

**І.М. Яворський, Р.М. Юзефович, І.Б. Кравець,
І.Й. Мацько, І.Г. Стецько, П.П. Луферчик**

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

ВІБРОАКУСТИЧНА СИСТЕМА ВАС-1 ДЛЯ РАННЬОЇ ВІБРАЦІЙНОЇ ДІАГНОСТИКИ ОБЕРТОВИХ МЕХАНІЗМІВ



Представлена розроблена у Фізико-механічному інституті ім. Г.В. Карпенка НАН України віброакустична система для виявлення та діагностики дефектів обертових вузлів механізмів на ранніх стадіях їх розвитку, основою якої є теорія і методи статистики періодично нестационарних випадкових процесів та їх узагальнень. Описано функціональні можливості системи. Розглянуто приклад її застосування при виявленні та ідентифікації дефектів підшипників ковзання турбоагрегатів ТЕС.

Ключові слова: віброакустична система, дефекти механізмів, періодично нестационарні випадкові процеси.

Необхідність переходу від контролю працездатності технічних об'єктів до діагностування дефектів, що зароджуються, приводить до пошуку таких діагностичних ознак, які реагують на незначні відхилення параметрів технічного стану від норми. Виявлення несправностей, які ще не призвели до катастрофічних наслідків, визначення ступеня розвитку дефекту і його ознак можливі лише на основі дослідження тонкої структури вібросигналів і її зв'язку з кінематикою і динамікою механізмів. Опис такої структури, в свою чергу, можливий на основі адекватних математичних моделей вібросигналів, які відображають власне ті їх риси, котрі необхідні для встановлення стану механічної системи. Характерними ознаками вібраційних коливань є повторюваність і стохастичність. Повторюваність зумовлена циклічним принципом дії багатьох механізмів, а стохастичність може бути викликана флуктуаціями товщини і в'язкості змащення, змінами

сил тертя, спонтанними та некерованими змінами навантажень, турбулентністю і т. д. Повторюваність і стохастичність здебільшого виступають у властивостях вібрацій не незалежно, а у взаємодії. Саме в характері такої взаємодії проявляються ті властивості коливного процесу, які в багатьох випадках є визначальними для встановлення стану об'єкта, що його породжує. Адекватними моделями для опису й аналізу цієї взаємодії є періодично й майже періодично нестационарні випадкові процеси (в рамках теорії другого порядку – періодично та майже періодично корельовані) [1–2]. Підхід, що ґрунтується на таких моделях, нами був вперше апробований для аналізу сигналів вібрації підшипникових опор турбогенераторів ТЕС [3–4] і показав свою ефективність при подальших дослідженнях [1, 2, 5–10]. Дефекти обертових механізмів проявляються у вібросигналах як у генеруванні нових гармонічних складових, так і в їх модуляції. Імовірнісні характеристики періодично корельованих випадкових процесів (ПКВП) є носіями інформації про такі зміни, тому можуть вико-

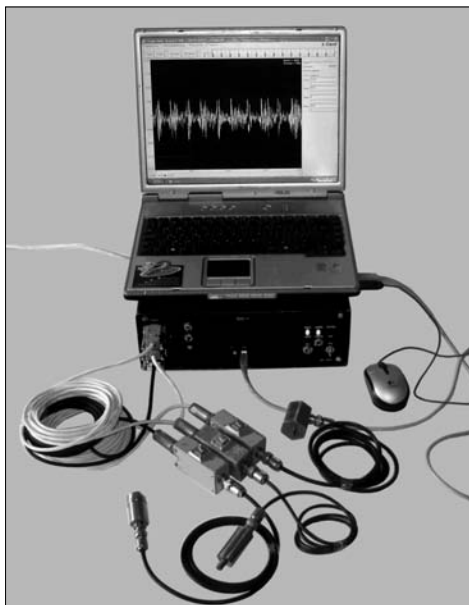


Рис. 1. Зовнішній вигляд системи VAS-1

ристовуватися як безпосередньо для діагностики, так і бути основою для формування нових діагностичних ознак, і ці ознаки дають можливість виявляти дефекти вже на ранніх стадіях розвитку. Останнім часом ПКВП-підхід до аналізу вібраційних сигналів розвивається ба-

