

МЕТОДИ ТА ЗАСОБИ РАННЬОЇ ВІБРОДІАГНОСТИКИ ПІДШИПНИКОВИХ ВУЗЛІВ ОБЕРТОВИХ МЕХАНІЗМІВ

І.М. Яворський^{1,2}, Р.М. Юзефович^{1,3}, О.В. Личак¹, М.З. Варивода¹, І.Г. Стецько¹

¹Фізико-механічний інститут ім. Г. В. Карпенка НАН України. 79060, м. Львів, вул. Наукова, 5.
E-mail: roman.yuzefovych@gmail.com

²Технологічно-природничий університет, інститут телекомунікації. 85796, Польща, м. Бидгощ, алея проф. С. Каліського, 7

³Національний університет «Львівська політехніка». 79013, м. Львів, вул. С. Бандери, 12

Наведено характеристики методів і засобів вібродіагностики обертових вузлів механізмів на основі моделей сигналів вібрації у вигляді періодично корельованих випадкових процесів. Такі моделі дають можливість виявляти та аналізувати взаємодію повторюваності та стохастичності у властивостях вібрації, яка є характерною при появі дефектів. Такий підхід суттєво підвищує ефективність раннього виявлення дефектів та встановлення їх типів. Описано основні етапи статистичної обробки вібросигналів з метою визначення діагностичних ознак. Представлено розроблені та створені вібродіагностичні системи ВЕКТОР, ПУЛЬС та КОМПАКТ-ВІБРО. Наведено технічні характеристики цих систем. Бібліогр. 33, табл. 1, рис. 1.

Ключові слова: вібродіагностика, неруйнівний контроль, вібраційний сигнал, періодично корельований випадковий процес, спеціалізовані пристрої, дефект, підшипник

Забезпечення безаварійної та безперебійної роботи механізмів тривалої експлуатації вимагає детального перспективного планування їх технічного обслуговування та ремонтів на тривалій період. Таке планування, окрім чисто економічного аспекту (забезпечення безперебійної роботи обладнання, економії на постачанні запасних частин, оптимізації та здешевлення ремонтно-профілактичних робіт), повинно забезпечуватись інтегрованими інформаційно-вимірювальними системами діагностування технічного стану обладнання. Системи діагностування повинні не лише інтегрально класифікувати стан досліджуваних механізмів чи машин, але й виявляти та класифікувати дефекти на ранніх стадіях їх розвитку, оцінювати ступінь пошкодження, що власне і дозволяє проводити перспективне планування ремонту обладнання. Тобто, під час проведення планових і поточних робіт необхідно визначати такі діагностичні ознаки в роботі механізмів, які реагують на незначні відхилення параметрів технічного стану в межах заданих норм. У випадку машин та обертових механізмів таким інструментом діагностування є дослідження тонкої структури вібраційних сигналів та їх зв'язку з кінематикою та динамікою механізмів. Опис такої структури вимагає адекватних математичних моделей вібраційних сигналів, які відображають параметри, що є необхідними для встановлення стану елементів системи. Повторюваність і стохастичність є характерними ознаками вібраційних коливань у механізмах. Повторюваність задається циклічним принципом дії механізмів, а стохастичність є о-

Юзефович Р.М. – <http://orcid.org/0000-0001-5546-453X>, Яворський І.М. – <http://orcid.org/0000-0003-0243-6652>, Личак О.В. – <http://orcid.org/0000-0001-5559-1969>

накою неоднорідностей та нелінійностей в системі. Причому ці обидві особливості виступають у властивостях взаємодії як риси одного періодично корельованого випадкового процесу (ПКВП).

Адекватними моделями для опису та аналізу цієї взаємодії є періодично та майже періодично нестационарні випадкові процеси (в рамках теорії другого порядку – періодично та майже періодично корельовані) [1, 2]. Підхід, що ґрунтується на таких моделях, був вперше апробований при аналізі сигналів вібрації підшипників опор турбоагрегатів ТЕС [3–7] і показав свою ефективність [1, 2, 8, 9]. Дефекти обертових механізмів проявляються, зокрема, у змінах в структурі вібраційних сигналів – у появі нових гармонічних складових та їх модуляціях. Імовірнісні характеристики ПКВП є носіями інформації про такі зміни, тому вони можуть використовуватися безпосередньо для діагностики та бути основою для формування нових діагностичних ознак. Ці ознаки згодом можуть використовуватися для виявлення дефектів на ранніх стадіях їх розвитку. Останнім часом підхід до аналізу вібраційних сигналів на основі ПКВП розвивається багатьма вченими [10–12]. Зокрема, J. Antoni назвав концепцію, яка ґрунтується на аналізі вібраційних сигналів методами ПКВП і їх узагальнень та використання результатів до оцінки стану об'єктів, революційною [13]. В англійській літературі також розвивається методологія, що ґрунтується на результатах, отриманих в теорії ПКВП (W. Gardner, H. Hurd, A. Napolitano [14–16]). Для задач діагностики тут використовується підхід, що ґрунтується на аналізі

© І.М. Яворський, Р.М. Юзефович, О.В. Личак, М.З. Варивода, І.Г. Стецько, 2021

двочастотної спектральної густини. Задача виявлення дефектів зводиться до пошуку корельованості в частотній області. Такий підхід вимагає громіздких обчислень і важко піддається статистичному аналізу, зокрема, при отриманні оцінок статистичної похибки обробки даних. Ми в своїх дослідженнях виходимо з оригінальних результатів теорії і статистики ПКВП, отриманих у часо-частотній області. Такі дослідження проведені з використанням комплексу ймовірнісних характеристик першого та другого порядків: математичного сподівання, кореляційної функції, змінної у часі спектральної густини та коефіцієнтів їх розкладу у ряди Фур'є. У даній статті коротко охарактеризовані ймовірнісні та статистичні основи підходу, розробленого у ФМІ ім. Г.В. Карпенка НАН України. Наведено основні дані про розроблені інформаційно-вимірювальні системи для відбору сигналів вібрації та визначення їх діагностичних параметрів. Методична та діагностична база таких систем ґрунтується на використанні сучасних методів кореляційного та спектрального аналізу вібраційних сигналів як у стаціонарному наближенні, так і з використанням періодично нестационарних властивостей сигналів, що дає змогу виявляти дефекти обертових вузлів на ранніх етапах їх зародження.

