



## РОЗРОБКА ВІБРОДІАГНОСТИЧНОЇ СИСТЕМИ ДЛЯ ВИЗНАЧЕННЯ ДЕФЕКТІВ ПРОМИСЛОВОГО ОБЛАДНАННЯ З ВИКОРИСТАННЯМ МЕТОДІВ НЕСТАЦІОНАРНОЇ СТАТИСТИЧНОЇ ОБРОБКИ ВІБРАЦІЙНИХ ТА АКУСТИЧНИХ КОЛИВАНЬ

І.М. ЯВОРСЬКИЙ, Р.М. ЮЗЕФОВИЧ, І.Б. КРАВЕЦЬ, І.Й. МАЦЬКО, І.Г. СТЕЦЬКО  
ФМІ ім. Г.В. Карпенка НАНУ. 79060, м. Львів, вул. Наукова, 5. E-mail: vgryb@mail.ru

Представлено багатомірну модель стохастичних вібраційних сигналів у вигляді взаємозв'язаних періодично корельованих випадкових процесів. Проаналізовані алгоритми й створено програмне забезпечення для обчислення за експериментальними даними взаємоспектральної густини та взаємоспектральних компонентів періодично нестационарних випадкових вібрацій, а також середньочасової та покомпонентної функції когерентності. Наведені технічні характеристики розробленої вібродіагностичної системи ПУЛЬС з керованими частотними характеристиками. Розглянуто результати, отримані з використанням цієї системи при виконанні вібраційних обстежень промислових об'єктів України. Бібліогр.7, рис. 6.

*Ключові слова:* багатомірні нестационарні вібраційні сигнали, взаємкореляційний та взаємоспектральний аналізи, функція когерентності, діагностичні ознаки, вібродіагностична система

Робота направлена на вивчення зв'язків між імовірнісними характеристиками багатомірних періодично нестационарних вібраційних сигналів з параметрами, що описують технічний стан об'єктів тривалої експлуатації (машин і агрегатів з циклічними режимами роботи, трубопроводів) та розробку нових ефективних методів і засобів їх контролю та діагностики. Метою проекту було створення віброакустичної переносної системи для діагностики зубчастих передач, підшипникових вузлів, валів великих механічних систем, підземних комунікацій та для ідентифікації джерел вібраційних коливань. В основу роботи покладено розробку спектральної теорії багатомірних періодично нестационарних вібраційних сигналів та методів їх емпіричного спектрального аналізу; розробку і створення блоків одночасного відбору вібраційних сигналів у різних точках об'єкта за допомогою перетворювачів механічних коливань, блока попередньої обробки і введення даних у персональний комп'ютер; обґрунтування алгоритмів і створення алгоритмічного забезпечення для визначення параметрів сигналів, обґрунтування діагностичних ознак для виявлення дефектів і їх розділення; виготовлення, налагодження, випробовування інформаційно-вимірювальної системи ПУЛЬС при проведенні вібраційних обстежень промислових об'єктів України.

**Імовірнісні характеристики взаємозв'язаних періодично нестационарних вібраційних сигналів.** Математична модель вібраційних сигналів у ви-

гляді періодично корельованих випадкових процесів (ПКВП) дає можливість описати дві важливі їх властивості: циклічність та стохастичність. Перша з них зумовлена циклічними детермінованими силами, що виникають у процесі роботи механізмів, а друга пов'язана з процесами тертя, спонтанними ударами, турбулентністю мастил і т. п. При цьому взаємодія стохастичності та циклічності є ознакою виникнення дефекту. Така взаємодія, як показали наші попередні дослідження, може бути описана імовірнісними характеристиками ПКВП: кореляційною функцією, спектральною густиною та їх коефіцієнтами Фур'є. З використанням цих характеристик дефекти вдається виявляти вже на ранніх стадіях розвитку [1–3].

У випадку складних та великих механічних систем доцільно використовувати набір первинних перетворювачів, розміщених на об'єкті, оскільки місце виникнення дефекту є априорі невідомим. При цьому віброакустичні хвилі поширюються й досягають первинних перетворювачів за різних умов. Використання взаємкореляційного та взаємоспектрального аналізів уможливорює локалізацію дефектів і розділення їх джерел, що дозволяє розробити відповідну методику неруйнівного контролю стану механічних систем, розширюючи тим самим можливість одномірної діагностики.

