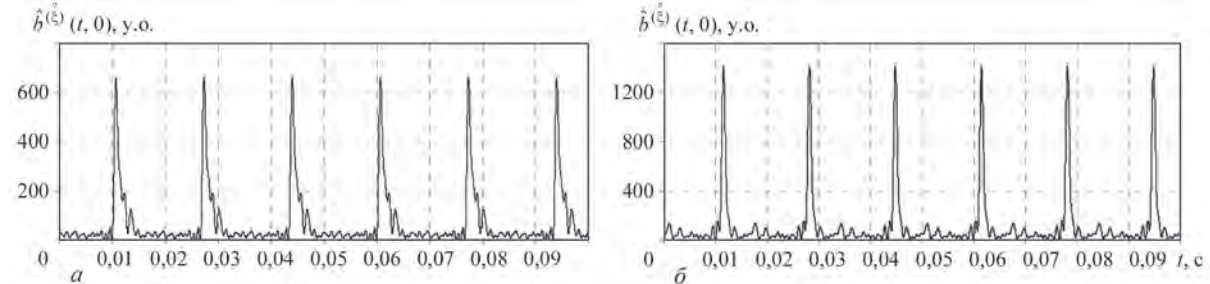


Рис. 12. Дисперсія стохастичної складової вертикальної (а) та горизонтальної (б) складової вібрації центрифуги

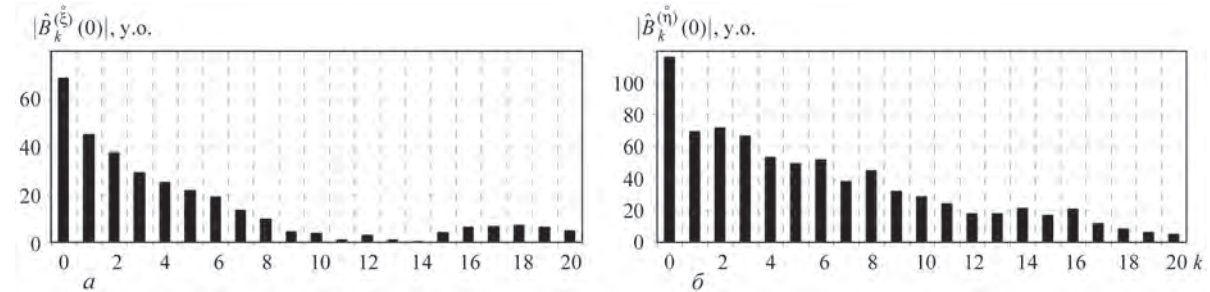


Рис. 13. Компоненти дисперсії стохастичної складової вертикальної (а) та горизонтальної (б) складової вібрації центрифуги

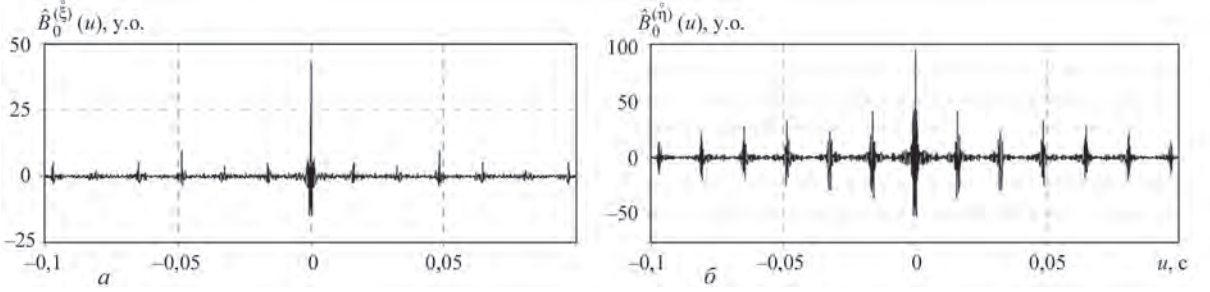


Рис. 14. Нульовий кореляційний компонент вертикальної (а) та горизонтальної (б) складових вібрації центрифуги

горизонтальної складових кореляційної функції стохастичної складової сигналу (рис. 17, 18). Як видно з наведених рисунків складові синусних кореляційних компонентів мають вигляд швидкозникаючих коливань, на хвостах яких присутні

потужні викиди. Значущими є перший та компоненти вертикальної складової вібрації.