Перший етап обробки вібраційних сигналів полягає у їх розділенні на детерміновану та стохастичну складові. Аналіз детермінованої складової базується на оригінальних методах виявлення та аналізу прихованих періодичностей. З детермінованою складовою вібраційних сигналів, як правило, пов'язані макродефекти механічних систем, такі, як дисбаланс, ексцентриситет, неспіввісність, биття, зачеплення і т. п. Висновки про дефектність обертового вузла приймаються на основі аналізу амплітудного та фазового спектрів цієї складової. Випадкова складова містить інформацію про нестационарні та нелінійні властивості вібраційного сигналу, які пов'язані з силами тертя, зміною в'язкості мастил, шорсткістю поверхні і т. п. Аналіз випадкової складової, у тому числі характеристик її періодичної нестационарності, дозволяє виявляти дефекти на ранніх стадіях їх розвитку. Періодична нестационарність випадкової складової зумовлена стохастичною модуляцією гармонік, яка спричиняє корельованість гармонічних складових спектру [1, 2, 6–9]. Ця корельованість є однією з найчутливіших ознак появи дефектів.

Модель вібраційного сигналу $\zeta(t)$ складних машинних комплексів задається у вигляді:

$$\zeta(t) = s(t) + \eta(t),$$

де $s(t)$ – детермінована складова сигналу; $\eta(t) = \xi(t) + \varepsilon(t)$ – випадкова складова сигналу, де $\xi(t)$ – пері-

одично нестационарна складова; $\varepsilon(t)$ – стаціонарний фоновий шум, при цьому випадкові процеси $\varepsilon(t)$ та $\eta(t)$ є некорельованими. Детермінована складова $s(t)$ описується майже періодичною функцією:

$$s(t) = \sum_{k=-M}^M c_k e^{i\omega_k t},$$

де M – число гармонічних складових; c_k – їх комплексні амплітуди; ω_k – частоти. Моделлю нестационарної складової $\xi(t)$ є ПКВП, для якого справедливе гармонічне представлення:

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

де $\xi_k(t)$ – стаціонарно стохастично зв'язані випадкові процеси, які описують стохастичну амплітудну та фазову модуляції основних гармонічних складових ПКВП. Саме кореляційні та спектральні характеристики модулюючих процесів $\xi_k(t)$ є носіями інформації про типи дефектів обертових вузлів. Діагностичні ознаки будуються безпосередньо на основі цих характеристик або з використанням ймовірнісних характеристик ПКВП, сформованого стаціонарними компонентами $\xi_k(t)$.

Математичне сподівання ПКВП $m(t) = E\xi(t)$ і кореляційна функція $b(t, u) = E\xi(t)\xi(t+u)$ $\xi_k(t) = \xi_k(t) - m(t)$, є періодичними функціями часу:

$$m(t) = m(t+T), \quad b(t, u) = b(t+T, u)$$

і можуть бути представлені рядами Фур'є:

$$m(t) = \sum_{k \in \mathbb{Z}} m_k e^{ik\omega_0 t},$$

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

Періодично змінюється за часом і миттєва спектральна густина ПКВП – перетворення Фур'є кореляційної функції:

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

де

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

Величини $B_k(u)$ та $f_k(\omega)$ відповідно називають кореляційними і спектральними компонентами. Нульові компоненти $B_0(u)$ і $f_0(\omega)$ описують властивості стаціонарного наближення ПКВП, тобто усереднені кореляційні зв'язки та усереднену за часом спектральну густина потужності флуктуаційних коливань.

Коефіцієнти Фур'є математичного сподівання ПКВП m_k є математичними сподіваннями модулюючих процесів $\xi_k(t)$ у поданні (1), тобто $m_k = E\xi_k(t)$, а кореляційні та спектральні компо-

ненти визначаються авто- та взаємкореляційними функціями та відповідними спектральними густинами цих процесів:

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

$$f_k(u) = \sum_{n \in \mathbb{Z}} f_{n-k,n}(\omega - n\omega_0), \quad (2)$$

де $R_{kl}(u) = E \xi_k(t) \xi_l(t+u)$, $\xi_k(t) = \xi_k(t) - m_k$, « $\bar{\cdot}$ » – знак спряження, а

$$f_{k,l}(\omega) = \frac{1}{2\pi} \int_{-\infty}^{\infty} R_{kl}(u) e^{-i\omega u} du.$$

Як впливає зі співвідношення (2), випадковий процес (1) є ПКВП тоді і тільки тоді, коли процеси, що модулюють різні гармонічні складові, є корельованими. Це означає, що їхні спектри повинні перекриватися.

Для виявлення стохастичної модуляції та ідентифікації типу можливого дефекту на початковому етапі досліджень використовуються діагностичні параметри, які описують періодичну нестационарність першого та другого порядків. Для визначення ступеня цієї нестационарності вибрані коефіцієнти Фур'є математичного сподівання m_k та кореляційні компоненти $B_k(u)$ і введені в розгляд наступні дві діагностичні ознаки:

$$I_1 = \frac{\frac{1}{2} \sum_{k=1}^{N_1} |m_k|^2}{\hat{B}_0(0)}, \quad I_2 = \frac{\sum_{k=1}^{N_2} |B_k(0)|}{B_0(0)}.$$

Перша величина визначає відношення потужності регулярних змін вібросигналу до середньої потужності його флуктуаційних змін, а друга – відношення коливної потужності флуктуацій до їх середньої потужності. Введені ознаки періодичної нестационарності мають властивості міри, вони монотонно зростають при збільшенні потужності регулярних і флуктуаційних коливань вібраційного сигналу. У випадку стаціонарного центрованого випадкового сигналу, коли $m_k \equiv 0$ і $B_k(u) \equiv 0$ для всіх $k \neq 0$, параметри I_1 та I_2 дорівнюють нулю.