Взаємкореляційна функція зв'язаних ПКВП  $\xi(t)$  і  $\eta(t)$  є періодичною функцією часу

$$b_{\xi\eta}(t, u) = E \overset{\circ}{\xi}(t) \overset{\circ}{\eta}(t + u) = b_{\xi\eta}(t + T, u),$$



$\overset{\circ}{\xi}(t) = \xi(t) - m_{\xi}(t)$ ,  $m_{\xi}(t) = E\xi(t)$ ,  $\overset{\circ}{\eta}(t) = \eta(t) - m_{\eta}(t)$ ,  $m_{\eta}(t) = E\eta(t)$  і може бути представлена рядом Фур'є:

$$b_{\xi\eta}(t, u) = \sum_{k \in \mathbb{Z}} B_k^{(\xi\eta)}(u) e^{ik\omega_0 t}, \quad \omega_0 = \frac{2\pi}{T}.$$

Величини  $B_k^{(\xi\eta)}(u)$  називають взаємочореляційними компонентами. Взаємочореляційні компоненти вищих номерів  $B_k^{(\xi\eta)}(u)$ ,  $k \neq 0$ , характеризують зв'язки між властивостями нестационарності двох ПКВП-сигналів. Періодично змінюється за часом і взаємоспектральна густина

$$f_{\xi\eta}(\omega, t) = \frac{1}{2\pi} \int_{-\infty}^{\infty} b_{\xi\eta}(t, u) e^{-i\omega u} du = \sum_{k \in \mathbb{Z}} f_k^{(\xi\eta)}(\omega) e^{ik\omega_0 t},$$

де

$$f_k^{(\xi\eta)}(\omega) = \frac{1}{2\pi} \int_{-\infty}^{\infty} B_k^{(\xi\eta)}(u) e^{-i\omega u} du.$$

Виходячи з гармонічних представлень ПКВП-сигналів:

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

де  $\xi_k(t)$  і  $\eta_k(t)$  – стаціонарно зв'язані випадкові процеси, для взаємочореляційних і взаємоспектральних компонентів маємо:

$$B_k^{(\xi\eta)}(u) = \sum_{q \in \mathbb{Z}} R_{q-k, q}^{(\xi\eta)}(u) e^{iq\omega_0 u},$$

$$f_k^{(\xi\eta)}(\omega) = \sum_{q \in \mathbb{Z}} f_{q-k, q}^{(\xi\eta)}(\omega - q\omega_0). \quad (1)$$

При цьому \_\_\_\_\_

$R_{pq}^{(\xi\eta)}(u) = E\overset{\circ}{\xi}_p(t)\overset{\circ}{\eta}_q(t+u)$ ,  $\overset{\circ}{\xi}_p(t) = \xi_p(t) - m_p^{(\xi)}$ ,  $\overset{\circ}{\eta}_q(t) = \eta_q(t) - m_q^{(\eta)}$ ,  $m_p^{(\xi)} = E\xi_p(t)$ ,  $m_q^{(\eta)} = E\eta_q(t)$ ; «—» – знак спряження;  $f_{pq}^{(\xi\eta)}(\omega)$  – взаємоспектральні густини стаціонарних компонентів  $\overset{\circ}{\xi}_p(t)$  і  $\overset{\circ}{\eta}_q(t)$ .

Зі співвідношень (1) випливає, що  $B_k^{(\xi\eta)}(u) \neq 0$ ,  $k \neq 0$ , а отже і  $f_k^{(\xi\eta)}(\omega) \neq 0$  тільки в тому випадку, коли стаціонарні компоненти  $\overset{\circ}{\xi}_p(t)$  і  $\overset{\circ}{\eta}_q(t)$  різних номерів  $p \neq q$  є корельованими.