Нульовий спектральний компонент, а також дійсні та уявні частини спектральних компонентів спектральної густини стохастичної складової для вер-

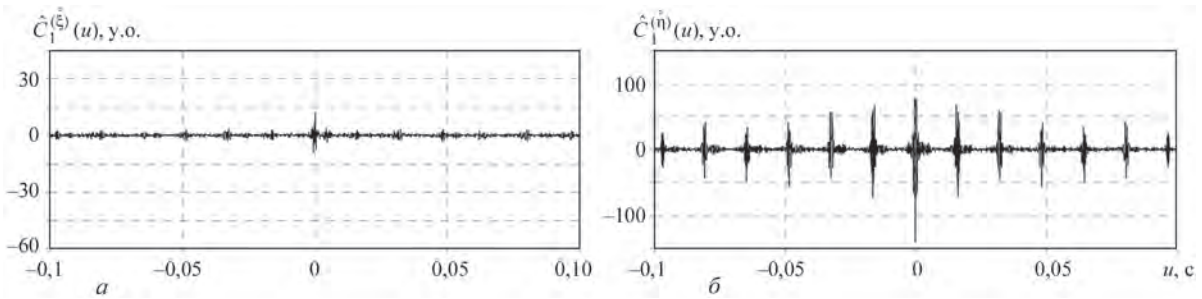


Рис. 15. Перший косинусний кореляційний компонент вертикальної (а) та горизонтальної (б) складових вібрації центрифуги

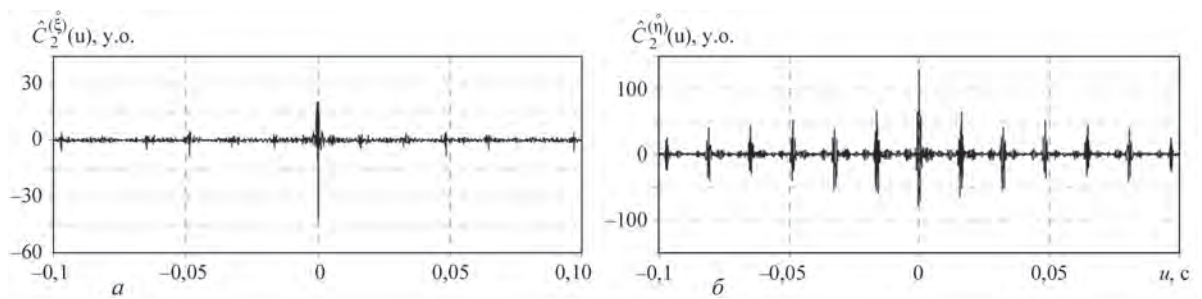


Рис. 16. Другий косинусний кореляційний компонент вертикальної (а) та горизонтальної (б) складових вібрації центрифуги

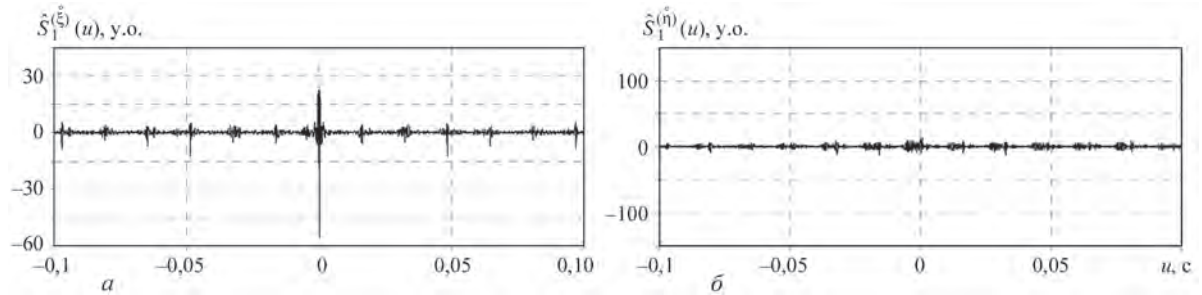


Рис. 17. Перший синусний кореляційний компонент вертикальної (а) та горизонтальної (б) складових вібрації центрифуги