Очевидно, що дефекти механізмів також можуть позначатися на характері зникання кореляційних зв'язків модулюючих стохастичних процесів. Для відображення цього ефекту запропоновано третю ознаку:

$$I_3^{(k)} = \frac{\int_{-\infty}^{\infty} |B_k(u)| du}{\int_{-\infty}^{\infty} |B_0(u)| du}, \quad k = \overline{1, N_2},$$

яку називають мірою періодичної корельованості. Для стаціонарного випадку також маємо $I_3^{(k)} = 0$.

Подібні властивості вібраційних сигналів, але вже в частотній області, описує функція спектральної когерентності:

$$C_k(\omega) = \frac{|f_k(\omega)|}{f_0(\omega)}, \quad k = \overline{1, N_2}.$$

Використане тут нормування спектральних компонентів дає можливість підкреслити зв'язок між енергетично слабкими компонентами від незначних дефектів на фоні компонентів, які не мають відношення до ідентифікації дефекту, однак мають значно більшу потужність.

Доцільним є також використання функціоналу спектральної когерентності, котрий визначається у спектральній смузі $[\omega_1, \omega_2]$:

$$I_4^{(k)} = \int_{\omega_1}^{\omega_2} C_k(\omega) d\omega,$$

однак його визначення вимагає великого обсягу обчислень.

Для класифікації дефектів ефективними є ознаки, сформовані на основі кореляційних і спектральних характеристик стаціонарних компонентів ПКВП-моделі вібраційних сигналів, у тому числі нормовані взаємкореляційні функції:

$$r_{kl}(u) = \frac{R_{ll}(u)}{R_{nk}(0) R_{ll}(0)}$$

та функції когерентності:

$$\gamma_{kl}^2(\omega) = \frac{|f_{kl}(\omega)|^2}{f_{kk}(\omega) f_{ll}(\omega)}.$$

Загальна методологічна схема, що використовується для аналізу стану підшипникових вузлів обертових механізмів, є наступною:

- отримують вібраційний сигнал від механічної системи та подають у персональний комп'ютер;
- аналізують отриманий вібраційний сигнал класичними методами теорії статистики стаціонарних випадкових процесів, роблять висновки про загальну структуру вібрації, ідентифікують спектральні піки (особливості) відповідно до структури механізму та частот обертання його елементів;
- наявні піки спектральної густини описують детермінованими складовими вібраційного сигналу та вузькосмуговими процесами, для розділення детермінованої та випадкової складових використовують методи статистики ПКВП і адаптивної фільтрації;
- після вилучення детермінованої складової досліджують її амплітудні та фазові характеристики та на їх основі встановлюють типи дефектів механізму;

– методами сліпого розділення джерел виділяють періодично нестаціонарну складову вібраційного процесу;

– на основі аналізу нестаціонарної складової виявляють часові зміни статистик другого порядку, які вказують на модуляційну природу випадкового процесу, що свідчить про наявність у механізмі дефектів, що розвиваються;

– описують стан підшипникових вузлів обертових механізмів з використанням імовірнісних характеристик періодичної нестаціонарності, зокрема кореляційної функції у ПКВП-наближенні, її амплітудно-фазових характеристик, спектральної густини та її компонентів;

– для уточнення типу дефекту виділяють стаціонарні компоненти періодично нестаціонарної складової вібраційного сигналу, проводять його авто-, взаємо-кореляційний та спектральний аналіз.

Поставлені задачі відбору вібраційних сигналів, їх статистичного аналізу, оцінки ймовірності результатів статистичної обробки, формування діагностичних ознак вирішуються за допомогою розроблених і створених у відділі методів і засобів відбору та обробки діагностичних сигналів ФМІ ім. Г.В. Карпенка НАН України вібродіагностичних систем ВЕКТОР, ПУЛЬС та КОМПАКТ-ВІБРО [17–23] (див. рис.).

Теоретичною основою для принципів побудови цих систем, обґрунтування алгоритмів обробки та створення відповідного програмного забезпечення стали оригінальні результати в області теорії та аналізу стохастичних коливань [24–28], у тому числі і виявлення прихованих періодичностей [29, 30]. Для обчислення оцінок характеристик коливань використовуються когерентний [24] і компонентний [25] методи, метод найменших квадратів [26], методи лінійної гребінчастої та смугової фільтрації [27, 28].

Когерентний метод полягає в усередненні відліків сигналу, відібраних через період T :

$$\hat{m}(t) = \frac{1}{N} \sum_{n=0}^{N-1} \xi(t+nT), \quad (3)$$

$$\hat{b}(t,u) = \frac{1}{N} \sum_{n=0}^{N-1} \xi(t+nT)\xi(t+u+nT) - \hat{m}(t)\hat{m}(t+u+nT) \quad (4)$$

Компонентні оцінки мають вигляд тригонометричних поліномів:

$$\hat{m}(t) = \sum_{k=-N_1}^{N_1} \hat{m}_k e^{ik\frac{2\pi}{T}t}, \quad (5)$$

$$\hat{b}(t,u) = \sum_{k=-N_2}^{N_2} \hat{B}_k(u) e^{i\omega_0 t}, \quad (6)$$

де $N_i, i=1,2$ – номери найвищих гармонік. Коефіцієнти поліномів \hat{m}_k і $\hat{B}_k(u)$ визначаються на основі статистик:

$$\hat{m}_k = \frac{1}{\theta} \int_0^\theta \xi(t) e^{-ik\frac{2\pi}{T}t} dt, \quad (7)$$

$$\hat{B}_k(u) = \frac{1}{\theta} \int_0^\theta [\xi(t) - \hat{m}(t)][\xi(t+u) - \hat{m}(t+u)] e^{-ik\frac{2\pi}{T}t} dt, \quad (8)$$

де θ – довжина відрізка реалізації вібраційного сигналу. Компонентні оцінки формулюються на основі апріорних даних про число гармонічних складових, що містить ряд Фур'є для кожної імовірнісної характеристики, яка обчислюється. Вони є ефективнішими від когерентних, особливо за умови швидкого загасання кореляційних зв'язків зі збільшенням зсуву.