гатьма вченими (див., напр., [11–14]). *J. Antoni* назвав концепцію, яка ґрунтується на аналізі вібросигналів методами ПКВП і їх узагальнень, *революційною*. У своїх дослідженнях ми виходимо з оригінальних результатів з теорії і статистики ПКВП і майже ПКВП-моделей методах виявлення прихованих періодичностей. Такі дослідження проведені з залученням всього комплексу імовірнісних характеристик першого й другого порядків: *математичного сподівання, кореляційної функції, змінної в часі спектральної густини, їх коефіцієнтів Фур'є*.

На основі розвинених методів у Фізико-механічному інституті ім. Г.В. Карпенка НАН України створена інформаційна віброакустична система VAS-1 (рис. 1), яка забезпечує:

- ✦ реєстрацію, вимірювання, аналогову низькочастотну фільтрацію та підсилення сигналу вібрації;
- ✦ перетворення аналогового сигналу в цифровий код;
- ✦ запис цифрового сигналу в пам'ять персонального портативного комп'ютера;
- ✦ основні види цифрової фільтрації, перетворення Гільберта, диференціювання сигналу вібрації;

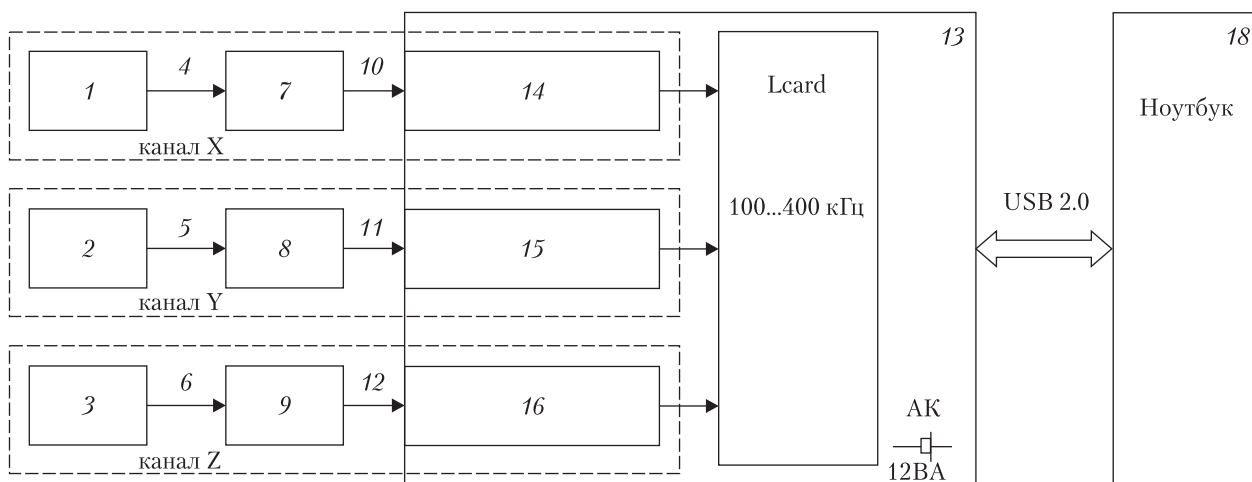


Рис. 2. Структурна схема віброакустичної системи VAS-1: 1–3 – п'єзоакустичні перетворювачі; 7–9 – перетворювачі заряду; 4–6 і 10–12 – з'єднувальні кабелі; 13–15 – канал основного підсилення та формування АЧХ; 16 – аналого-цифровий перетворювач типу Lcard (100-400 кГц); 17 – блок системи VAS-1; 18 – персональний комп'ютер типу ноутбук