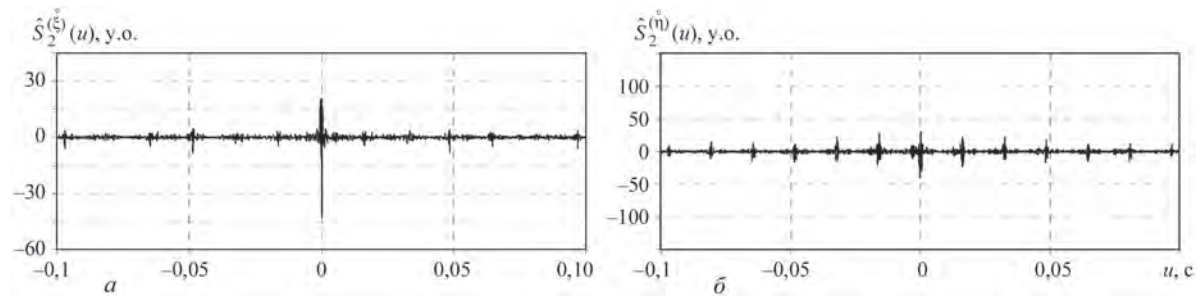


Рис. 18. Другий синусний кореляційний компонент вертикальної (а) та горизонтальної (б) складових вібрації центрифуги

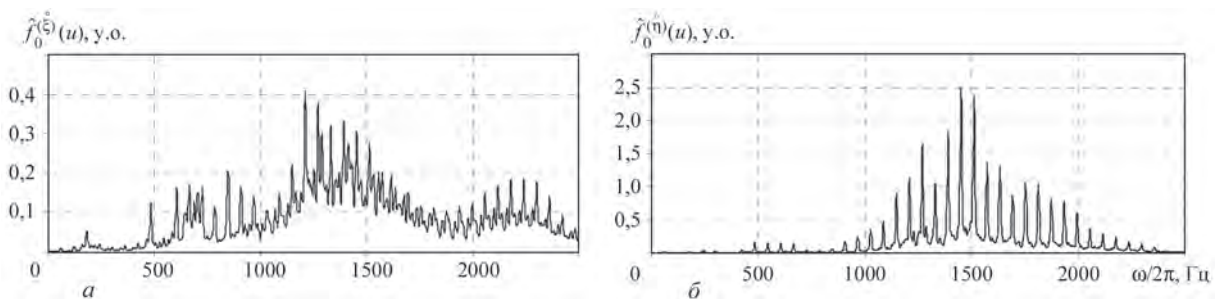


Рис. 19. Нульовий спектральний компонент вертикальної (а) та горизонтальної (б) складових вібрації центрифуги

тикальної та горизонтальної вібрацій наведено на рис. 19–23. З наведених графіків добре видно, що дійсна та уявна частини вертикальної і горизонтальної складових спектральних компонентів має піки на частотах, що відповідають частоті обертання валу, та кратних до неї частотах, а також зосереджені в смугах частот: вертикальна від 500 до 2500 Гц, горизонтальна – від 1000 до 2000 Гц.

Проведемо взаємкореляційний аналіз вертикальної та горизонтальної складових вібраційного сигналу. Залежність функціоналу від пробного періоду показана на рис. 24. З отриманого графіка ба-

чимо, що період нестационарності рівний приблизно 0,0165 с та відповідає частоті обертання валу.

Графіки взаємкореляційних компонентів наведені на рис. 25–27. Хвости взаємкореляційних компонентів містять потужні викиди з частотою обертання валу. Структуру взаємкореляційної функції визначають нульовий взаємкореляційний компонент, косинусна складова другого компонента, а також синусна складова першого, компонента. Рештою складових можна знехтувати.

Взаємоспектральні компоненти взаємоспектральної густини стохастичної складової наведено

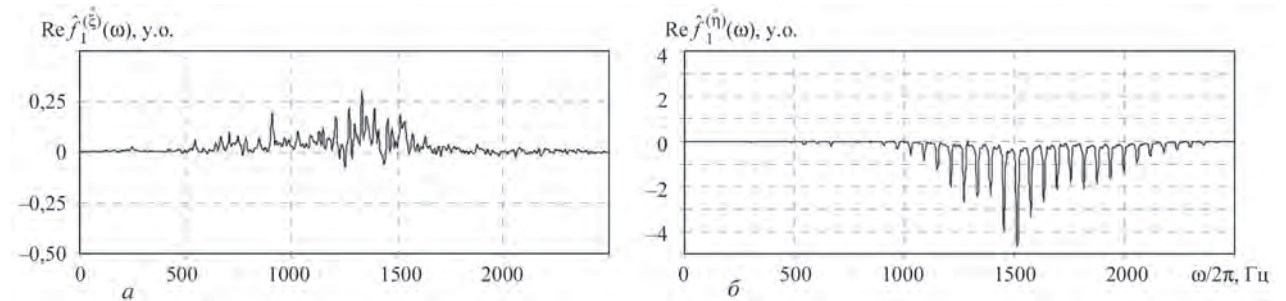


Рис. 20. Дійсна частина першого спектрального компонента вертикальної (а) та горизонтальної (б) складових вібрації центрифуги