Оцінки найменших квадратів [26] знаходять, мінімізуючи функціонали:

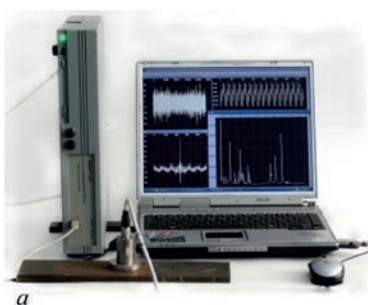
$$F_1[\hat{m}_0, \hat{m}_1^c, \dots, \hat{m}_{N_1}^c, \hat{m}_1^s, \dots, \hat{m}_{N_1}^s] = \int_0^\theta [\xi(t) - \hat{m}(t)]^2 dt, \quad (9)$$

$$F_2[\hat{B}_0(u), \hat{B}_1^c(u), \dots, \hat{B}_{N_2}^c(u), \hat{B}_1^s(u), \dots, \hat{B}_{N_2}^s(u)] = \int_0^\theta [\xi(t)\xi(t+u) - \hat{b}(t,u)]^2 dt \quad (10)$$

Особливістю таких оцінок є відсутність ефектів просочування при всіх значеннях θ .

Для побудови статистик спектральних характеристик використаний корелограмний метод Блекмана-Т'юкі. Для цього вибирають точку усічення корелограми u_m і відповідне згладжувальне вікно $k(u)$. Тоді оцінки миттєвої спектральної густини $f(\omega, t)$ і спектральних компонентів $f_k(\omega)$ знаходять за формулами:

$$\hat{f}(\omega, t) = \frac{1}{2\pi} \int_{-u_m}^{u_m} \hat{b}(t, u) k(u) e^{-i\omega u} du, \quad (11)$$



а



б



в

Вібродіагностичні системи: ВЕКТОР (а), ПУЛЬС (б), КОМПАКТ-ВІБРО (в)

$$\hat{f}_k(\omega) = \frac{1}{2\pi} \int_{-u_m}^{u_m} \hat{B}_k(u) k(u) e^{-i\omega u} du, \quad (12)$$

де $k(-u) = k(u)$, $k(0) = 1$, $k(u) \equiv 0$, при $|u| \geq u_m$. Вибір параметрів обробки реальних сигналів θ і u_m здійснюється на основі статистичних характеристик оцінок (3)–(12) та отриманих аналітично критеріях якості [1, 24, 25].

Наведені вище методи кореляційно-спектрального аналізу ПКВП потребують попереднього знання періоду корельованості T . У багатьох випадках основні періоди збудження механічної системи можуть бути обчислені на основі їх кінематичних схем за умови, коли відомим є період обертання вала двигуна, що приводить у дію машину. Однак обчислені в такий спосіб величини мають недостатню точність і в реальних ситуаціях можуть змінюватися. Тому для ефективного застосування ПКВП-підходу величини періодів слід знаходити на основі отриманої реалізації сигналу. Визначення періоду T і дослідження на основі ПКВП-моделі структури стохастичних коливань можна розглядати як розвиток відомої проблеми про виявлення прихованих періодичностей. Оскільки властивості прихованих періодичностей не завжди проявляються в пікових значеннях спектральної густини стаціонарного наближення, то для оцінювання періоду були розроблені спеціальні методи, які ґрунтуються на виявленні періодичних часових змін імовірнісних характеристик [31–33]. Для цього були застосовані функціонали, що мають вигляд оцінок (3)–(9) з тією різницею, що замість істинного значення періоду T в них була використана деяка пробна величина τ . Оцінки періоду T тоді знаходяться як точки екстремальних значень таких функціоналів. Так, наприклад, компонентні оцінки періоду знаходяться на основі екстремальних значень функціоналів:

$$\hat{m}_k^{c,s}(\tau) = \frac{1}{\theta} \int_{-\theta}^{\theta} \xi(t) \begin{cases} \cos k \frac{2\pi}{\tau} t \\ \sin k \frac{2\pi}{\tau} t \end{cases} dt,$$

$$\hat{B}_k^{c,s}(u, \tau) = \frac{1}{\theta} \int_{-\theta}^{\theta} \xi(t) \xi(t+u) \begin{cases} \cos k \frac{2\pi}{\tau} t \\ \sin k \frac{2\pi}{\tau} t \end{cases} dt.$$

Визначені в такий спосіб оцінки періоду мають велику точність. Величина їх зміщення має порядок $O(N^{-2})$, а дисперсія – $O(N^{-3})$.

Для виділення модулюючих стаціонарних компонентів сигналів розроблені два методи. Перший з них полягає в частотному зсуві сигналу на величину $-k\omega_0$ і подальшій низькочастотній фільтрації, а саме використанні перетворення:

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

де $h(\tau)$ – імпульсний відгук низькочастотного фільтра:

$$h(\tau) = \frac{\sin\left(\frac{\omega_0\tau}{2}\right)}{\pi\tau}.$$

У другому методі за допомогою смугової фільтрації виділяться складові, спектри яких зосереджені в діапазонах $\left[k\omega_0 - \frac{\omega_0}{2}\right]$, $\left[k\omega_0 + \frac{\omega_0}{2}\right]$, а далі з використанням перетворення Гільберта знаходяться їх обвідні. Такі перетворення сигналів дають можливість провести аналіз імовірнісних характеристик як самих обвідних основних гармонік ПКВП, так і дослідити їх взаємкореляційні та взаємспектральні характеристики.

Розроблені методи оцінювання періодів детермінованої та стохастичної складових вібраційних сигналів були використані при створенні програм-

Технічні характеристики вібродіагностичних систем

Назва системи	ВЕКТОР	ПУЛЬС	КОМПАКТ-ВІБРО
Кількість каналів	12 (32)	4	2 (8)
Тип давача	електронний, ємнісний, ADXL001	п'єзокерамічний, ABC117	п'єзокерамічний, ABC117-03
Чутливість давача, мВ/г	24	1	1, 5, 10
Розрядність АЦП	14	16	12
Частота дискретизації, кГц	400	1000...10000	150
Смуга частот вхідного сигналу, кГц	0,001...30	0,005...100	0,0003...12
Робочий діапазон, м/с ² , (мм/с)	0,5...700	0,2...500	0,2...400 (0,5...30)
Живлення В/Гц	220/50	220/50	шина USB
Габарити, мм	370×310×70	483×290×90	160×140×30
Вага, кг	5,2	5,6	0,8

ного забезпечення для згаданих вище вібродіагностичних систем (див. табл.).