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

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

Ця величина характеризує ступінь корельованості між спектральними компонентами сигналу  $\xi(t)$  на частоті  $\omega - k\frac{\omega_0}{2}$  і сигналу  $\eta(t)$  на частоті  $\omega + k\frac{\omega_0}{2}$ . Якщо сигнали  $\xi(t)$  і  $\eta(t)$  є результатами лінійних перетворень одного й того ж ПКВП-сигналу  $\zeta(t)$  (рис. 1), то

$$\gamma_k^{(\xi\eta)}(\omega) = \frac{\left| f_k^{(\zeta)}\left(\omega + k\frac{\omega_0}{2}\right) \right|}{\left[ f_0^{(\zeta)}\left(\omega - k\frac{\omega_0}{2}\right) f_0^{(\zeta)}\left(\omega + k\frac{\omega_0}{2}\right) \right]^{\frac{1}{2}}}. \quad (3)$$

Зі співвідношення (3) випливає, що функція когерентності двох ПКВП-сигналів, отриманих у результаті різних лінійних перетворень одного й того ж ПКВП-сигналу, дорівнює функції автокогерентності вхідного сигналу. А це означає, що при лінійних перетвореннях функція автокогерентності сигналу не змінюється, тобто є інваріантом.

Періодично-нестационарно зв'язаними два ПКВП-сигнали будуть тільки у випадку, коли існують такі  $k \neq l$ , що  $f_{kl}^{(\xi\eta)}(\omega) \neq 0$ . Для характеристики такої зв'язності введемо покомпонентну функцію когерентності:

$$\gamma_{kl}(\omega) = \frac{\left| f_{kl}^{(\xi\eta)}(\omega) \right|}{\left[ f_{kk}^{(\xi)}(\omega) f_{ll}^{(\eta)}(\omega) \right]^{\frac{1}{2}}}. \quad (4)$$

Ця функція, як і величина (4), не змінюється при лінійних перетвореннях.

Щоб розрізнити величини (3) і (4), першу з них називатимемо середньочасовою функцією автокогерентності. Відмінність від нуля функції  $\gamma_{kl}^2(\omega)$  для будь-яких  $k \neq l$ , як і функції  $\gamma_k^2(\omega)$  для будь-яких  $k \neq 0$ , є необхідною і достатньою умовою періодично-нестационарної зв'язаності двох ПКВП-сигналів.

Функція когерентності (3) є загальною характеристикою пов'язаності властивостей нестационарності сигналів. Вона визначає ступінь корельованості спектральних компонентів сигналів. Покомпонентна функція когерентності (4), характеризуючи кореляційні зв'язки між випадковими

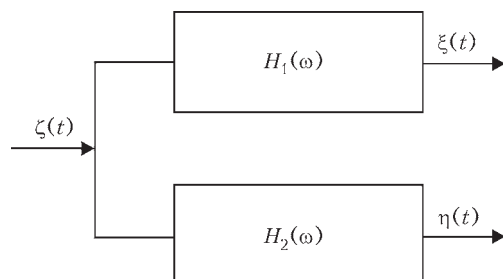


Рис. 1. Схема формування сигналів ( $H_1(\omega)$  і  $H_2(\omega)$  – передавальні функції лінійних перетворень)



процесами, які модулюють основні гармонічні складові сигналів, дає можливість більш детально проаналізувати структуру цієї пов'язаності. Такий аналіз є важливим з тієї причини, що стохастична модуляція гармонік зумовлена власне появою дефектів, тому його результати можуть бути використані для більш ефективного розділення дефектів і встановлення їх типів.

Обчислення функції когерентності (3) за експериментальними даними може бути проведено на основі попереднього оцінювання авто- та взаємоспектральних компонентів [4]:

$$\hat{f}_k^{(\xi, \eta)}(\omega) = \frac{\Delta u}{2\pi} \sum_{r=-L}^{L-1} k(r\Delta u) \hat{B}_k^{(\xi, \eta)}(r\Delta u) e^{-i\omega r\Delta u}, \quad (5)$$

$$\hat{f}_k^{(\xi \eta)}(\omega) = \frac{\Delta u}{2\pi} \sum_{r=-L}^{L-1} k(r\Delta u) \hat{B}_k^{(\xi \eta)}(r\Delta u) e^{-i\omega r\Delta u}, \quad (6)$$

де  $k(u)$  – кореляційне вікно.

Похибка такого обчислення функції когерентності буде допустимою, якщо величини зміщень та дисперсій оцінок спектральних компонентів не перевищуватимуть певних наперед заданих величин.