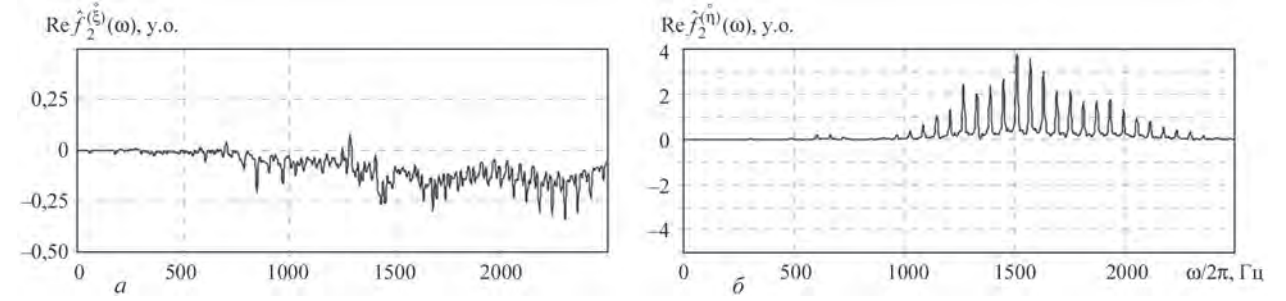


Рис. 21. Дійсна частина другого спектрального компонента вертикальної (а) та горизонтальної (б) складових вібрації центрифуги

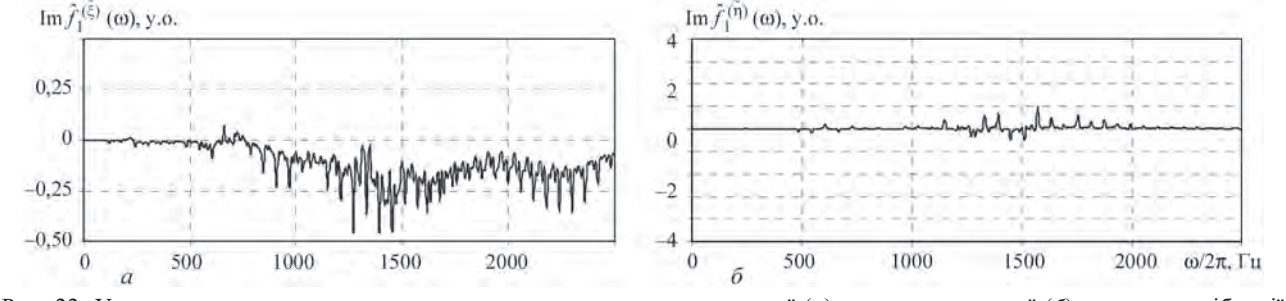


Рис. 22. Уявна частина першого спектрального компонента вертикальної (а) та горизонтальної (б) складових вібрації центрифуги

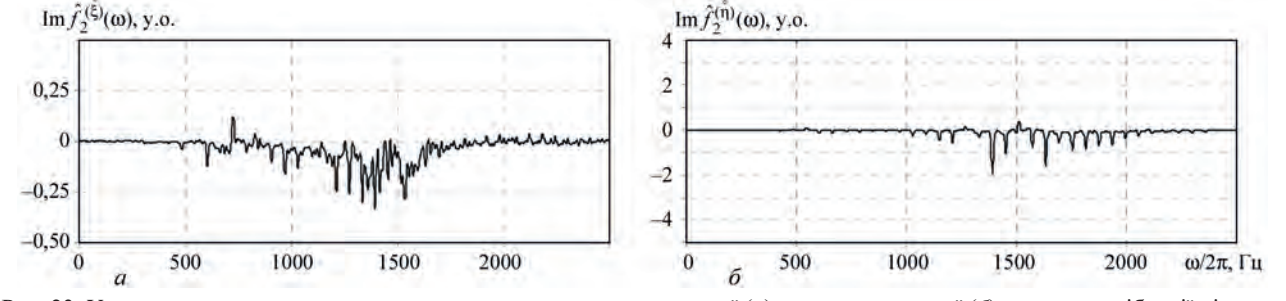


Рис. 23. Уявна частина другого спектрального компонента вертикальної (а) та горизонтальної (б) складових вібрації підшипника кочення з дефектом на зовнішньому кільці