На основі отриманих оцінок періодів у подальшому обчислюються кореляційно-спектральні характеристики вібраційного сигналу, формуються діагностичні ознаки, які виводяться на екран персонального комп'ютера в табличній та графічній формах. Віброакустична система ВЕКТОР дає можливість здійснювати відбір, попередню обробку та архівувати інформацію по 12-х каналах (з можливістю розширення до 16) від електронних одно- та трьохкомпонентних давачів вібрації на базі сенсорів ADXL фірми Analog Devices чи п'єзокерамічних давачів промислового та еталонного типів фірми Брюль і К'єр (Данія). Додатково передбачений канал синхронізації (для балансування валів чи знаходження місцеположення дефекту) та мікрофонні входи (для визначення місць витоків рідин з підземних трубопроводів).

Новизна розробки та алгоритмічно-програмні засоби захищені патентами України № 99358 і № 102759. Модернізований варіант вібродіагностичної системи підвищеної надійності під назвою ВЕКТОР-А розроблений, випробуваний та впроваджений на одному з підприємств міністерства оборони України для діагностування підшипникових вузлів турбоагрегатів літальних апаратів.

Для обробки високочастотних вібраційних сигналів з метою виявлення та попередження аварійних ситуацій на турбогенераторах, нафтоперекачувальних станціях, буриньких установках, а також діагностики тіл обертання на порталних кранах та електрогенеруючих установках (у тому числі високовольтних трансформаторах) було розроблено діагностичну систему ПУЛЬС. В якості давачів віброприскорення використані акселерометри АВС 117, власна резонансна частота яких не менше 100 кГц. Частота квантування аналого-цифрового перетворювача задається програмно в межах 1...10 МГц. Вібродіагностична система ПУЛЬС використовувалась для діагностики турбогенераторів ТГВ-200 на Бурштинській ТЕС та редукторів порталних кранів ДП «Морський торговельний порт ЮЖНИЙ».

Вібродіагностична система КОМПАКТ-ВІБРО представляє собою портативну систему для відбору та обробки вібраційних сигналів з метою виявлення та попередження аварійних ситуацій на механізмах з обертовим або обертово-поступальним рухом. Діапазон вимірювання віброприскорення 0,2...400 м/с² та віброшвидкості 0,5...30 мм/с забезпечується п'єзокерамічним акселерометром АВС 117-03. Смуга частот вхідного вібраційного сигналу розділяється на піддіапазони, межі яких встановлюється програмно та вибираються з ряду значень, рекомендованих стандартами міжнародних нормативних документів МЕК-1

та ISO 266. Для запобігання спотворень спектру вібраційного сигналу передбачено антиелайзингові фільтри. Створене прикладне програмне забезпечення призначене для реалізації управління системою, запису оцифрованих вібраційних сигналів на жорсткий диск персонального комп'ютера, візуального відображення сигналів з давачів і збережених на жорсткому диску даних, математичної обробки вібраційних сигналів, генерування графічно-текстових звітів та виконує такі функції: обчислення середньоквадратичних значень віброшвидкості або віброприскорення для даних у кожному з каналів у режимі реального часу; обчислення кореляційної функції та спектральної густини потужності вібраційних сигналів.

Вібродіагностична система КОМПАКТ-ВІБРО використовувалась для дослідження вібраційного стану головних механізмів приводу контейнерних перевантажувачів та механізмів кабельних барабанів спредерів причальних контейнерних перевантажувачів «ЗРМС» на базі причалів №№ 42-43 ДП «Одеський морський торговельний порт»; визначення технічного стану підшипникових вузлів електродвигунів і редукторів стрічкового вугільного конвеєра ДП «Морський торговельний порт ЮЖНИЙ». Систему захищено Патентом України № 117957, вона пройшла метрологічне калібрування та готова до використання.

Висновки

Використання методів ПКВП відкриває якісно нові можливості статистичного аналізу вібраційних сигналів підшипникових вузлів обертових механізмів. Методи виділення детермінованої складової у вібраційному сигналі дозволяють проводити детальний аналіз фазових змін процесів в обертових механізмах. Розроблені адаптивні методи оцінювання параметрів сигналів мінімізують втручання людини в процес обробки, що дозволяє застосовувати їх в автоматизованих діагностичних системах. Методи виділення періодично нестационарної складової дають можливість виділяти характеристики сигналу, що відповідають відгукам дефектів механічної системи, мінімізуючи вплив шумів. Розроблені методи та засоби дозволяють аналізувати стан підшипникових вузлів механізмів обертання, виявляти та класифікувати їх дефекти на ранніх стадіях зародження.

Список літератури

1. Яворський І.М. (2013) *Математичні моделі та аналіз стохастичних коливань*. Львів, ФМІ НАНУ.
2. (2001) *Механіка руйнування та міцність матеріалів. Довідн. посібник. Т. 5. Неруйнівний контроль і технічна діагностика*. Назарчук З.Т. (ред.). Львів, ФМІ ім. Г.В. Карпенка НАН України.
3. Яворський І.Н., Юзефович Р.М., Мацько І.Й., Семенов П.А. (2015) Стохастические модели вибросигналов и их анализ для исследования состояния механических систем. *Управляющие системы и машины*, 6(260), 34–42.