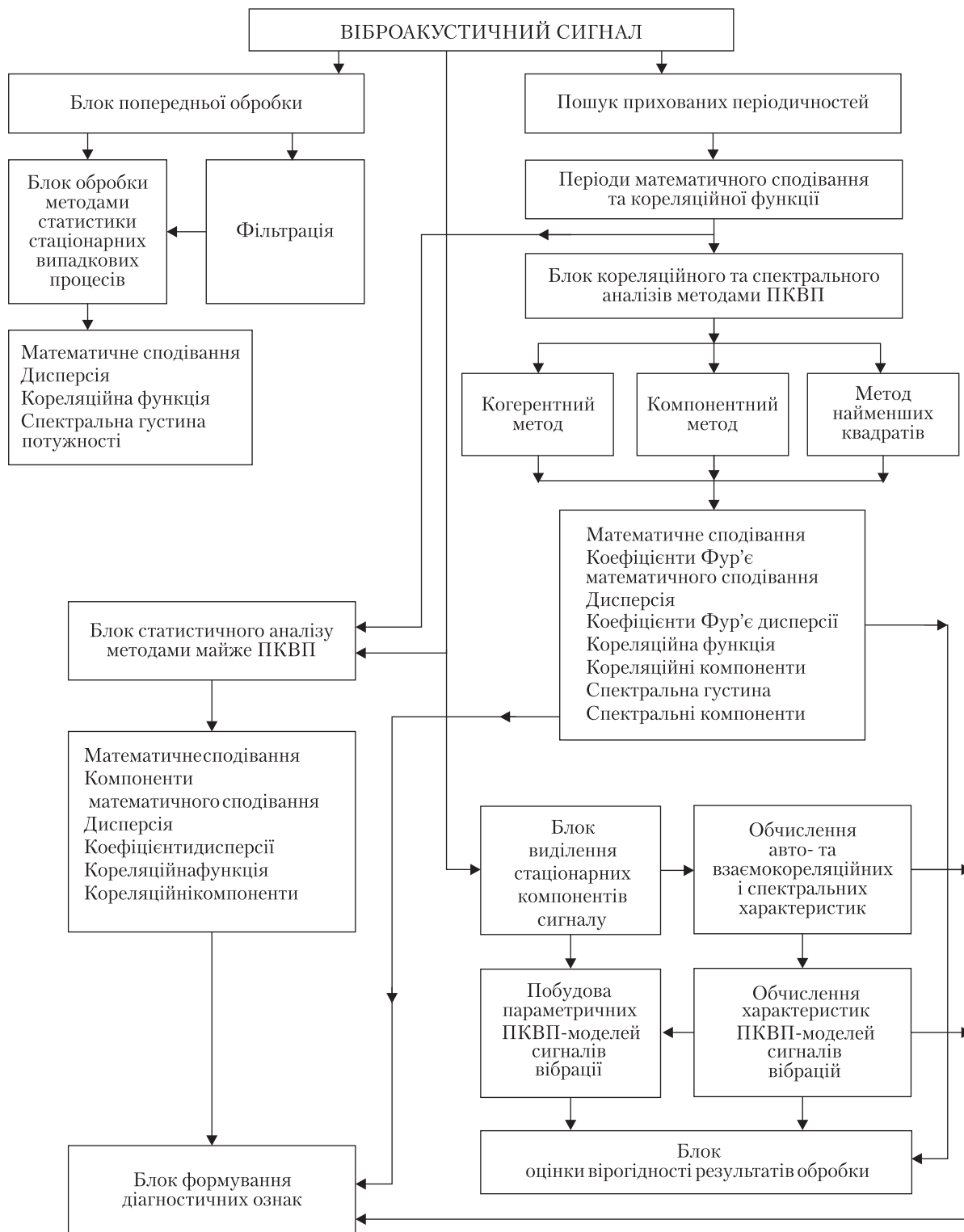


Рис. 3. Блок-схема програмного забезпечення Vibro Analyzer

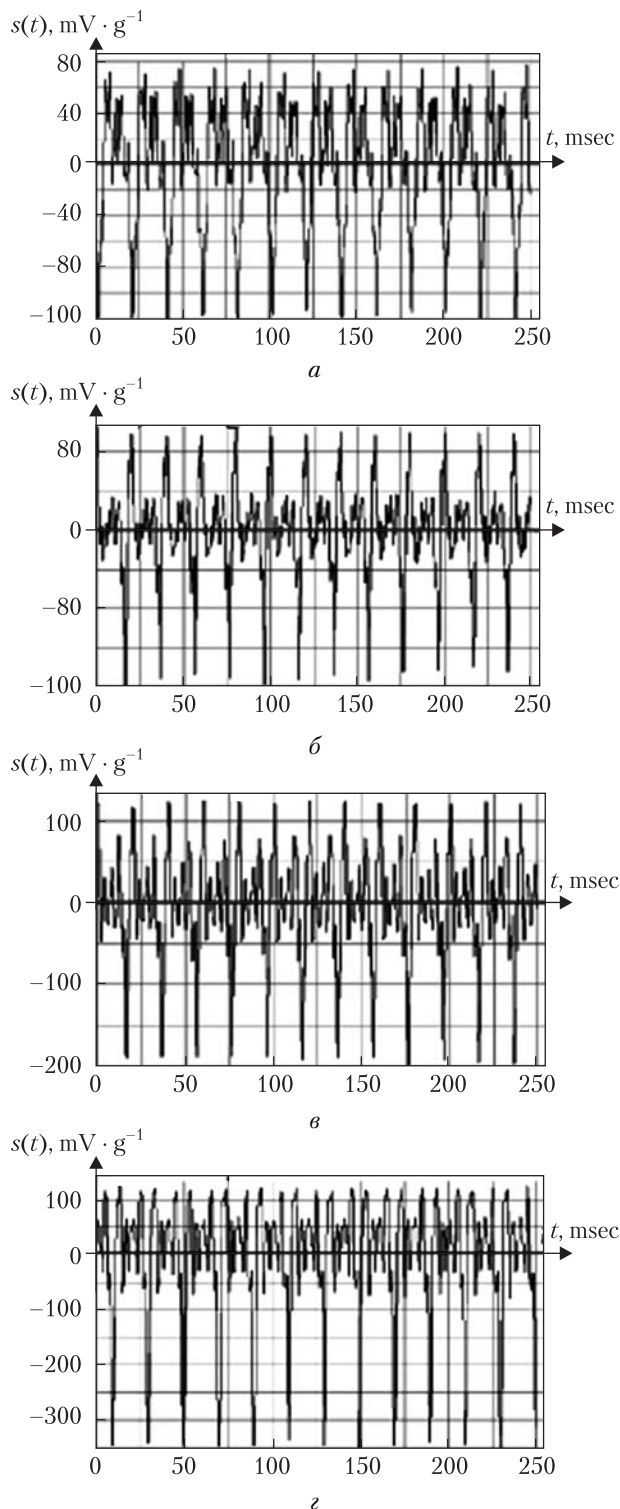


Рис. 4. Виділена детермінована складова сигналу: *а* – 19.03.2008; *б* – 08.05.2008; *в* – 19.06.2008; *г* – 14.08.2008

- ✦ статистичний спектрально-кореляційний аналіз сигналів вібрації в стаціонарному наближенні;
- ✦ оцінку періодів математичного сподівання та кореляційної функції сигналів вібрації як реалізацій ПКВП;
- ✦ виділення детермінованої складової вібро-сигналу та обчислення її параметрів;
- ✦ виділення періодично нестаціонарної складової та її періодично спектрально-кореляційний аналіз методами ПКВП;
- ✦ виділення модулюючих стаціонарних компонентів вібросигналу та їх статистичний аналіз;
- ✦ побудову параметричних моделей сигналів вібрації та обчислення діагностичних ознак;
- ✦ статистичне моделювання ПКВП-моделей вібросигналів із заданою спектрально-кореляційною структурою;
- ✦ статистичний аналіз поліритміки сигналів за методами майже ПКВП;
- ✦ оцінку вірогідності результатів статистичного спектрально-кореляційного аналізу періодично і майже періодично корельованих нестаціонарних сигналів вібрації.

Структурна схема віброакустичної системи ВАС-1 показана на рис. 2. П'єзоакустичні перетворювачі 1–3 є давачами віброприскорення, вони встановлюються на корпусі механічного вузла за допомогою магніту або з'єднання шпилькою. Перетворювачі заряду 7–9 необхідні для узгодження та передачі електричного заряду з віброакустичних перетворювачів до входних кіл системи обробки інформації. З'єднання між вузлами в системі здійснюється за допомогою з'єднувальних кабелів 4–6 та 10–12, довжина яких становить близько 10 м. Канали основного підсилення 13–15 та формування амплітудно-частотної характеристики дають можливість встановлювати коефіцієнти передачі від –3 до 30 дБ по напрузі та смугу пропускання в залежності від задачі аналізу інформації. У первинному варіанті можна вибрати одну із смуг пропускання 0,003-0,5; 0,003-5; 0,003-30 кГц на рівні 3 дБ.