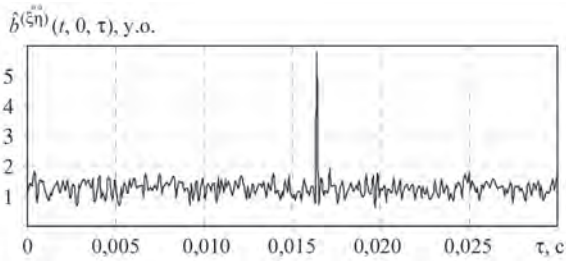


Рис. 24. Залежність функціоналу взаємної не стаціонарності

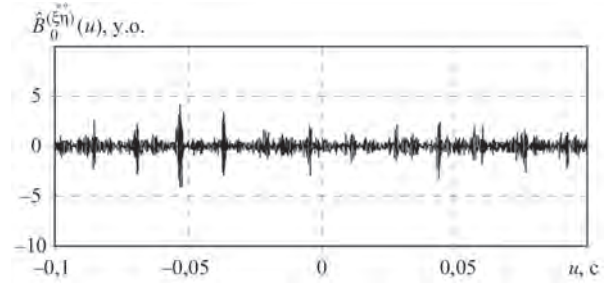


Рис. 25. Нульовий взаємкореляційний компонент

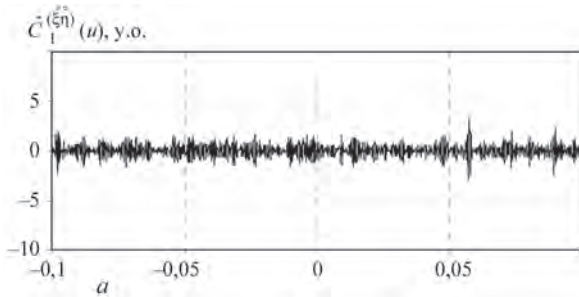


Рис. 26. Перший косинусний (а) та синусний (б) взаємкореляційні компоненти

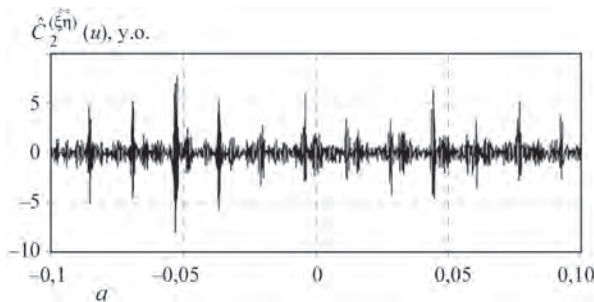
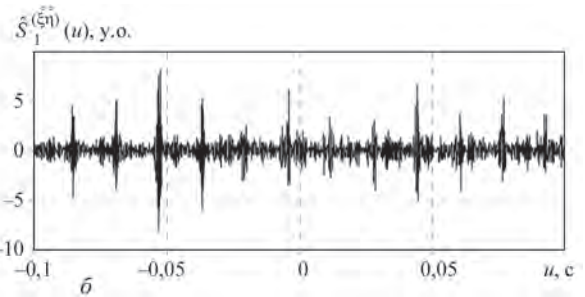
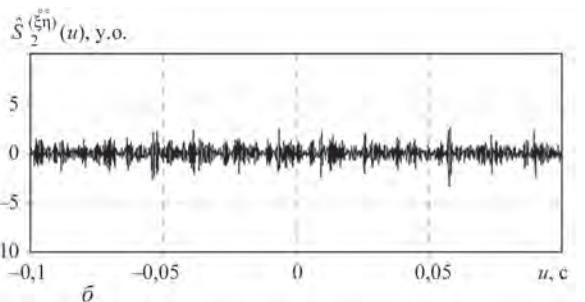


Рис. 27. Другий косинусний (а) та синусний (б) взаємкореляційні компоненти



на рис. 28–30. З наведених графіків добре видно, що кожна зі складових взаємоспектральних компонентів має піки на частотах, що відповідають частоті обертання валу та кратних до неї частотам. З рисунків видно, що нульовим взаємоспектральним компонентом (рис. 28) можна знехтувати, вищі взаємоспектральні компоненти формують структуру взаємоспектральної густини. Слід зауважити, що взаємоспектральні густини як дійсних, так і уявних частин взаємоспектральних компонентів зосереджені в смузі частот від 1000 до 2000 Гц.