4. Яворський І.М., Сторожук Я.В., Юзефович Р.М. та ін. (2014) *Дослідження причин підвищеної вібрації турбогенераторів № 4 та № 5 типу ТГВ-200 Буритинської. Матеріали V міжнародної конференції «Механіка руйнування матеріалів і міцність конструкцій»*. Львів, Національний університет «Львівська політехніка», 829–834.
5. Юзефович Р.М., Яворський І.М., Мацько І.Й. та ін. (2020) Пристрої для виявлення дефектів на ранніх стадіях їх зародження при визначенні технічного стану механізмів. *Технічна діагностика та неруйнівний контроль*, **4**, 8–16. doi.org/10.37434/tdnk2020.04.02.
6. Яворський І.М., Ісаєв І.Ю., Кравець І.Б. та ін. (2009) Методи підвищення ефективного статистичного аналізу сигналів вібрації підшипникових опор турбоагрегатів теплоелектростанцій. *Фізико-хімічна механіка матеріалів*, **3**, 49–59.
7. Яворський І.М., Драбич П.П., Ісаєв І.Ю. та ін. (2009) Розробка інформаційно-виміральної системи для вібродіагностики підшипників великих стаціонарних агрегатів. *Проблеми ресурсу і безпеки експлуатації конструкцій, споруд та машин*. Київ, Інститут електрозварювання ім. С.О.Патона, 113–122.
8. Яворський І.М., Драбич П.П., Кравець І.Б. та ін. (2010) Методи і засоби ранньої діагностики обертових механізмів. *Праці Міжнар. наук.-техн. конференції «Ресурс, надійність та ефективність використання енергетичного обладнання»*, Харків, 31–38.
9. Яворський І.М., Драбич П.П., Кравець І.Б., Мацько І.Й. (2011) Методи вібраційної діагностики початкових стадій пошкодження обертових систем. *Фізико-хімічна механіка матеріалів*, **2(47)**, 134–140.
10. Sardessus, C., Sidahmed, M., Lacoume, J.L. (2000) Cyclostationary Processes: Application in Gear Fault Early Diagnostics. *Mechanical Systems and Signal Processing*, **14(3)**, 371–385.
11. Antoni, I., Bonnardot, F., Raad, A., El, Badaoui (2004) Cyclostationary modeling of rotating machine vibration signals. *Mechanical Systems and Signal Processing*, **18**, 253–265.
12. Zhu, Z., Kong, F. (2005) Cyclostationary Analysis for Gearbox Condition Monitoring: Approaches and Effectiveness. *Mechanical Systems and Signal Processing*, **19(3)**, 467–482.
13. Antoni, I. (2009) Cyclostationarity by examples. *Mechanical Systems and Signal Processing*, **23**, 987–1036.
14. (1994) Cyclostationarity in Communications and Signal Processing. Ed. by Gardner W.A., New York, IEEE Press.
15. Hurd, H.L., Miamee, A. (2007) *Periodically Correlated Random Sequences Spectral Theory and Practice*. New Jersey, Wiley-Interscience.
16. Napolitano, A. (2020) *Cyclostationary Processes and Time Series: Theory, Applications and Generalizations*. Elsevier, Academic Press.
17. Яворський І.М., Юзефович Р.М., Кравець І.Б. та ін. (2012) Інформаційно-вимірвальна система ранньої вібраційної. *Матеріали 7-ї Національної науково-технічної конференції «Неруйнівний контроль та технічна діагностика»*. Київ, Інститут електрозварювання ім. С.О.Патона НАН України, 373–377.
18. Яворський І.М., Юзефович Р.М., Кравець І.Б. та ін. (2015) Розробка вібродіагностичної системи для визначення дефектів промислового обладнання з використанням методів нестационарної статистичної обробки вібраційних та акустичних коливань. *Техническая диагностика и неразрушающий контроль*, **4**, 36–41.
19. Юзефович Р.М., Дзерин О.Ю., Стецько І.Г., Яворський І.М. (2017) Розробка інформаційно-вимірвальних пристроїв для неруйнівного контролю та методи нестационарного аналізу вібраційних сигналів. *Праці XVI Міжнародної науково-технічної конференції «Приладобудування: стан і перспективи»*. Київ, Національний технічний університет України «Київський політехнічний інститут імені Ігоря Сікорського», 142.
20. Юзефович Р.М., Яворський І.М., Варивода М.З. та ін. (2019) Застосування спеціалізованих пристроїв неруйнівного контролю для вібраційної діагностики. *Праці XVII Міжнародної науково-технічної конференції «Приладобудування: стан і перспективи»*. Там само, 53–154.
21. Яворський І.М., Юзефович Р.М., Стецько І.Г., Трохим Г.Р., Мацько І.Й. (2019) Методи нестационарного аналізу вібраційних сигналів обертових вузлів у спеціалізованих пристроях неруйнівного контролю. *Матеріали 9-ї Національної науково-технічної конференції і виставки «Неруйнівний контроль та технічна діагностика»*. Там само, 75–80.
22. Юзефович Р.М., Яворський І.М., Дзерин О.Ю. та ін. (2020) Застосування спеціалізованого пристрою неруйнівного контролю для аналізу вібраційних сигналів підшипникових вузлів методами взаємного нестационарного аналізу. *Технічна діагностика та неруйнівний контроль*, **1**, 17–27. doi.org/10.37434/tdnk2020.01.02
23. Юзефович Р.М., Яворський І.М., Семенов П.О., Стецько І.Г. (2020) Система неруйнівного контролю для встановлення технічного стану обертових механізмів. *Збірка тез доповідей двадцять третьої міжнародної конференції «Неруйнівний контроль та моніторинг технічного стану»*. Одеса, 65.
24. Javorskyj, I., Isayev, I., Zakrzewski, Z., Brooks, S. (2007) Coherent covariance analysis of periodically correlated random processes. *Signal Processing*, **87**, 13–32.
25. Javorskyj, I., Isayev, I., Majewski, J., Yuzefovych, R. (2010) Component covariance analysis for periodically correlated random processes. *Ibid*, **90**, 1083–1102.
26. Javorskyj, I., Yuzefovych, R., Kravets, I., Zakrzewski, Z. (2011) Least squares method in the stochastic analysis of periodically correlated random processes. *Radioelectronics and Communications Systems*, **54(1)**, 45–49.
27. Javorskyj, I., Leśkow, I., Kravets, I. et al. (2012) Linear filtration methods for statistical analysis of periodically correlated random processes. Part I: Coherent and component methods and their generalization. *Signal Processing*, **92**, 1559–1566.
28. Javorskyj I., Leśkow I., Kravets I., Isayev I., Gajecka E. (2011) Linear filtration methods for statistical analysis of periodically correlated random processes. Part II: Harmonic series representation. *Ibid*, **91**, 2506–2519.
29. Яворский И.Н. (1984) Применение схемы Бью-Балло при статистическом анализе ритмических сигналов. *Изв. ВУЗ-Зов. Радиоэлектроника*, **27**, 31–37.
30. Javorskyj, I., Kravets, I., Matsko, I., Yuzefovych, R. (2017) Periodically correlated random processes: Application in early diagnostics of mechanical systems. *Mechanical Systems and Signal Processing*, **83**, 406–438.
31. Javorskyj, I., Matsko, I., Yuzefovych, R., Zakrzewski, Z. (2016) Discrete estimators of characteristics for periodically correlated time series. *Digital Signal Processing*, **53**, 25–40.
32. Javorskyj, I., Yuzefovych, R., Kravets, I., Matsko, I. (2014) *Methods of periodically correlated random processes and their generalizations. Cyclostationarity: Theory and Methods. Lecture Notes in Mechanical Engineering*. Eds. F. Chaari, J. Leskow, A. Sanches-Ramirez, New York, Springer International Publishing Switzerland, 73–93.
33. Javorskyj, I., Yuzefovych, R., Matsko, I. et al. (2017) Coherent covariance analysis of periodically correlated random processes for unknown non-stationarity period. *Digital Signal Processing*, **65**, 27–51.