Для обчислення покомпонентної функції когерентності (4) потрібно спочатку з реалізацій ПКВП-сигналів виділити їх стаціонарні компоненти і на основі отриманих даних провести оцінювання їх авто- та взаємоспектральних густин. Один з методів виділення стаціонарних компонентів полягає в застосуванні перетворення [3, 5]

$$\xi_k(t) = \int_{-\infty}^{\infty} h(t-\tau) \xi(\tau) e^{-ik\omega_0\tau} d\tau,$$

де  $h(\tau) = \frac{1}{\pi\tau} \sin \frac{\omega_0\tau}{2}$  – імпульсний відгук смугово-го фільтра, передавальна функція якого має вигляд

$$H(\omega) = \begin{cases} 1, & \omega \in \left[-\frac{\omega_0}{2}, \frac{\omega_0}{2}\right], \\ 0, & \omega \notin \left[-\frac{\omega_0}{2}, \frac{\omega_0}{2}\right]. \end{cases}$$

Оцінки авто- та взаємоспектральних густин можна обчислити, використовуючи метод Блекмана-Г'юкі:

$$\hat{f}_{kl}^{(\xi, \eta)}(\omega) = \frac{\Delta u}{2\pi} \sum_{r=-L}^{L-1} k(r\Delta u) \hat{R}_{kl}^{(\xi, \eta)}(r\Delta u) e^{-i\omega r\Delta u}, \quad (7)$$

$$\hat{f}_{kl}^{(\xi \eta)}(\omega) = \frac{\Delta u}{2\pi} \sum_{r=-L}^{L-1} k(r\Delta u) \hat{R}_{kl}^{(\xi \eta)}(r\Delta u) e^{-i\omega r\Delta u}, \quad (8)$$

де  $\hat{R}_{kl}^{(\xi, \eta)}(r\Delta u)$  і  $\hat{R}_{kl}^{(\xi \eta)}(r\Delta u)$  – оцінки відповідних кореляційних функцій.

Щоб забезпечити потрібні похибки оцінок функцій когерентності (3) і (4), параметри обробки необхідно вибирати так, щоб величини похи-

бок обчислення (5)–(8) не перевищували допустимих меж.

**Вібродіагностична система ПУЛЬС.** На основі розробленої методології аналізу стохастичних коливань з використанням сучасних елементів мікроелектроніки та відповідного програмного забезпечення у Фізико-механічному інституті ім. Г.В. Карпенка НАН України в лабораторії вібродіагностики створена мобільна вібродіагностична система ПУЛЬС. Вона призначена для відбору та обробки вібраційних сигналів обертових механізмів з метою виявлення і попередження дефектів на ранніх стадіях їх зародження, для попередження аварійних ситуацій на турбогенераторах, нафтоперекачувальних станціях, бурильних установках, для діагностики тіл обертання, електродвигунів, газоперекачувальних агрегатів, порталних кранів, електрогенеруючих установок (високовольтні трансформатори в тому числі) і т.п.

Структурна схема вібраційної діагностичної системи ПУЛЬС показана на рис. 2.

Система складається з таких основних вузлів: диференціальних підсилювачів сигналу для роботи як з електронними, так і п'єзокерамічними давачами віброприскорення; фазолінійних фільтрів 8-го порядку; схеми управління частоти зрізу фільтрів низьких частот; швидкодіючого аналого-цифрового перетворювача E20-10 фірми L-card [6, 7]; каналу синхронізації відбору сигналів; модуля регулятора температури; блоку живлення та персонального комп'ютера.

Для узгодження п'єзокерамічних давачів віброприскорення використовуються перетворювач заряду, побудований на спеціалізованій інтегральній мікросхемі фірми Analog Devices типу AD745. З метою розширення функціональних можливостей, а також використання розроблених електронних давачів віброприскорення на базі сенсора ADXL001, що добре зарекомендували себе в роботі в реальних умовах, додатково введена схема узгодження сигналу згаданого сенсора з аналого-цифровим перетворювачем.

На рис. 3 представлена система ПУЛЬС.

Керування смугою пропускання фазолінійних фільтрів низьких частот встановлюється дискретно в широкому діапазоні значень на початку відбору вібраційних сигналів. Послаблення (заникання) сигналу на подвійній частоті зрізу ( $2F_{\text{cd}3\text{co}}$ ) становить не менше, як 43 дБ (141 раз по напрузі).

У якості давача віброприскорення вибраний п'єзокерамічний акселерометр типу ABC117, власна резонансна частота якого знаходиться в межах 100 кГц.