Інтегральна функція когерентності двох взаємозв'язаних вібраційних сигналів вертикальної та горизонтальної складових центрифуги наведена на рис. 31. З рисунка видно, що вона має вигляд гребінки в смузі 0,5...2,5 кГц. Переніс по частоті у

вищу смугу пояснюється тим, що гармоніки частоти обертання валу (близько 60 Гц) промодульовані високочастотними смуговими процесами, спектри яких також гребінчасті.

Такий висновок впливає також з аналізу покомпонентних функцій когерентності (рис. 32).

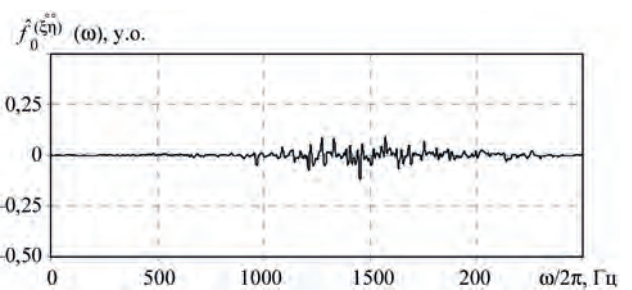


Рис. 28. Нульовий взаємоспектральний компонент

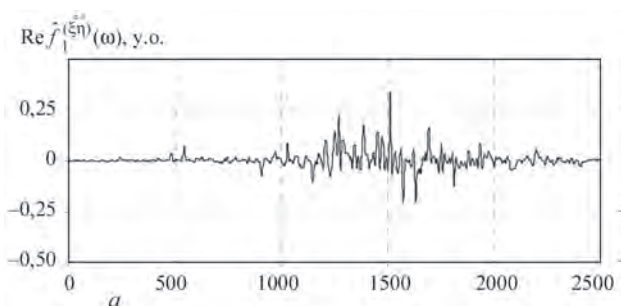
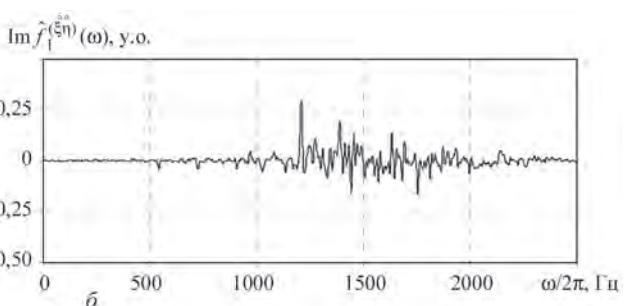


