

# ПРИСТРОЇ ДЛЯ ВИЯВЛЕННЯ ДЕФЕКТІВ НА РАННІХ СТАДІЯХ ЇХ ЗАРОДЖЕННЯ ПРИ ВИЗНАЧЕННІ ТЕХНІЧНОГО СТАНУ МЕХАНІЗМІВ\*

Р.М. Юзефович, І.М. Яворський, І.Й. Мацько, О.В. Личак, Г.Р. Трохим, О.Ю. Дзерин, І.Г. Стецько

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

Вібраційний сигнал є носієм інформації про певні дефекти системи, має властивості повторюваності та стохастичності. Ці його властивості дають можливість описати і дослідити математичну модель у вигляді періодично корельованого випадкового процесу (ПКВП). Імовірнісні характеристики ПКВП відображають модуляційну взаємодію стохастичної і детермінованої складових вібрацій, яка виникає в разі появи дефектів. Взаємний ПКВП-аналіз вібросигналів, використання введених функцій когерентності дозволяють виявляти дефекти, класифікувати їх типи, а також визначити їх розташування. Поєднання багаточкового відбору вібраційних сигналів, методів взаємного статистичного ПКВП-аналізу та програмного забезпечення цифрової обробки сигналів у розробленому компактному пристрої неруйнівного контролю «Компакт-Вібро» дає можливість підвищити ефективність вібродіагностики обертових вузлів технологічних об'єктів під час експлуатації без зміни їх штатних режимів функціонування. Проведений моніторинг турбоагрегатів ТЕС розробленими методами дав змогу виявити ряд типових дефектів опорних підшипників ковзання, що було підтверджено під час ремонту обертових вузлів. Бібліогр. 20, рис. 17.

*Ключові слова:* неруйнівний контроль, вібрація, періодично корельований випадковий процес, спеціалізовані пристрої, дефект, підшипник ковзання

Застосування діагностики і прогнозування стану досліджуваної структури на основі даних вібродіагностики дає можливість суттєво знизити видатки на обслуговування об'єктів чи процесів та надає необхідну інформацію для прийняття обґрунтованих рішень з метою підвищення їх безпеки, продуктивності, надійності та ремонтоздатності [1–3]. Перехід від контролю працездатності технічних об'єктів до раннього діагностування дефектів, що зароджуються, призводить до потреби встановлення таких діагностичних ознак, які є чутливими до незначних відхилень параметрів технічного стану від норми. Власне виявлення несправностей (дефектів), котрі ще не призвели до катастрофічних наслідків, а також визначення ступеня розвитку дефекту і його параметрів можливі лише на основі детального дослідження структури вібраційних сигналів та її зв'язку з кінематикою і динамікою механізмів [4–6].

Вібраційний сигнал є важливим інформативним діагностичним інструментом, оскільки на основі отриманої та обробленої інформації можна оптимізувати планування поточного і капітального ремонту, збільшити міжремонтний інтервал, зменшити витрати на закупівлю запчастин та матеріалів [7, 8]. Тому проведення періодичної діа-

гностики для виявлення дефектів на ранніх стадіях їх зародження при визначенні технічного стану механізмів є актуальною задачею.

**Пристрій неруйнівного контролю.** Відбір вібраційного сигналу та застосування методів періодично нестационарних випадкових процесів та цифрової обробки сигналів для ранньої діагностики обертових механізмів поєднано у розробленому у відділі методів та засобів відбору та обробки діагностичних сигналів Фізико-механічного інституту ім. Г.В. Карпенка НАН України спеціалізованому пристрої неруйнівного контролю «Компакт-Вібро» (рис. 1).

Спеціалізований пристрій неруйнівного контролю є портативною системою відбору та обробки вібраційних сигналів методами ПКВП в широкому діапазоні частот з метою виявлення і попере-



Рис. 1. Спеціалізований пристрій неруйнівного контролю «Компакт-Вібро». Загальний вигляд

\*За результатами виконання цільової комплексної програми НАН України «Проблеми ресурсу і безпеки експлуатації конструкцій, споруд і машин» («Ресурс»), отриманих за 2016–2020 рр.

Юзефович Р.М. – <http://orcid.org/0000-0001-5546-453X>, Яворський І.М. – <http://orcid.org/0000-0003-0243-6652>,  
Мацько І.Й. – <http://orcid.org/0000-0001-5499-5486>, Личак О.В. – <http://orcid.org/0000-0001-5559-1969>,  
Трохим Г.Р. – <https://orcid.org/0000-0002-2472-1676>, Дзерин О.Ю. – <http://orcid.org/0000-0002-8768-0218>

© Р.М. Юзефович, І.М. Яворський, І.Й. Мацько, О.В. Личак, Г.Р. Трохим, О.Ю. Дзерин, І.Г. Стецько, 2020

дження аварійних ситуацій на механізмах з обертним або обертово-поступальним рухом.

Пристрій неруйнівного контролю для ранньої діагностики обертових механізмів змонтований в металевому корпусі розміром 165×145×30 мм. Всі електронні компоненти встановлені на двох друкованих платах, які закріплені до основи корпусу на монтажних стійках. Для оперативності в ремонті та налагодженні з'єднання між друкованими платами проведено з використанням монтажних колодок та роз'ємів. Для мінімізації наводок від електромагнітних завад використовуються екрановані кабелі, доріжки входних кіл на друкованій платі є мінімальної довжини, по шині живлення використовуються як фільтри танталові конденсатори. Внутрішній вигляд змонтованого та налаштованого пристрою неруйнівного контролю для ранньої діагностики обертових механізмів показаний на рис. 2.

Пристрій складається з таких основних частин: п'єзокерамічного давача віброприскорення; перетворювача заряду; вихрострумowego давача; схеми узгодження вихреструмowego давача; керованого фільтра нижніх частот; інтеграторів; генератора сигналу з комутатором та декодером; аналого-цифрового перетворювача; DC-DC перетворювача.

Давачем віброприскорення є п'єзокерамічний акселерометр типу АВС-117 (рис. 3), власна резонансна частота якого знаходиться в межах 100 кГц. Давач виготовлений в металевому мініатюрному корпусі з неіржавіючої сталі. Під'єднуючий кабель виконаний з високотемпературних вібростійких матеріалів. Матеріал п'єзокераміки – ЦТС 83Г (цирконат титанат свинцю). Кріплення давача до досліджуваного об'єкту відбувається за допомогою шпильки М5 або магніту. Довжина з'єднуючого кабелю становить біля 9 м і суттєво



Рис. 2. Спеціалізований пристрій неруйнівного контролю «Компакт-Вібро». Внутрішній вигляд



Рис. 3. П'єзокерамічний акселерометр типу АВС-117 разом із з'єднуючим кабелем

не впливає на характер амплітудної та амплітудно-частотної характеристики.