Основою системи є швидкодіючий модуль аналого-цифрового перетворення E20-10 з USB2 інтерфейсом. Його основні властивості: забезпечення неперервного 16-бітового збору даних по USB2

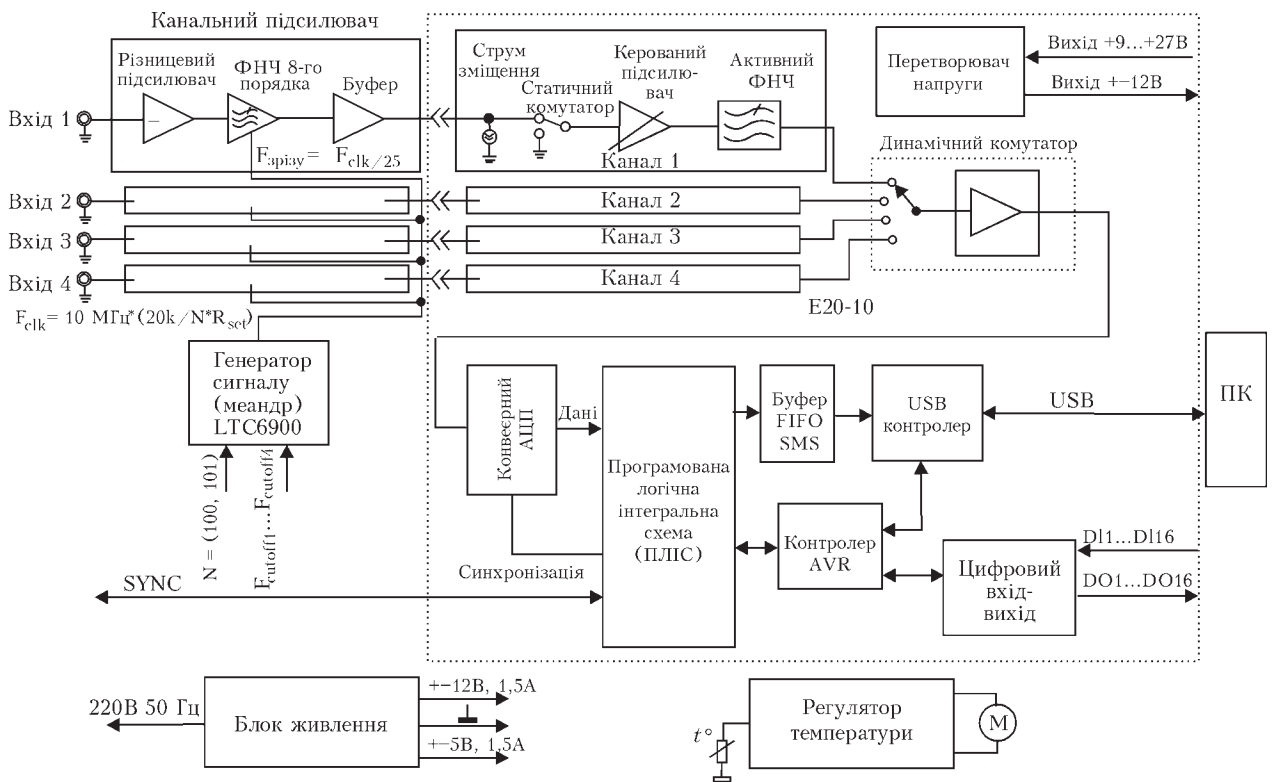


Рис. 2. Структурна схема вібраційної діагностичної системи ПУЛЬС

інтерфейсу; можливість програмного встановлення чутливості по кожному із каналів; частота перетворення аналого-цифрового перетворювача встановлюється програмно від 1 до 10 МГц; багаторежимна синхронізація старту збору даних.

Максимальна тактова частота аналого-цифрового перетворювача складає 10 МГц, що дасть можливість обробляти вхідні аналогові сигнали зі

смугою пропускання до 1,25 МГц при одночасно включених чотирьох каналах відбору інформації.

**Дослідження вібраційного стану промислових об'єктів.** Наведемо приклади застосування покомпонентної функції когерентності (4) для розділення джерел дефектів підшипників ковзання турбоагрегатів Добротвірської ТЕС та встановлення їх типів. Моніторинг вібраційного стану підшипників проводився за допомогою переносної вібродіагностичної системи ПУЛЬС. Акселерометри Analog Device розміщувалися на корпусі вузла. Частота відбору 2 кГц, час відбору 20 с.