Рис. 29. Дійсна (а) та уявна (б) частина першого взаємоспектрального компонента



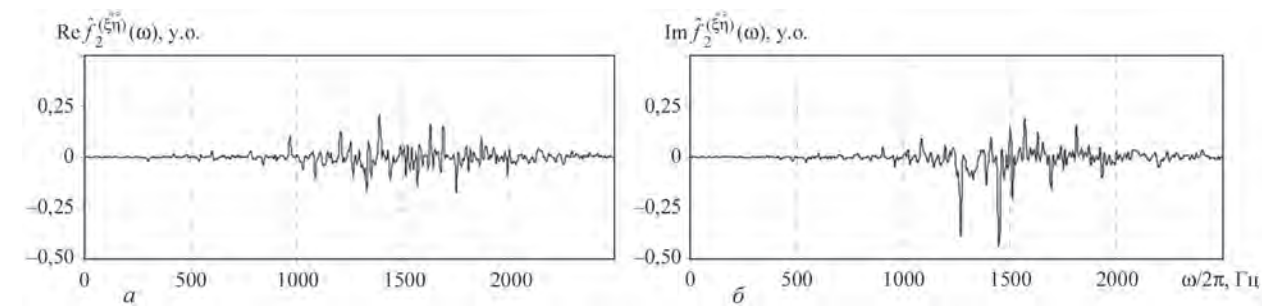


Рис. 30. Дійсна (а) та уявна (б) частина другого взаємоспектрального компонента

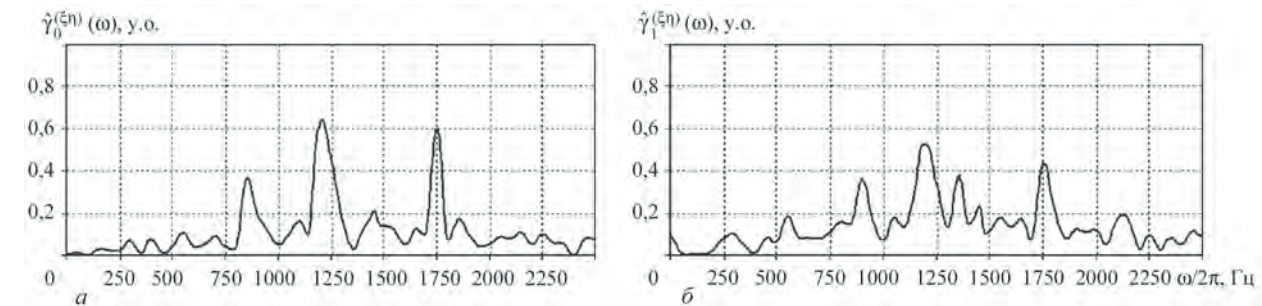


Рис. 31. Оцінка інтегральної функції когерентності при $k = 0$ (а) та $k = 1$ (б)

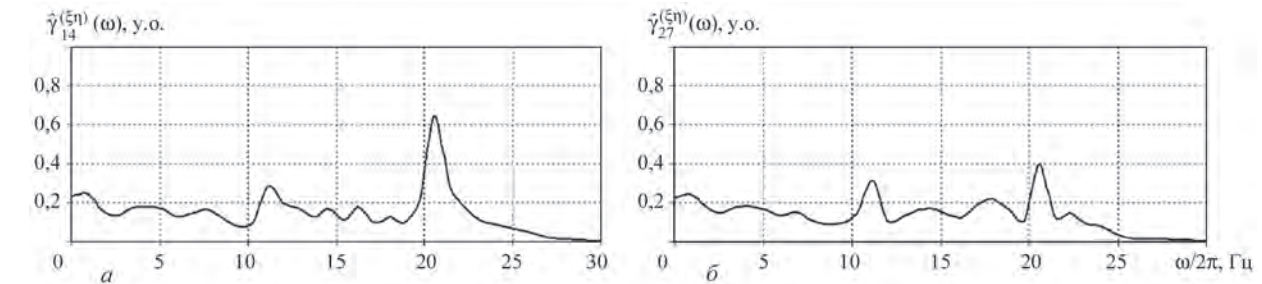


Рис. 32. Покомпонентна функція когерентності 3-го (а) та 5-го (б) порядків

Отримані функції когерентності відображають дефект обертового вузла, який проявляється у нерівномірному радіальному навантаженні зовнішнього кільця підшипника кочення.

Висновок

Застосування взаємного нестационарного аналізу до вібраційних сигналів дозволяє виявляти локальні дефекти вузлів механізму на ранній стадії їх зародження, що в свою чергу дозволяє уникнути аварійних ситуацій. Поява дефектів в елементах вузлів механічної системи призводить до того, що вібраційні сигнали набувають властивостей періодичної нестационарності 2-го порядку та можуть бути описані у вигляді ПКВП.

Значення нульового взаємоспектрального компонента, а також вищих взаємоспектральних компонентів, які помітно відрізняються від нуля, зосереджені в смузі 0,6...2,0 кГц. Встановлено, що взаємопов'язаність нестационарних властивостей сигналів є сильнішою, ніж їх пов'язаність у стаціонарному наближенні. Показано, інтегральна функція когерентності вібрацій центрифуги має вигляд гребінки в смузі 0,5...2,5 кГц. Перенесення по частоті у вищу смугу пояснюється тим, що гармоніки з частотою обертання вала промоду-

льовані високочастотними смуговими процесами, спектри яких також гребінчасті. Такий висновок впливає також з аналізу покомпонентних функцій когерентності.

Виявлені властивості функцій когерентності є наслідком того, що розподілений дефект підшипника кочення, який проявляється у нерівномірному радіальному навантаженні його зовнішнього кільця, супроводжується розвинутим локальним дефектом, а саме утворенням сколів на цьому кільці. Внаслідок цього вібраційний сигнал має гострі викиди, які зумовлені зіткненнями тіл кочення зі сколами. Виявлений дефект був підтверджений під час ремонту обертового вузла.

Список літератури/References

1. Javorskyj I.M., Kravets I.B., Matsko I.Y., Yuzefovych R.M. (2017) Periodically correlated random processes: Application in early diagnostics of mechanical systems. *Mechanical Systems and Signal Processing*, **83**, 406–438.
2. Gardner W.A. (1994) *Cyclostationarity in communications and signal processing*. New York, IEEE Press.
3. Hurd H.L., Miamee A. (2007) *Periodically Correlated Random Sequences. Spectral Theory and Practice*. New Jersey, Wiley–Interscience.
4. Napolitano A. (2012) *Generalizations of Cyclostationary Signal Processing: Spectral Analysis and Applications*. John Wiley & Sons, Ltd, IEEE Press.