**Основні параметри п'єзокерамічного акселерометра:**

коефіцієнт перетворення в амплітудному значенні по напрузі, мВс <sup>2</sup> /м	0,30±0,045
коефіцієнт перетворення в амплітудному значенні по заряду, пКл/с <sup>2</sup> /м	1,60±0,48
ємність, не більше, пФ	2200±330
власна резонансна частота, не менше, кГц	40
нерівномірність амплітудно-частотної характеристики в діапазоні частот, Гц±1дБ	від 100 до 5000
основна похибка, не більше, %	± 10

Структурна схема спеціалізованого пристрою наведена на рис. 4 [11].

Сигнал, пропорційний величині віброприскорення, поступає на вхід перетворювача заряду з коефіцієнтами передачі 1,5 (10 мВ/г) та з частотним діапазоном 0,3 Гц...12 кГц (-3 дБ), згодом на підсилювач із регульованим коефіцієнтом підсилення, що дає можливість забезпечити номінальний динамічний діапазон роботи аналого-цифрового перетворювача, а також компенсує розбіжність чутливості давачів віброприскорення. Частотний діапазон входного сигналу за допомогою керованого фільтра нижніх частот (Баттерворта 5-го порядку) розділений на 4 піддіапазони. Для уникнення паразитних складових у спектрі сигналу використано антилейзинговий фільтр. Чутливість перетворювача заряду, частотний піддіапазон, а також частота зрізу низькочастотного фільтру задається через порт вводу-виводу аналого-цифрового перетворювача. Для розділення корисного сигналу від комутаційних завад використано фільтр Баттерворта 8-го порядку.

Затухання сигналу на подвійній частоті зрізу фільтру становить не менше -48 дБ. Для розширення експлуатаційних можливостей за допомогою електронного інтегратора отримано сигнал віброшвидкості, амплітудно-частотна характеристика якого лінійна в діапазоні 1...500 Гц (0 дБ). На екран монітора виводяться сигнали кореляцій-

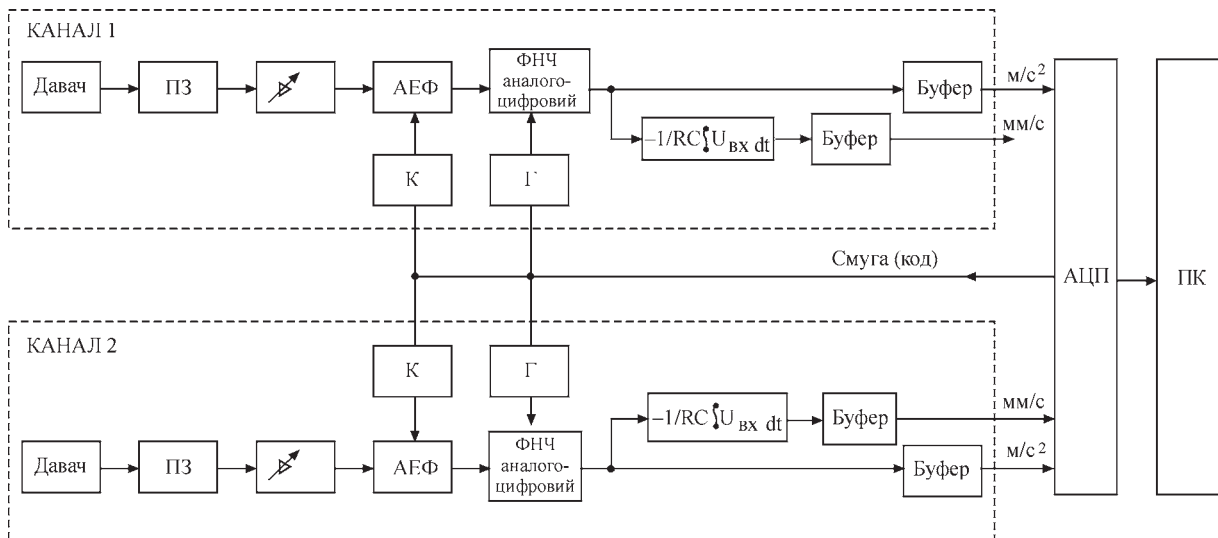


Рис. 4. Спеціалізований пристрій неруйнівного контролю «Компакт-Вібро». Структурна схема

ної функції, спектральної густини сигналу та середньоквадратичні значення отриманих величин віброприскорення чи віброшвидкості. Живлення пристрою здійснюється від шини USB персонального комп'ютера. Струм споживання в двоканальному режимі не перевищує 70 мА.

**Покомпонентна функція когерентності.** Однією з типових діагностичних задач є задача просторового та векторного аналізів вібрацій – дослідження форм коливань валів великих стаціонарних агрегатів на частоті обертання ротора та її гармонік. Для розв'язання такої задачі слід визначати та аналізувати амплітудний і фазовий спектри вібрацій сусідніх опор вала, оскільки різниця фаз коливань опор на частоті обертання ротора та її гармонік містить інформацію про форму коливань вала. При розв'язанні вказаних діагностичних задач доцільно використовувати взаємний спектральний аналіз сигналів, виміряних в різних точках контролю [6, 9].

У роботі [10] була введена покомпонентна функція когерентності двох сигналів:

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

отриманих за допомогою лінійних перетворень одного і того самого періодично нестаціонарного випадкового сигналу, що дорівнює покомпонентній функції автокогерентності цього сигналу. А це означає, що вона не змінюється при лінійних перетвореннях [10]. Підкреслимо, що встановлена властивість величини має важливе значення при її використанні в задачах багатоканальних систем передачі інформації, шляхів поширення сигналів і т. п.

Легко бачити, що при  $k = 1$  величина (1) дорівнює одиниці, тобто в цьому випадку введена функція когерентності при лінійних перетворен-

нях має таку саму властивість, що й функція когерентності стаціонарно зв'язаних сигналів [10, 11].

Для амплітудно-модульованих сигналів:

$$\xi(t) = \mu(t)\cos\omega_0 t,$$

$$\eta(t) = \nu(t)\cos\omega_0 t,$$

де  $\mu(t)$  та  $\nu(t)$  – стаціонарно зв'язані випадкові процеси.

Стаціонарні компоненти мають вигляд:

$$\xi_1(t) = \xi_{-1}(t) = \frac{1}{2}\mu(t),$$

$$\eta_1(t) = \eta_{-1}(t) = \frac{1}{2}\nu(t).$$

У цьому випадку

$$\gamma_{1,-1}^{(\xi\eta)}(\omega) = \gamma_{-1,1}^{(\xi\eta)}(\omega) = \frac{|f_{\mu\nu}(\omega)|}{[f_{\mu}(\omega)f_{\nu}(\omega)]^{\frac{1}{2}}}, \quad (2)$$

де  $f_{\mu}(\omega)$  та  $f_{\nu}(\omega)$  – спектральні густини потужності випадкових процесів  $\mu(t)$  та  $\nu(t)$ , а  $f_{\mu\nu}(\omega)$  – їх взаємна спектральна густина. Такий самий вигляд мають і функції когерентності  $\gamma_{1,1}^{(\xi\eta)}(\omega)$ ,  $\gamma_{-1,-1}^{(\xi\eta)}(\omega)$ .