Статистична обробка сигналів проводилася з використанням розвинутих авторами проекту методів статистики ПКВП, при цьому попередньо здійснювався пошук прихованих періодичностей у часових змінах як детермінованої, так і стохастичної складових сигналів. Оцінки періодів нестационарності знаходилися за допомогою компонентного методу та методу найменших квадратів. На початкових стадіях досліджень була виявлена відносно слабка взаємодія детермінованої та стохастичної складових, про

**Основні електричні параметри давача віброприскорення**

Коефіцієнт перетворення в амплітудному значенні по напрузі	0,11±0,016 мВ/г
Коефіцієнт перетворення в амплітудному значенні по заряду	0,24±0,08 пКл/г
Ємність, не більше	2200±330 пФ
Власна резонансна частота, не менше	90 кГц
Нерівномірність амплітудно-частотної характеристики в діапазоні частот	від 100 до 5000 Гц ± 1дБ
Основна похибка, не більше	±10 %

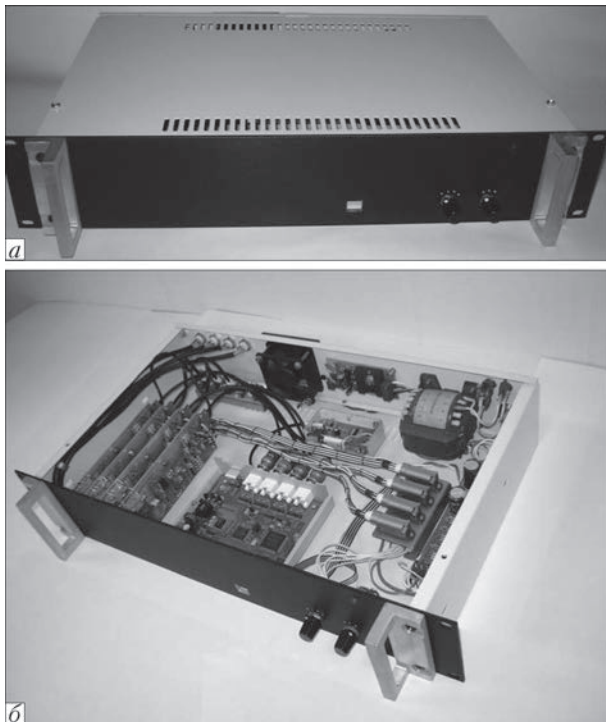


Рис. 3. Система ПУЛЬС: а – зовнішній вигляд; б – внутрішній



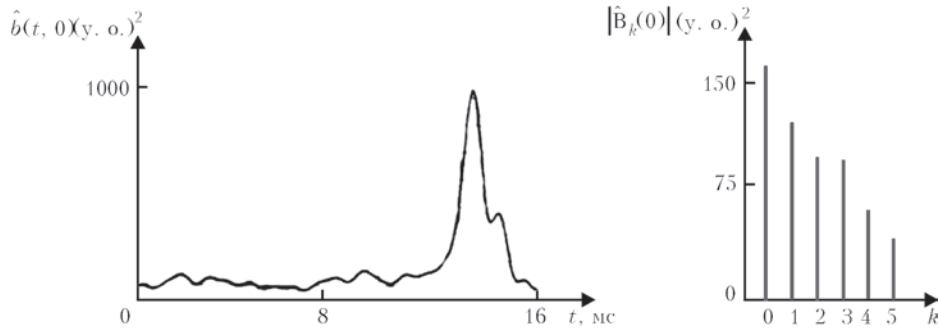


Рис. 4. Оцінки дисперсії та її коефіцієнтів Фур'є для розвинутого дефекту

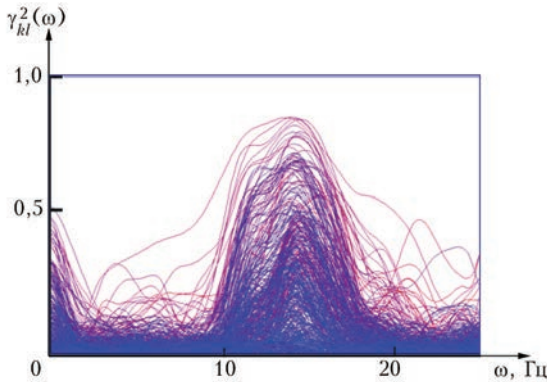


Рис. 5. Оцінки покомпонентних функцій когерентності випадкової складової сигналу

що свідчать відносно незначні зміни з часом оцінок імовірнісних характеристик другого порядку – дисперсії, кореляційної функції та спектральної густини. З розвитком дефекту ці зміни стають дедалі глибшими. На рис. 4 представлені оцінки дисперсії та її коефіцієнтів Фур'є, отримані на основі реалізації вібраційного сигналу, відібраного при розвинутому дефекті. З використанням лінійної смугової фільтрації [3, 5] були виділені стаціонарні компоненти сигналу і проведено їх взаємкореляційний і взаємспектральний аналізи.

Оцінки покомпонентних функцій когерентності для різних номерів корельованих стаціонарних модулюючих процесів представлені у вигляді сумісних графіків на рис. 5.

Видно, що більшість стаціонарних компонент корелюють між собою в смузі 13...16 Гц, а максимуму функції когерентності досягають в точці, близькій до 16 Гц. Даний факт дає змогу стверджувати про наявність дефекту «обертвий зрив». Такий висновок підтверджується також аналізом оцінок спектральних компонентів ПКВП, які отримуються на основі оцінок взаємспектральних густин стаціонарних компонентів.