References

1. Javorskyj, I.M. (2013) *Mathematical models and analysis of stochastic oscillation*. Lviv, PMI [in Ukrainian].
2. (2001) *Fracture mechanics and strength of materials: Refer. book, Vol.5: Non-destructive testing and technical diagnostics*. Ed. by Z.T. Nazarchuk. Lviv, PMI [in Ukrainian].
3. Javorskyj, I.N., Yuzefovych, R.M., Matsko, I.J., Semenov, P.A. (2015) Stochastic models of vibrosignals and their analysis for investigation of mechanical system state. *Upravlyayushchie Sistemy i Mashiny*, **6(260)**, 34–42 [in Russian].
4. Javorskyj, I.M., Storozhuk, Ya.V., Yuzefovych, R.M. et al. (2014) Investigation of the causes for increased vibration of turbogenerators No. 4 and No. 5 of TGV-200 type at Bursh-turb plant. In: *Proc. of Vth Int. Conf. on Fracture Mechanics and Strength of Structures*. Lviv, NU «Lvivska Politekhnik», 829–834.
5. Yuzefovych, R.M., Yavorskyj, I.M., Matsko, I.Y., Lychak, O.V. et al. (2020) Devices for detection of defects at early stages of their initiation at determination of technical condition of mechanisms. *Tekh. Diahnost. ta Neruiniv. Kontrol*, **4**, 8–16 [in Ukrainian]. doi.org/10.37434/tdnk2020.04.02.
6. Javorskyj, I.M., Isayev, I.Yu., Kravets, I.B. et al. (2009) Methods to increase the efficiency of statistical analysis of vibration signals from bearing supports of turbine units of