Взаємоспектральна густина сигналів визначається виразом

$$f_{\xi\eta}(\omega, t) = f_0^{(\xi\eta)}(\omega) + f_{-2}^{(\xi\eta)}(\omega)e^{-i2\omega_0 t} + f_2^{(\xi\eta)}(\omega)e^{i2\omega_0 t},$$

при цьому

$$f_0^{(\xi\eta)}(\omega) = f_{-1,-1}^{(\xi\eta)}(\omega) + f_{1,1}^{(\xi\eta)}(\omega),$$

$$f_2^{(\xi\eta)}(\omega) = f_{1,-1}^{(\xi\eta)}(\omega - \omega_0),$$

$$f_{-2}^{(\xi\eta)}(\omega) = f_{-1,1}^{(\xi\eta)}(\omega + \omega_0).$$

Як бачимо, середньочасове значення функції  $f_{\xi\eta}(\omega, t)$  визначається спектральними густинами  $f_{-1,-1}^{(\xi\eta)}(\omega, t)$  і  $f_{1,1}^{(\xi\eta)}(\omega, t)$ , а її періодична зміна за часом – спектральними густинами  $f_{1,-1}^{(\xi\eta)}(\omega, t)$  і  $f_{-1,1}^{(\xi\eta)}(\omega, t)$ . Із цього випливає, що функції коге-



рентності  $\gamma_{-1,1}^{(\xi\eta)}(\omega)$  і  $\gamma_{-1,-1}^{(\xi\eta)}(\omega)$  потрібно розглядати як характеристики взаємозв'язку сигналів у стаціонарному наближенні, функції когерентності  $\gamma_{-1,1}^{(\xi\eta)}(\omega)$  і  $\gamma_{-1,-1}^{(\xi\eta)}(\omega)$  – як характеристики взаємозв'язку нестационарних властивостей сигналів. У даному випадку ці функції рівні, і це не дивно, оскільки стаціонарні компоненти  $\xi_{\pm 1}(t)$  та  $\eta_{\pm 1}(t)$  формуються на основі одних і тих самих модулюючих процесів  $\mu(t)$  та  $\nu(t)$ . Така властивість періодично нестационарних випадкових сигналів (ПНВС) була названа спектральною надлишковістю. Це означає, що зі спектральними характеристиками модулюючих компонент зв'язана та сама інформація, що і з їх спектральними характеристиками. Однак необхідно підкреслити, що ця надлишковість може бути використана при розв'язуванні багатьох практичних задач [3, 6, 12, 13].

Для обчислення оцінок спектральних густин використаємо корелограмний метод Блекмана-Т'юкі. Тоді

$$\hat{f}_{\xi_k}(\omega) = \frac{\Delta u}{4\pi} \sum_{r=0}^L \left[ \left[ \hat{R}_{\xi_k}^c(r\Delta u) + \hat{R}_{\xi_k}^s(r\Delta u) \right] \cos \omega r \Delta u + \hat{R}_{\xi_k}^{cs}(r\Delta u) \sin \omega r \Delta u \right] k(r\Delta u),$$

$$\hat{f}_{\eta_k}(\omega) = \frac{\Delta u}{4\pi} \sum_{r=0}^{L-1} \left[ \left[ \hat{R}_{\eta_k}^c(r\Delta u) + \hat{R}_{\eta_k}^s(r\Delta u) \right] \cos \omega r \Delta u + \hat{R}_{\eta_k}^{cs}(r\Delta u) \sin \omega r \Delta u \right] k(r\Delta u),$$

$$\text{Re } \hat{f}_{\xi_k \eta_k}(\omega) = \frac{\Delta u}{8\pi} \sum_{r=-L}^L \left[ \left[ \hat{R}_{\xi_k \eta_k}^c(r\Delta u) + \hat{R}_{\xi_k \eta_k}^s(r\Delta u) \right] \cos \omega r \Delta u + \left[ \hat{R}_{\xi_k \eta_k}^{cs}(r\Delta u) - \hat{R}_{\xi_k \eta_k}^{sc}(r\Delta u) \right] \sin \omega r \Delta u \right] k(r\Delta u),$$

$$\text{Im } \hat{f}_{\xi_k \eta_k}(\omega) = \frac{\Delta u}{8\pi} \sum_{r=-L}^L \left[ \left[ \hat{R}_{\xi_k \eta_k}^c(r\Delta u) + \hat{R}_{\xi_k \eta_k}^s(r\Delta u) \right] \sin \omega r \Delta u + \left[ \hat{R}_{\xi_k \eta_k}^{sc}(r\Delta u) - \hat{R}_{\xi_k \eta_k}^{cs}(r\Delta u) \right] \cos \omega r \Delta u \right] k(r\Delta u),$$

де  $k(u)$  – вікно Хеммінга.

Оцінка покомпонентної функції когерентності тоді приймає вигляд:

$$\hat{\gamma}_{kl}^{(\xi\eta)}(\omega) = \frac{\left[ \left[ \text{Re } \hat{f}_{\xi_k \eta_k}(\omega) \right]^2 + \left[ \text{Im } \hat{f}_{\xi_k \eta_k}(\omega) \right]^2 \right]^{\frac{1}{2}}}{\left[ \hat{f}_{\xi_k}(\omega) \hat{f}_{\eta_k}(\omega) \right]^{\frac{1}{2}}}.$$

Загальна схема обчислення покомпонентної функції когерентності наведена на рис. 5. Зауважимо, що параметри статистичної обробки, яка проводиться, вибираються на основі аналізу властивостей відповідних оцінок [10, 14].

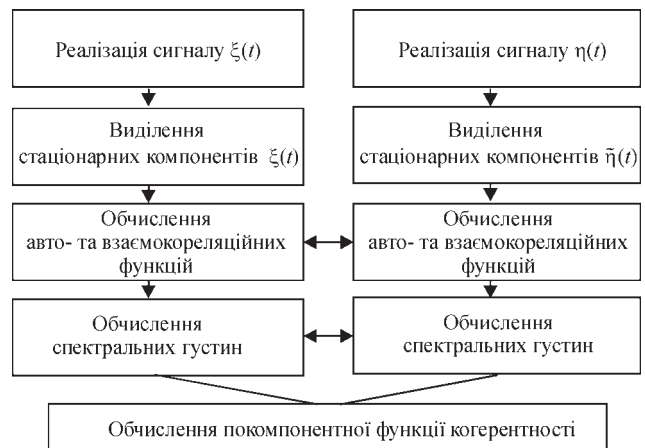


Рис. 5. Загальна схема обчислення покомпонентної функції когерентності

Така функція когерентності визначається взаємоспектральними характеристиками окремих випадкових процесів, які модулюють несучі гармоніки ПНВС. У порівнянні з інтегральною функцією когерентності вона дає змогу детальніше проаналізувати взаємозв'язаність ПНВС, уникаючи при цьому впливу переносу частот, який виникає при модуляції.