Сигнали з кожного каналу надходять у аналогово-цифровий перетворювач типу Lcard, час-

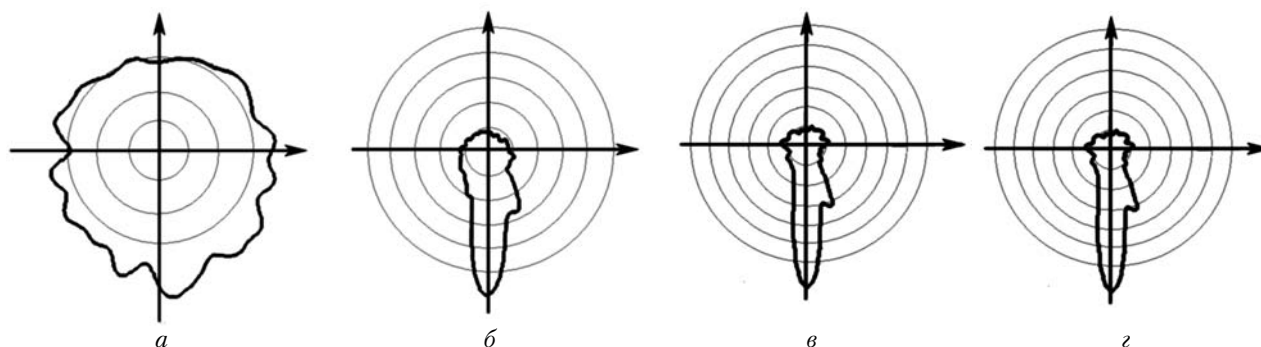


Рис. 5. Оцінки дисперсії випадкової складової сигналу в полярних координатах: *a* – березень; *б* – травень; *в* – червень; *г* – серпень

тота дискретизації якого становить до 400 кГц і через порт USB 2.0 надходять у персональний комп'ютер типу ноутбук, де здійснюється обробка за закладеними алгоритмами та архівування. З метою захисту сигналів від спотворень можливими потужними завадами у системі використовуються парафазні лінії прийому-передачі. Передбачено можливість автономної роботи системи від акумулятора 12 В-А.

Поставлені задачі статистичного аналізу сигналів вібрації і формування діагностичних ознак вирішуються з використанням розробленого програмного продукту Vibro Analyzer (рис. 3). Теоретичною основою обґрунтування алгоритмів обробки стали отримані нами результати в області теорії і аналізу стохастичних коливань [15–20], в тому числі й виявлення прихованих періодичностей [21–24]. Для обчислення оцінок характеристик коливань використовуються когерентний [15] і компонентний [16] методи, метод найменших квадратів [17], метод лінійної гребінчастої та смугової фільтрації [18–19]. Оскільки властивості прихованих періодичностей не завжди проявляються в пікових значеннях спектральної густини стаціонарного наближення, то для оцінювання періоду використовуються функціонали, які визначають характер часових змін імовірнісних характеристик як першого, так і другого порядку [20–24]. Оцінки періодів тоді знаходяться як точки екстремальних значень таких функціоналів. Для виділення модулюючих стаціонар-

них компонентів сигналів використовуються два методи. Перший з них полягає в частотному зсуві сигналу на величину, кратну основній частоті відповідного циклу і подальшій низькочастотній фільтрації.

У другому методі за допомогою смугової фільтрації виділяються складові, спектри яких зосереджені в діапазонах шириною, що дорівнює основній частоті, а далі з використанням перетворення Гілберта знаходяться огинаючі цих складових. Такі перетворення сигналів дають можливість провести аналіз імовірнісних характеристик самих огинаючих гармонічних складових ПКВП та дослідити їх взаємкореляційні і взаємспектральні характеристики.