5. Javorskyj I.M., Yuzefovych R.M., Matsko I.Y., Zakrzewski Z. (2016) Coherence function of interrelated Periodically Nonstationary Random Processes. *Radioelectronics and Communication Systems*, 59, 3, 128–140.
6. Javorskyj I.M., Yuzefovych R.M., Matsko I.Y., Zakrzewski Z. (2017) Component-wise coherence function for jointly related periodically non-stationary random processes. *Ibid*, 60, 1, 28–41.

APPLICATION OF A SPECIALIZED NONDESTRUCTIVE TESTING DEVICE FOR ANALYSIS OF VIBRATION SIGNALS OF BEARING ASSEMBLIES BY THE METHODS OF MUTUAL NONSTATIONARY ANALYSIS

R.M. Yuzefovych^{1,2}, I.M. Javorskyj^{1,3}, O.Y. Dzeryn¹, G.R. Trokhym¹, I.H. Stetsko¹, I.Y. Matsko¹

¹G.V. Karpenko Physico-Mechanical Institute of the NAS of Ukraine. 5 Naukova Str., 79060, Lviv, Ukraine.
E-mail: roman.yuzefovych@gmail.com

²National University «Lvivska Politehnika». 12 S.Banderi Str., 79013, Lviv, Ukraine

³Technological-Natural University. 7 Al. prof. S. Kaliskiego, 85796, Bydgoszcz, Poland

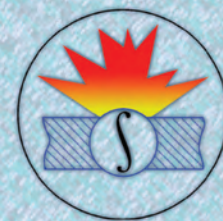
Vibration signals from complex mechanical systems, which are under the impact of dynamic loading, are formed by responses from many assemblies. When studying such signals, the question arises of analysis of the impact of possible defects on their structure, which initiate in each of the elements of the ball bearing assembly. Defect initiation in mechanical system elements results in nonlinear effects in the properties of vibrations. Such effects lead both to appearance of new harmonics in the deterministic component of vibration, and to interaction of this component with stochastic oscillations, which are due to fluctuations of the thickness and viscosity of lubrication, changes of friction forces, spontaneous and uncontrollable changes of working loads, etc. The above interaction leads to violation of the strict periodicity of deterministic oscillations, they are modulated by phase and amplitude. The noted features of vibrations can be adequately described by a mathematical model in the form of mutual periodically correlated random processes. The work presents the integral function of coherence, which quantitatively characterizes the stochastic inter-relation between the properties of non-stationarity of two periodically correlated random signals that is manifested in the periodical change in time of their mutual spectral characteristics, as well as component function of coherence, which is determined by mutual spectral densities of individual modulating processes. Technical characteristics of the developed specialized nondestructive testing device «Compact-Vibro» are given. Results are considered, which were obtained using this device during performance of vibration examinations of industrial facilities of Ukraine. 6 Ref., 32 Fig.

Keywords: periodically correlated random processes, coherence function, nondestructive testing device, vibration signal, diagnostics

Надійшла до редакції
02.12.2019

X МІЖНАРОДНА КОНФЕРЕНЦІЯ «Математичне моделювання та інформаційні технології в зварюванні та споріднених процесах»

**Україна, Одеса, готель «Аркадія»
14 – 18 вересня 2020 р.**



**Національна академія наук України
Інститут електрозварювання ім. Є.О. Патона НАН України
Міжнародна Асоціація «Зварювання»**

Для участі в конференції необхідно заповнити реєстраційну картку і разом з тезами доповіді направити її в Оргкомітет до 19 червня 2020 р. До початку конференції будуть видані тези доповідей.

Збірники праць дев'яти попередніх конференцій «Математичне моделювання та інформаційні технології в зварюванні та споріднених процесах» знаходяться у відкритому доступі на сайті:
<http://patonpublishinghouse.com/rus/proceedings>

Контрольні дати

Надання заявок на участь та тез доповідей	до 19.06.2020 р.
Розсилка другого інформаційного повідомлення та підтвердження участі	до 17.07.2020 р.
Оплата реєстраційного внеску	до 15.09.2020 р.

Оргкомітет

ІЕЗ ім. Є.О. Патона НАН України
вул. Казимира Малевича 11
м. Київ, 03150, Україна
тел. / факс: (38044) 200-82-77, 205-22-26
E-mail: journal@paton.kiev.ua
<http://pwi-scientists.com/rus/mmi2020>