**Взаємний аналіз вібраційних сигналів підшипникових вузлів турбогенераторів ТЕС.** З використанням розробленого спеціалізованого пристрою проводився постійний моніторинг турбоагрегатів ТЕС впродовж шести місяців. За цей період часу досліджено деградацію підшипникового вузла від

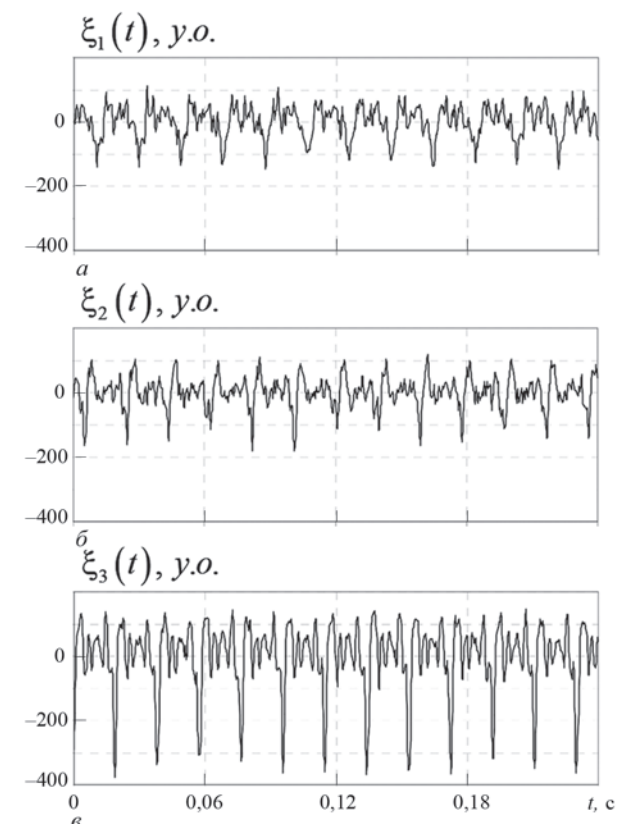


Рис. 6. Вібраційні сигнали вертикальної складової: березень (а), червень (б), серпень (в)

зародження в ньому локального дефекту до викришення бабітового вкладкишу.

Для наочності коротко проаналізуємо зміну імовірнісних характеристик вертикальної складової вібраційних сигналів підшипникового вузла. Частота відбору сигналів становила 2 кГц, час відбору – 20 с. З наведених графіків (рис. 6) видно, що поява дефекту спричиняє появу та наростання періодичних викидів з частотою, що відповідає частоті обертання валу, у нижній частині графіків, амплітуда яких зростає зі збільшенням розміру дефекту.

Оцінки кореляційних функцій вібраційних сигналів у стаціонарному наближенні (рис. 7) мають незникаючий «хвіст», зумовлений наявністю детермінованих складових. Основний період  $T = 0,02$  с (50 Гц). Поява дефекту спричиняє появу потужних викидів на «хвості» кореляційної функції, амплітуди яких наростають з ростом дефекту. Слід зауважити, що середня потужність вібраційних сигналів з ростом дефекту також зростає.

У спектральних густинах потужності (рис. 8) вібраційних сигналів у стаціонарному наближенні присутня основна гармонічна складова, що відповідає частоті обертання валу (50 Гц) та кілька кратних до неї гармонік. В основному всі гармонічні складові зосереджені в смузі частот до 500 Гц. Поява дефекту та його ріст спричиняють появу вищих гармонічних складових та ріст їх амплітуд.

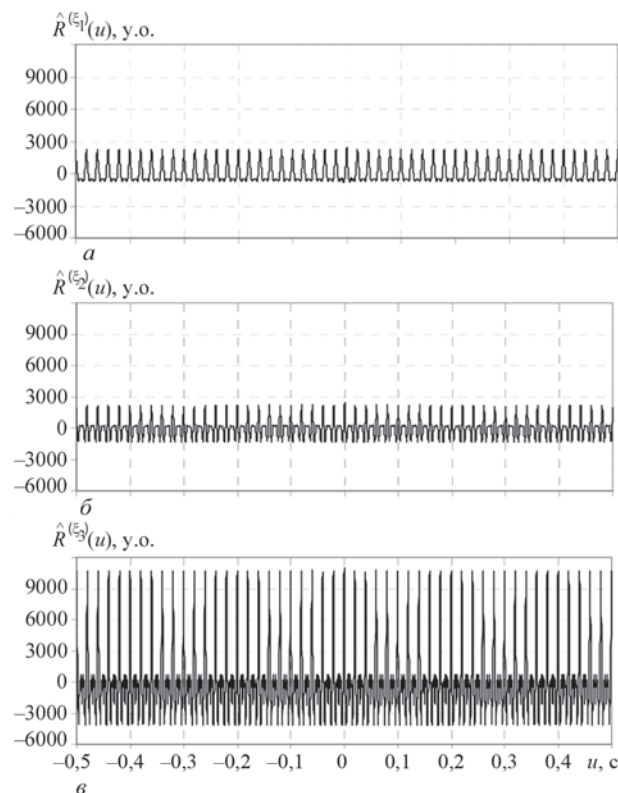


Рис. 7. Кореляційні функції вертикальної складової: березень (а), червень (б), серпень (в)

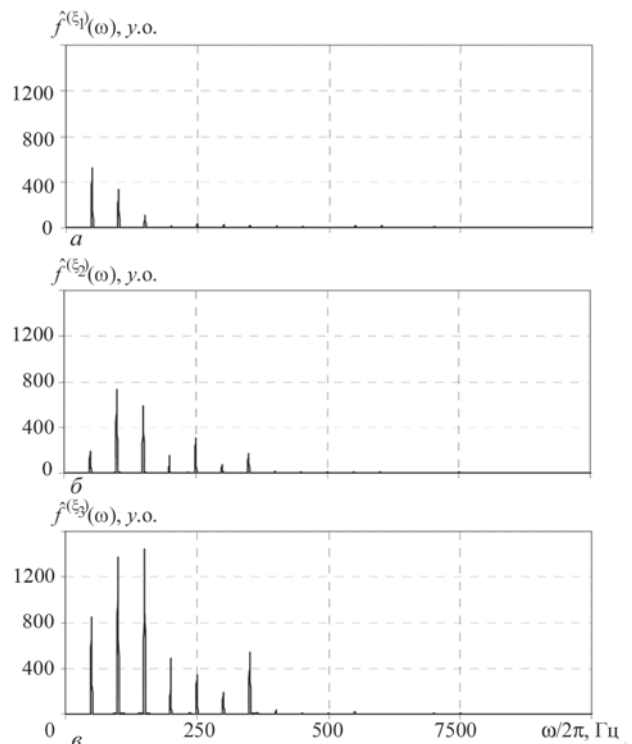


Рис. 8. Спектральні густини вертикальної складової: березень (а), червень (б), серпень (в)

Проведено розділення детермінованої і стохастичної складових вібраційних сигналів з використанням компонентного методу та проаналізовано кожен з них окремо при розвитку дефекту.

На рис. 9 наведено динаміку зміни математичного очікування вібраційних сигналів впродовж моніторингу. З наведених графіків видно, що при появі дефекту зростають амплітуди викидів.

Серед значущих коефіцієнтів Фур'є математичного очікування присутні вісім компонентів, амплітуди яких зростають з розвитком дефекту (рис. 10).