Використання покомпонентної функції когерентності виявилось ефективним при встановленні й інших дефектів підшипникових вузлів, в тому числі збільшення зазору між шийкою вала й бабітовим вкладишем та підшипника з дефектом «вихрова змазка». В першому випадку оцінка покомпонентної функції когерентності досягає мак-

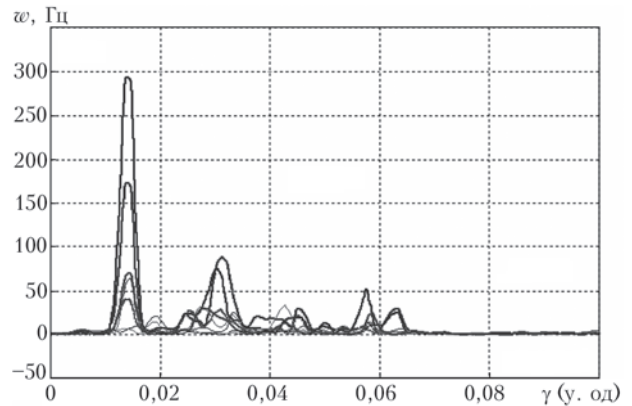


Рис. 6. Покомпонентні функції когерентності підшипника кочення

симуму при 25 Гц, а в другому – 23 Гц, що дає змогу ідентифікувати типи дефектів.

З використанням покомпонентної функції когерентності було проведено ідентифікацію дефектів підшипника кочення механізмів на ряді підприємств України. На рис. 6 представлено функцію когерентності двомірних вібраційних сигналів підшипника кочення SKF 7212 BECBM, який міститься в компресорі низького тиску на підприємстві «Компанія ЕНЗИМ «ТМ «Львівські дріжджі». З рисунку видно, що на покомпонентних функціях підшипника кочення є піки, які зумовлені одним і тим же дефектом, а саме дефектом підшипника кочення на зовнішньому кільці.

Верифікація підходу також була проведена з використанням вібромеханічного стенду у лабораторії вібродіагностики та при обробці модульованих вібраційних сигналів з дефектами на зовнішньому і внутрішньому кільцях. Така симуляція була проведена шляхом використання числового розв'язування нелінійних диференціальних рівнянь 2-го порядку, які описують двомірні вібраційні сигнали підшипників кочення.

### Висновки

Розроблено нову багатоканальну переносну вібродіагностичну систему ПУЛЬС з керованими частотними характеристиками. Завдяки використанню швидкодіючого аналого-цифрового перетворювача при відповідних давачах система дає можливість реєструвати сигнали до 5 МГц при одноканальному, 2,5 МГц при двоканальному та



1,25 МГц при чотириканальному варіантах відбору вібраційних сигналів. Система може здійснити попередню обробку вібраційних сигналів у реальному часі з можливістю зберігання їх для подальшої обробки.