- thermal power plants. *Fiz.-Khimich. Mekhanika Materialiv*, **3**, 49–59 [in Ukrainian].
7. Javorskyj, I.M., Drabych, P.P., Isayev, I.Yu. et al. (2009) Development of an information-measurement system for vibro-diagnostics of bearings of large stationary units. In: *Problems of service life and safety of structures, constructions and machines*. Kyiv, PWI, 113–122 [in Ukrainian].
 8. Javorskyj, I.M., Drabych, P.P., Kravets, I.B. et al. (2010) Methods and means of early diagnostics of rotating mechanisms. In: *Proc. of Sci.-Techn. Conf. on Service Life, Reliability and Effectiveness of Application of Power Equipment*, Kharkiv, 31–38.
 9. Javorskyj, I.M., Drabych, P.P., Kravets, I.B., Matsko, I.J. (2011) Methods of vibration diagnostics of early stages of damage of rotating systems. *Fiz.-Khimich. Mekhanika Materialiv*, **2(47)**, 134–140 [in Ukrainian].
 10. Capdessus, C., Sidahmed, M., Lacoume, J.L. (2000) Cyclostationary processes: Application in gear fault early diagnostics. *Mechanical Systems and Signal Processing*, **14(3)**, 371–385.
 11. Antoni, I., Bonnardot, F., Raad, A., El Badaoui (2004) Cyclostationary modeling of rotating machine vibration signals. *Mechanical Systems and Signal Processing*, **18**, 253–265.
 12. Zhu, Z., Kong, F. (2005) Cyclostationary analysis for gearbox condition monitoring: Approaches and effectiveness. *Mechanical Systems and Signal Processing*, **19(3)**, 467–482.
 13. Antoni, I. (2009) Cyclostationarity by examples. *Mechanical Systems and Signal Processing*, **23**, 987–1036.
 14. (1994) *Cyclostationarity in Communications and Signal Processing*. Ed. by W.A. Gardner, New York, IEEE Press.
 15. Hurd, H.L., Miamer, A. (2007) *Periodically Correlated Random Sequences Spectral Theory and Practice*. New Jersey, Wiley-Interscience.
 16. Napolitan, A. (2020) *Cyclostationary Processes and Time Series: Theory, Applications and Generalizations*. Elsevier, Academic Press.
 17. Javorskyj, I.M., Yuzefovych, R.M., Kravets, I.B., Matsko, I.J., Stetsko, I.G. (2012) Information-measurement systems of early vibration diagnostics. In: *Proc. of 7th Nat. Sci.-Tech. Conf. on Non-destructive Testing and Technical Diagnostics*. Kyiv, PWI, 373–377 [in Ukrainian].
 18. Javorskyj, I.M., Yuzefovych, R.M., Kravets, I.B., Matsko, I.J., Stetsko, I.G. (2015) Development of vibrodiagnostic system for determination of industrial equipment defects with application of methods of non-stationary statistical treatment of vibration and acoustic oscillations. *Tekh. Diagnost. i Nerazrush. Kontrol*, **4**, 36–41 [in Ukrainian].
 19. Yuzefovych, R.M., Dzeryn, O.Yu., Stetsko, I.G., Javorskyj, I.M. (2017) Development of information-measurement devices for non-destructive testing and methods of nonstationary analysis of vibration signals. In: *Proc. of 16th Int. Sci.-Tech. Conf. on Instrument Engineering: State-of-the-art and Prospects*. Kyiv, NTUU KPI, 142.
 20. Yuzefovych, R.M., Javorskyj, I.M., Varyvoda, M.Z., Stetsko, I.G., Trokhym, G.R. (2019) Application of specialized non-destructive testing devices for vibration diagnostics. In: *Proc. of 17th Int. Sci.-Tech. Conf. on Instrument Engineering: State-of-the-art and Prospects*. Kyiv, NTUU KPI, 53–154.
 21. Javorskyj, I.M., Yuzefovych, R.M., Stetsko, I.G., Trokhym, G.R., Matsko, I.J. (2019) Methods of nonstationary analysis of vibration signals of rotating assemblies in specialized non-destructive testing devices. In: *Proc. of 9th Nat. Sci.-Tech. Conf. on Non-Destructive Testing and Technical Diagnostics*. Kyiv, PWI, 75–80 [in Ukrainian].
 22. Yuzefovych, R.M., Javorskyi, I.M., Dzeryn, O.Y., Trokhym, G.R. et al. (2020) Application of specialized nondestructive testing device for analysis of vibration signals of bearing assemblies by the methods of mutual nonstationary analysis. *Tekh. Diahnost. ta Neruiniv. Kontrol*, **1**, 17–27 [in Ukrainian] doi.org/10.37434/tdnk2020.01.02
 23. Yuzefovych, R.M., Javorskyj, I.M., Semenov, P.O., Stetsko, I.G. (2020) System of non-destructive testing for determination of technical state of rotary mechanisms. In: *Abstr. of Papers of 23rd Int. Conf. on Non-destructive Testing and Monitoring of Technical State*. Odessa, 65 [in Ukrainian].
 24. Javorskyj, I., Isayev, I., Zakrzewski, Z., Brooks, S. (2007) Coherent covariance analysis of periodically correlated random processes. *Signal Processing*, **87**, 13–32.
 25. Javorskyj, I., Isayev, I., Majewski, J., Yuzefovych, R. (2010) Component covariance analysis for periodically correlated random processes. *Signal Processing*, **90**, 1083–1102.
 26. Javorskyj, I., Yuzefovych, R., Kravets, I., Zakrzewski, Z. (2011) Least squares method in the stochastic analysis of periodically correlated random processes. *Radioelectronics and Communications Systems*, **54(1)**, 45–49.
 27. Javorskyj, I., Leškow, I., Kravets, I., Isayev, I., Gajecka, E. (2012) Linear filtration methods for statistical analysis of periodically correlated random processes. Pt I: Coherent and component methods and their generalization. *Signal Processing*, **92**, 1559–1566.
 28. Javorskyj, I., Leškow, I., Kravets, I., Isayev, I., Gajecka, E. (2011) Linear filtration methods for statistical analysis of periodically correlated random processes. Pt II: Harmonic series representation. *Signal Processing*, **91**, 2506–2519.
 29. Javorskyi, I.N. (1984) Application of Bui-Ballo scheme in statistical analysis of rhythmic signals. *Izv. Vuzov. Radioelektronika*, **27**, 31–37 [in Russian].
 30. Javorskyj, I., Kravets, I., Matsko, I., Yuzefovych, R. (2017) Periodically correlated random processes: Application in early diagnostics of mechanical systems. *Mechanical Systems and Signal Processing*, **83**, 406–438.
 31. Javorskyj, I., Matsko, I., Yuzefovych, R., Zakrzewski, Z. (2016) Discrete estimators of characteristics for periodically correlated time series. *Digital Signal Processing*, **53**, 25–40.
 32. Javorskyj, I., Yuzefovych, R., Kravets, I., Matsko, I. (2014) Methods of periodically correlated random processes and their generalizations. *Cyclostationarity: Theory and Methods. Lecture Notes in Mechanical Engineering*. Ed. by F. Chaari, J. Leskow, A. Sanches-Ramirez, New York, Springer Int. Publish. Switzerland, 73–93.
 33. Javorskyj, I., Yuzefovych, R., Matsko, I., Zakrzewski, Z., Majewski, J. (2017) Coherent covariance analysis of periodically correlated random processes for unknown nonstationarity period. *Digital Signal Processing*, **65**, 27–51.

METHODS AND MEANS OF EARLY VIBRODIAGNOSTICS OF BEARING UNITS OF ROTARY MECHANISMS

I.M. Yavorskyi^{1,2}, R.M. Yuzefovych^{1,3}, O.V. Lychak¹, M.Z. Varyvoda¹, I.H. Stetsko¹

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

²University of Science and Technology, Institute of Telecommunications and Computer Science. 7 prof. S. Kaliskiego al., 85796, Bydgoszcz, Poland.

³Lviv Polytechnic National University. 12 S. Bandery str., 79013, Lviv, Ukraine.

The characteristics of methods and tools for vibration diagnostics of rotating units of mechanisms on the basis of models of vibration signals in the form of periodically correlated random processes (PKVP) are given. Those models make it possible to detect and analyze the relations of repeatability and stochasticity in the properties of vibration that allows defining appearance of defects. Such an approach significantly increases the efficiency of early detection of defects and establishment of their types. The main stages of statistical processing of vibration signals to determine the diagnostic features are described. Technical characteristics of developed vibration diagnostic systems VECTOR, PULSE and COMPACT-VIBRO are given. 33 Ref., 1 Tabl., 1 Fig.

Keywords: vibrodiagnostics, non-destructive testing, vibration signal, periodically correlated random process, specialized devices, defect, bearing

Надійшла до редакції 24.05.2021