Потужність стохастичних складових вібраційних сигналів без дефекту складають не більше 10 % потужності сигналів (рис. 11, а). При появі дефектів у цих складових вібраційних сигналів появляються викиди, що спричинені взаємодією валу з вкладишем підшипника.

В кореляційних функціях стохастичних складових у стаціонарному наближенні на «хвостах» з'являються викиди на частоті обертання валу, амплітуди яких зростають з ростом дефекту. Потужність цих складових з ростом дефекту зростає також (рис. 12).

Спектральні густини стохастичних складових у стаціонарному наближенні без дефекту наведено на рис. 13, а. Основна енергія зосереджена в смузі частот до 500 Гц. Поява дефекту спричиняє появу спектральних піків, кратних до частоти обертання валу у смузі 150 ... 500 Гц, амплітуди яких зростають з розвитком дефекту (рис. 13, б, в).

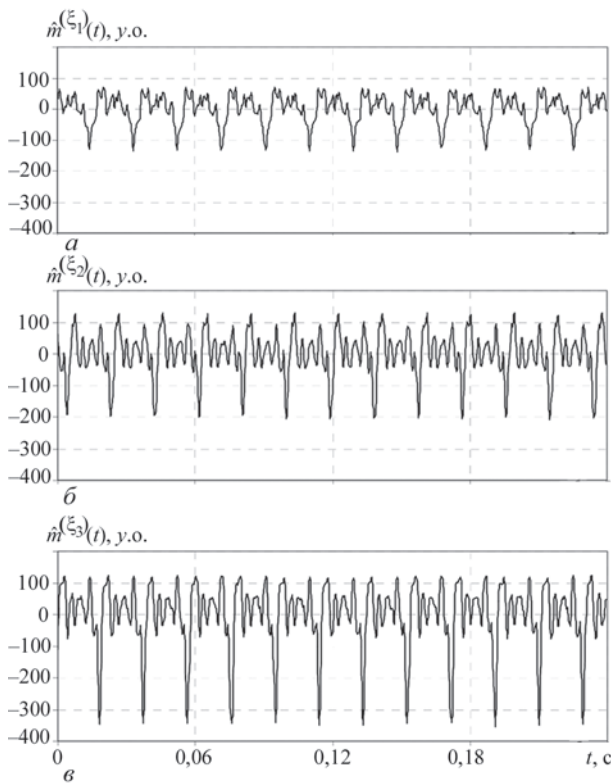


Рис. 9. Математичні сподівання вертикальної складової: березень (а), червень (б), серпень (в)

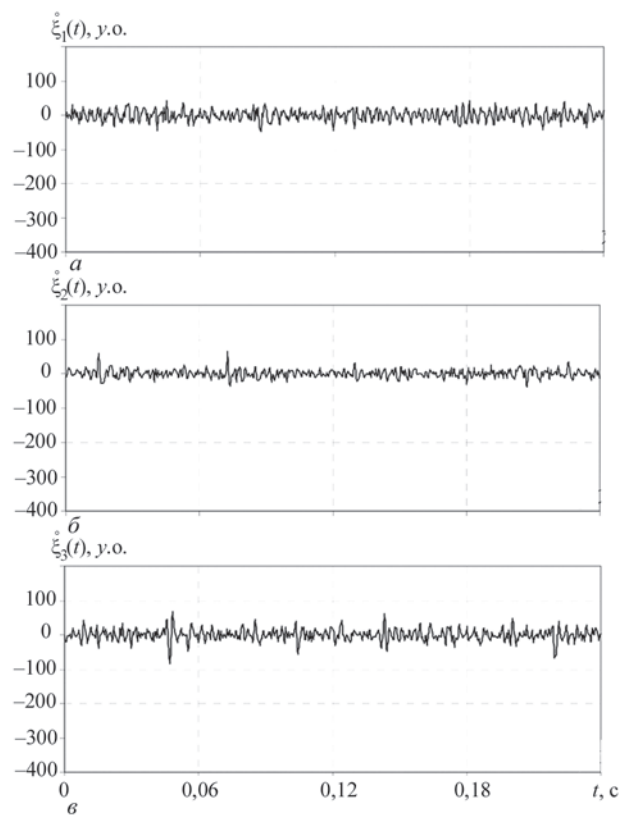


Рис. 11. Стохастичні складові вертикальної складової: березень (а), червень (б), серпень (в)

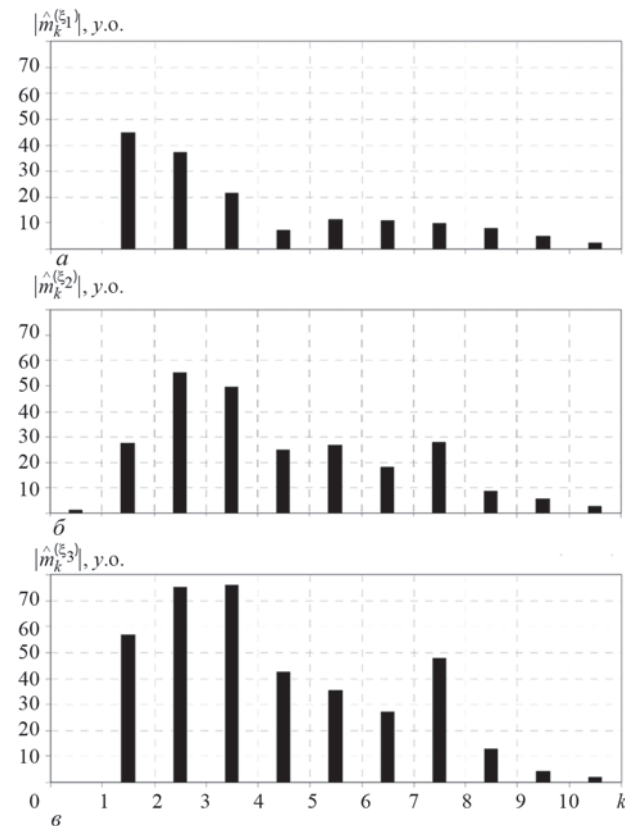


Рис. 10. Компоненти математичних сподівань вертикальної складової: березень (а), червень (б), серпень (в)

Застосовуючи когерентний метод [9, 15–18] пошуку прихованих періодичностей для стохастичних складових вібраційних сигналів, у сигналах,