Створено алгоритмічне забезпечення для взаємодіяційного і взаємодіального аналізу періодично нестационарних вібраційних сигналів, в тому числі для обчислення введених функцій когерентності двох типів. Перша з них є загальною характеристикою пов'язаності властивостей нестационарності сигналів, вона визначає ступінь корельованості гармонічних складових сигналів. Друга – характеризує кореляційні зв'язки між випадковими процесами, які модулюють основні гармонічні складові сигналів, що дає можливість більш детально проаналізувати структуру цієї пов'язаності. Обидві функції когерентності є інваріантами відносно лінійних перетворень. Оскільки поява дефектів супроводжується нелінійними ефектами, то ці величини доцільно використовувати при розділенні джерел дефектів, а їх частотні залежності – для встановлення їх типів.

З використанням покомпонентної функції когерентності проведено аналіз дефектів, які виникають у підшипникових вузлах промислового обладнання на підприємствах України.

1. Назарчук З.Т., Яворський І.М., Михайлишин В.Ю. Застосування теорії періодично корельованих випадкових процесів до раннього виявлення дефектності обертових систем // 3-я Міжн. конф. «Механіка руйнування матеріалів і міцність конструкцій». – Львів, 2004. – С. 403–410.
2. Методи і засоби ранньої діагностики обертових механізмів / І.М. Яворський, П.П. Драбич, І.Б. Кравець та ін. // Праці Міжн. наук.-техн. конф. «Ресурс, надійність та ефективність використання енергетичного обладнання». – Харків, 2010. – С. 31–38.
3. Яворський І.М. Математичні моделі та аналіз стохастичних коливань. – Львів: ФМІ НАН України, 2013. – 802 с.
4. Когерентний взаємодіальний аналіз періодично нестационарних вібраційних сигналів / І.М. Яворський, Р.М. Юзефович, І.Й. Мацько, В.Б. Шевчик // Відбір і обробка інформації. – 2014. – № 41 (117). – С. 12–19.
5. Linear filtration methods for statistical analysis of periodically correlated random processes - Part II :Harmonic series representation / I. Javorskyj, J. Leskow, I. Kravets et al. // Signal Processing. – 2011. – 91. – P. 2506–2519.
6. Гарманов А.В. Подключение электроизмерительных приборов. Решение вопросов электросовместимости и помехозащищенности. – М.: Изд-во Машиностроение, 2003. – 39 с.
7. Гарманов А.В. Устройство для мобильных систем E20-10. Руководство пользователя. – М., 2012. – 61 с.

The paper presents a multidimensional model of stochastic vibration signals in the form of interrelated periodically correlated random processes. Algorithms were analyzed, and software was developed for computation by experimental data of mutually spectral density and mutually spectral components of periodically non-stationary random vibrations, as well as time-averaged and componentwise coherence functions. Technical characteristics of the developed vibrodiagnostic system PULS with controllable frequency characteristics are given. Results, obtained with application of this system during performance of vibratory analysis of industrial facilities of Ukraine, are considered. 7 References, 6 Figures

*Keywords* : multidimensional non-stationary vibration signals, cross-correlation and mutually spectral analyses, coherence function, diagnostic indications, vibrodiagnostic system

Надійшла до редакції  
10.08.2015

## КАЛЕНДАРЬ КОНФЕРЕНЦИЙ И ВЫСТАВОК ПО НК В 2016 г.

Событие	Дата и место проведения	Контакты
6 <sup>th</sup> Conference on Industrial Computed Tomography	09.02-12.02.2016 Wels/Austria	<a href="http://www.3dct.at/cms2/index.php/en/welcome-2">www.3dct.at/cms2/index.php/en/welcome-2</a>
16 <sup>th</sup> European ALARA Network Workshop	14.03-16.03.2016 Berne/ Switzerland	<a href="http://www.eu-alara.net">www.eu-alara.net</a>
Control - Internationale Fachmesse für Qualitätssicherung	26.04-29.04.2016 Stuttgart/ Germany	<a href="http://www.control-messe.de/control">www.control-messe.de/control</a>
19 <sup>th</sup> World Conference on Non-Destructive Testing	13.06-17.06.2016 Miinchen/ Germany	<a href="http://www.wcndt2016.com">www.wcndt2016.com</a>
Inno Trans 2016	20.09-23.09.2016 Berlin/Germany	<a href="http://www.innotrans.de">www.innotrans.de</a>