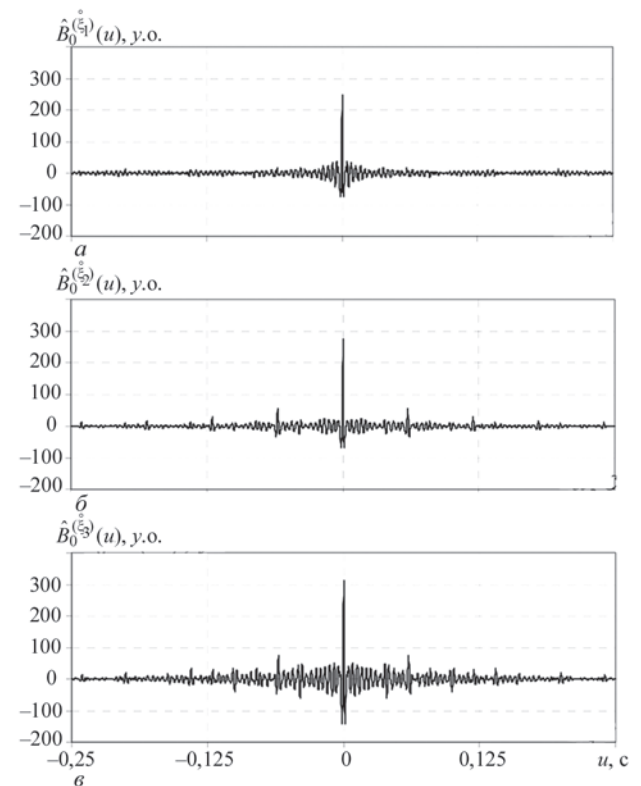


Рис. 12. Кореляційні функції стохастичних складових вертикальної складової: березень (а), червень (б), серпень (в)

відібраних у червні (рис. 14, б) та серпні (рис. 14, в), виявлені потужні модуляції стаціонарними випадковими процесами частоти обертання валу.

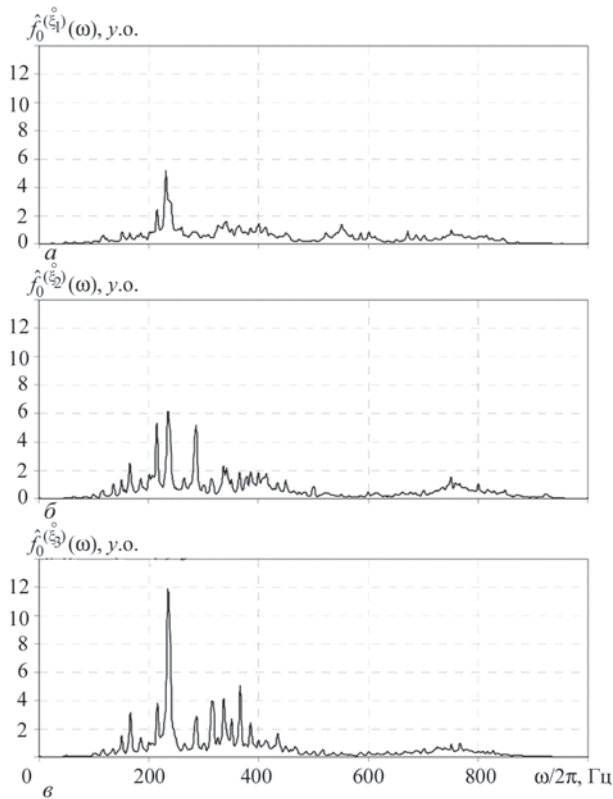


Рис. 13. Спектральні густини стохастичних складових вертикальної складової: березень (а), червень (б), серпень (в)

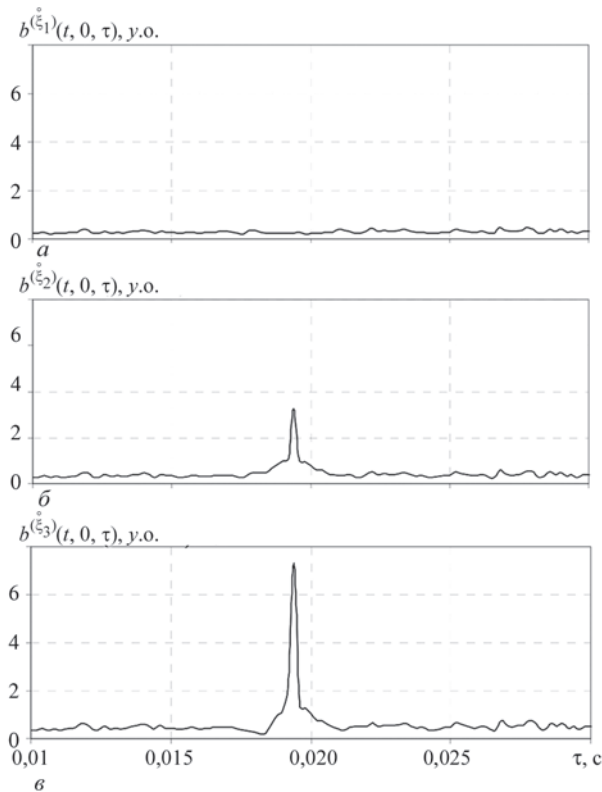


Рис. 14. Функціонал оцінки періоду стохастичної складової вібраційних сигналів вертикальної складових: березень (а), червень (б), серпень (в)

Застосовуючи метод найменших квадратів [19, 20] для аналізу стохастичних складових вібрацій-

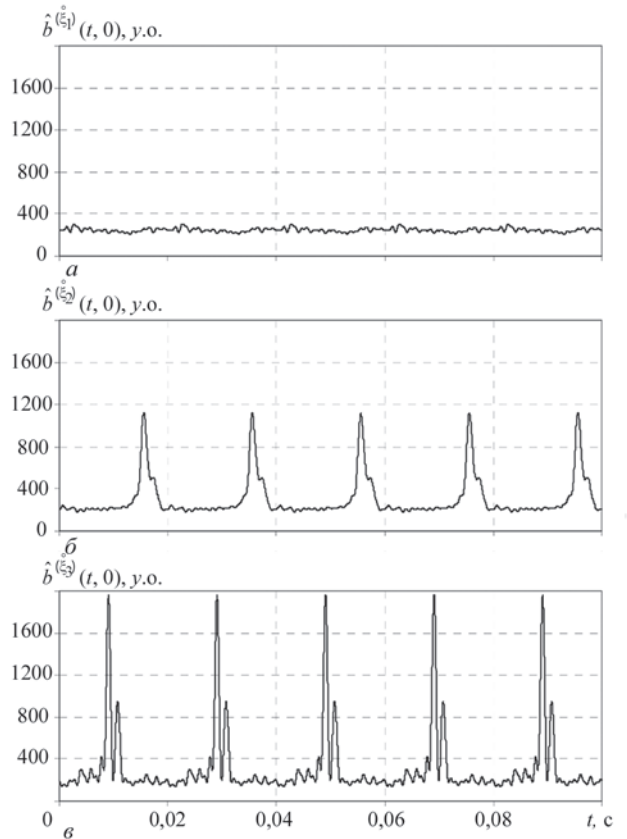


Рис. 15. Дисперсії стохастичних складових вертикальної складової: березень (а), червень (б), серпень (в)

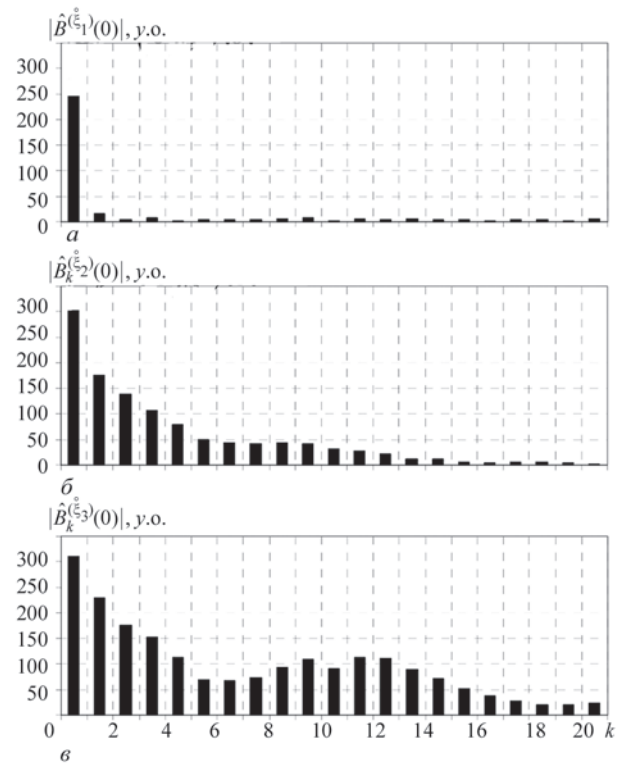


Рис. 16. Компоненти дисперсії стохастичних складових вертикальної складової: березень (а), червень (б), серпень (в)

них сигналів, оцінено дисперсії цих складових та їх компоненти Фур'є. З графіків дисперсії видно,



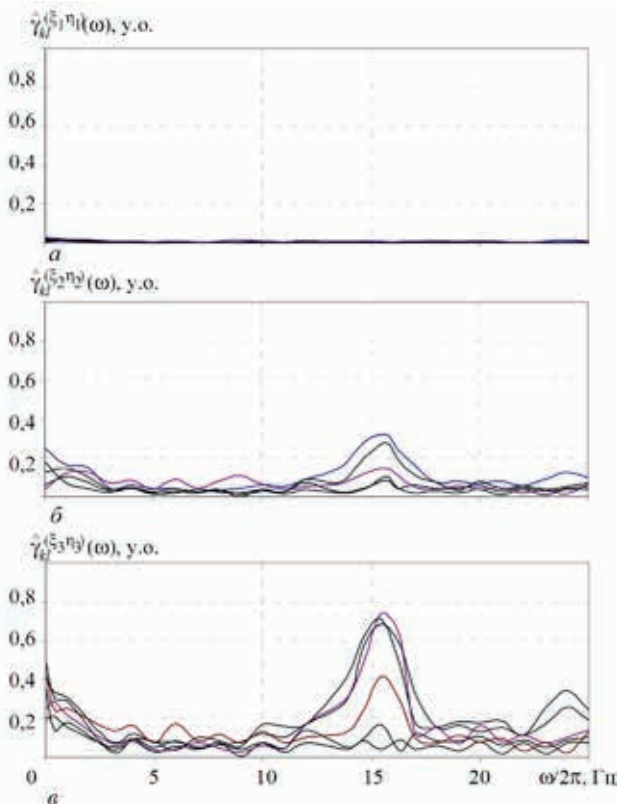


Рис. 17. Оцінки покомпонентної функції когерентності 1-го порядку  $|k - l| = 1$ : березень (а), червень (б), серпень (в)

що дисперсія стохастичної складової вібраційного сигналу, відібраного у березні, має вигляд малопотужних флуктуацій відносно певного рівня, що свідчить про стаціонарність цієї складової сигналу, а отже і про відсутність дефекту у підшипниковому вузлі (рис. 15, а). Поява дефекту до набуття стохастичними складовими вібраційних сигналів характеристик періодичної нестационарності другого порядку, що відображається у появі потужних викидів у дисперсії за період (рис. 15, в). Співвідношення мінімального значення дисперсії до максимального у червні становить 0,352, а у серпні – 0,165.

Серед значущих компонентів Фур'є дисперсії стохастичної складової вібраційного сигналу, отриманого у березні, присутня лише нульова компонента (рис. 16, а). Поява дефекту спричиняє появу вищих гармонічних складових дисперсії та ріст їх амплітуд. Дисперсія стохастичної складової вібраційного сигналу, відібраного у червні, містить 9 значущих компонент (рис. 16, б), а у серпні – 15 (рис. 16, в).

Аналогічний аналіз проведений і для горизонтальних складових вібраційних сигналів. Для горизонтальної і вертикальної складових проведений взаємний кореляційний і спектральний аналізи [9], виділено їх стаціонарні компоненти та побудовано покомпонентні функції когерентності (рис. 17) для дефекту, що розвивався впродовж моніторингу турбоагрегатів.

Видно, що більшість стаціонарних компонентів корелюють в смузі 13...16 Гц, максимуму функцій когерентності досягають в точці, близькій до 16 Гц.

**Висновки**

Поєднання багаточкового відбору вібраційних сигналів, методів взаємного статистичного аналізу ПКВП та програмного забезпечення цифрової обробки сигналів у розробленому компактному пристрої неруйнівного контролю «Компакт-Вібро» дає можливість підвищити ефективність вібродіагностики обертових вузлів технологічних об'єктів під час експлуатації без зміни їх штатних режимів функціонування.

На основі методів взаємкореляційного і взаємспектрального аналізів вібраційних сигналів з використанням введених функцій когерентності були виявлені та локалізовані дефекти елементів промислових об'єктів на ранній стадії їх розвитку.

Численні практичні дослідження підтвердили, що при появі дефектів сигнали вібрації набувають властивостей нестационарності другого порядку, характеристики яких є чутливими до аналізу розвитку дефектів. Тому їх доцільно використовувати при проведенні моніторингу. Такий моніторинг турбоагрегатів ТЕС розробленими методами дав змогу виявити ряд типових дефектів опорних підшипників ковзання (обертовий зрив, вихрова змазка, збільшення зазорів між валом та бабітовою прокладкою, відколювання бабіту), що було підтверджено під час ремонту обертових вузлів.

**Список літератури**

1. Vogl, G.W., Weiss, B.A., Donmez, M.A. NISTIR 8012 Standards Related to Prognostics and Health Management (PHM) for Manufacturing: National Institute of Standards and Technology U.S. Department of Commerce.
2. Коллакот Р.А. (1980) *Диагностирование механического оборудования*. Ленинград, Судостроение.
3. Мигущенко Р.П. (2014) *Елементи контролю та діагностики стану вібраційних об'єктів*: монографія. Харків, Вид-во «Підручник НТУ «ХП»».
4. McCormick, A.C., Nandi, A.K. (1998) Cyclostationarity in rotating machine vibrations. *Mech. Syst. Signal Process*, **12**, 2, 225–242.
5. Capdessus, C., Sidahmed, M., Lacoume, J.L. (2000) Cyclostationary processes: application in gear faults early diagnosis. *Ibid*, **14**, 3, 371–385.
6. Марченко Б.Г., Мыслович М.В. (1992) *Вибродиагностика подшипниковых узлов электрических машин*. Киев, Наукова думка.
7. (2001) *Механіка руйнування та міцність матеріалів. Дов. посібник. Т. 5. Неруйнівний контроль та технічна діагностика*. Назарчук З.Т. (ред.). Львів, ФМІ ім. Г.В. Карпенка НАН України.
8. Явленский К.Н., Явленский А.К. (1983) *Вибродиагностика и прогнозирование качества механических систем*. Ленинград, Машиностроение.
9. Яворський І.М. (2013) *Математичні моделі та аналіз стохастичних коливань*. Львів, ФМІ ім. Г.В. Карпенка НАН України.
10. Javorskyj, I., Yuzefovych, R., Matsko, I., Zakrzewski, Z. (2017) Component-wise coherence function for jointly



- related periodically non-stationary random processes. *Radioelectronics and Communication Systems*, **60**, 1, 28–41.
11. 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. *Техн. діагност. та неруйнів. контроль*, **1**, 17–27.
  12. Bendat, J.S., Piersol, A.G. (2010) *Random Data: Analysis and Measurement Procedures*. New York, John Wiley&Son.
  13. Obuchowski J., Wylomanska A., Zimroz R. (2015) Identification of cyclic components in presence of non-Gaussian noise application to crusher bearings damage detection. *Journal of Vibroengineering*, **17** (3), 1242–1252.
  14. Hinich, M.J. (2000) A statistical theory of signal coherence. *IEEE Journal of Oceanic Engineering*, **25** (2), 254–259.
  15. Rice, J.A., Rosenblatt, M. (1988) On frequency estimation. *Biometrika*, **75** (3), 477–484.
  16. Бенткус Р., Сушинскас Ю. (1985) Выделение скрытых периодичностей. *Применение теории вероятностей и математической статистики*, **6**, 77–78.
  17. Голубев Г.К. (1988) Об оценивании периода сигнала неизвестной формы на фоне белого шума. *Проблемы передачи информации*, **29** (4), 38–52.
  18. Куликов Е.И., Трифонов А.П. *Оценка параметров сигналов на фоне помех*. Москва, Сов. радио.
  19. Javorskyj, I.M., Dzeryn, O.Yu., Yuzefovych, R.M. (2019) Analysis of mean function discrete LSM-estimator for biperiodically nonstationary random signal. *Mathematical Modeling and Computing*, **6** (1), 44–57.
  20. Javorskyj, I.M., Dzeryn, O.Yu., Yuzefovych, R.M. (2020) Discrete LS Estimates of correlation function of bi-periodically correlated random signals. *Radioelectronics and Communications Systems*, **63** (3), 136–155.
  6. Marchenko, B.G., Myslovich, M.V. (1992) *Vibration diagnostics of bearing assemblies of electric machines*. Kiev: Naukova Dumka [in Russian].
  7. (2001) *Fracture mechanics and strength of materials: Reference book. Vol.5: Nondestructive testing and technical diagnostics*. Ed. by Z.T. Nazarchuk. Lviv: PMI [in Ukrainian].
  8. Yavlensky, K.N., Yavlensky, A.K. (1983) *Vibration diagnostics and prediction of quality of mechanical systems*. Leningrad, Mashinostroenie [in Russian].
  9. Yavorskyi, I.M. (2013) *Mathematical models and analysis of stochastic oscillations*. Lviv: PMI [in Ukrainian].
  10. Javorskyj, I., Yuzefovych, R., Matsko, I., Zakrzweskyi, Z. (2017) Component-wise coherence function for jointly related periodically non-stationary random processes. *Radioelectronics and Communication Systems*, **60**(1), 28–41.
  11. Yuzefovych, R.M., Yavorskyi, I.M., Dzeryn, O.Yu., Trokhym, G.R., Stetsko, I.H., Matsko, I.Y. (2020) Application of specialized nondestructive testing device for analysis of vibration signals of bearing assemblies by the methods of mutual nonstationary analysis. *Tekhn. Diahnost. ta Neruiniv. Kontrol*, **1**, 17–27 [in Ukrainian].
  12. Bendat, J. S., Piersol, A.G. (2010) *Random Data : Analysis and Measurement Procedures*. New York: John Wiley&Sons.
  13. Obuchowski, J., Wylomanska, A., Zimroz, R. (2015) Identification of cyclic components in presence of non-Gaussian noise application to crusher bearings damage detection. *J. of Vibroengineering*, **17** (3), 1242–1252.
  14. Hinich, M.J. (2000) A statistical theory of signal coherence. *IEEE J. of Oceanic Engineering*, **25** (2), 254–259.
  15. Rice, J.A., Rosenblatt, M. (1988) On frequency estimation. *Biometrika*, **75** (3), 477–484.
  16. Bentkus, R., Sushinskas, Yu. (1985) Identification of latent periodicity. *Primenenie Teorii Veroyatnostej i Matem. Statistiki*, **6**, 77–78 [in Russian].
  17. Golubev, G.K. (1988) About estimation of the period of unknown shape signal against the white noise background. *Problemy Peredachi Informatsii*, **29** (4), 38–52 [in Russian].
  18. Kulikov, E.I., Trifonov, A.P. (1978) Estimation of signal parameters against the noise background. Moscow, Sov. Radio [in Russian].
  19. Javorskyj, I.M., Dzeryn, O.Yu., Yuzefovych, R.M. (2019) Analysis of mean function discrete LSM-estimator for biperiodically nonstationary random signal. *Mathematical Modeling and Computing*, **6** (1), 44–57.
  20. Javorskyj, I.M., Dzeryn, O.Yu., Yuzefovych, R.M. (2020) Discrete LS estimates of correlation function of bi-periodically correlated random signals. *Radioelectronics and Communications Systems*, **63** (3), 136–155.

References

DEVICES FOR DETECTION OF DEFECTS AT EARLY STAGES OF THEIR INITIATION AT DETERMINATION OF TECHNICAL CONDITION OF MECHANISMS

R.M. Yuzefovych, I.M. Yavorskyi, I.Y. Matsko, O.V. Lychak, G.R. Trokym, O.Yu. Dzeryn, I.H. Stetsko

G.V. Karpenko Physico-Mechanical Institute of NASU. 5 Naukova str., 79060, Lviv, Ukraine.

E-mail: roman.yuzefovych@gmail.com

Vibration signal is the carrier of information about certain system defects, it has the properties of repeatability and stochasticity. These properties allow describing and studying the mathematical model in the form of periodically correlated random process (PCRP). PCRP probabilistic characteristics reflect the modulation interaction of the stochastic and deterministic components of vibration, which arises in the case of defect appearance. Mutual PCRP-analysis of vibration signals, the use of the introduced coherence functions allows detecting defects, classifying their types, as well as determining their location. The combination of multi-point selection of vibration signals, methods of mutual statistical PCVP-analysis and digital signal processing software in the developed compact device for non-destructive testing «Compact-Vibro» allows increasing the efficiency of vibration diagnostics of rotating units of technological facilities during operation without changing their standard operating modes. The monitoring of TPP turbounits by the developed methods allowed revealing a number of typical defects of support slide bearings, which was confirmed during the repair of rotating units. 20 Ref., 17 Tables.

Keywords: nondestructive testing, vibration, periodically correlated random process, specialized devices, defect, slide bearing

Надійшла до редакції 23.10.2020