З використанням віброакустичної системи ВАС-1 було проведено цілий ряд діагностичних робіт на підприємствах України, результати яких показали її ефективність при виявленні дефектів на стадіях зародження і подальшому аналізі їх розвитку. Проілюструємо це на одному з прикладів проведених досліджень стану підшипникових опор турбоагрегатів Добротвірської ТЕС, а саме короткому аналізу вібраційних сигналів підшипникового вузла, в якому внаслідок послаблення кріплення шийки вала розвинувся дефект, пов'язаний з динамічною нестійкістю мастильного клина. З розвитком дефекту збільшувалась потужність вібраційних коливань і дещо змінювалась їх форма. Оцінки спектральної густини потужності стаціонарного наближення

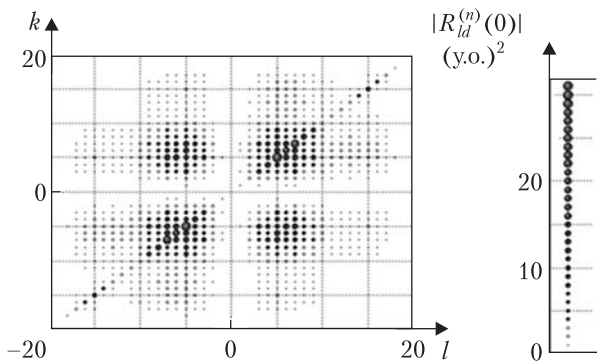


Рис. 6. Оцінки взаємкореляційних функцій стаціонарних компонентів випадкової складової сигналу при нульовому зсуві

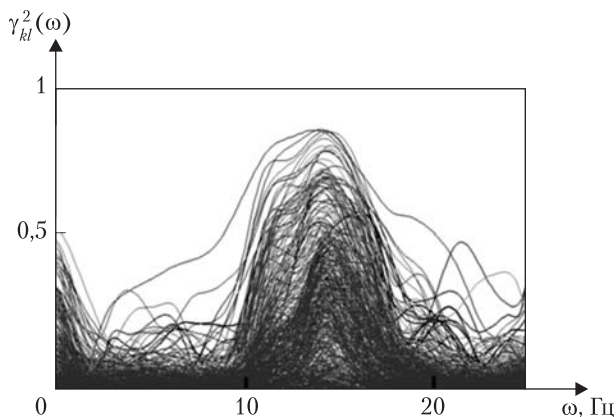


Рис. 7. Оцінки функцій когерентності випадкової складової сигналу

мають піки на частотах, кратних до частоти обертання, проте встановити відповідність між розвитком дефекту та імовірнісними характеристиками, що визначають структуру характеристик стаціонарного наближення, важко. Це, перш за все, пов'язано з потужною детермінованою складовою, форма якої мало залежить від дефекту на ранніх стадіях розвитку (рис. 4). З використанням методу так званої *спектральної надлишковості* зі стохастичної складової була виділена періодично нестаціонарна частина і оцінені її імовірнісні характеристики. Розвиток дефекту чітко проявляється вже у властивостях оцінок дисперсії, графіки яких представлені на рис. 5 у полярній системі координат.

Для ідентифікації типу дефекту підшипникового вузла було використано діагностичні критерії, що ґрунтуються на властивостях виділених стаціонарних модулюючих процесів. Аналіз поведінки оцінок кореляційних характеристик періодично нестаціонарної складової показав, що зі збільшенням зсуву вони осциляційно загасають. Це вказує на вузькосмугову низькочастотну модуляцію гармонік. Властивості останньої конкретизуються при обчисленні оцінок їх авто- та взаємкореляційних і спектральних характеристик. На рис. 6 наведені абсолютні значення оцінок авто- та взаємкореляційних функцій стаціонарних компонентів при нульовому зсуві (на осях систем координат вказані номери компонент). Корельованість стаціонарних компонентів є ознакою періодичної нестаціонарності вібрацій. У даному випадку періодична нестаціонарність визначається корельованістю компонентів, що модулюють 3-у і 9-у гармоніки.

Результати спектрального аналізу доцільно подавати у вигляді сумісних графіків оцінок функцій когерентності (рис. 7). Видно, що більшість стаціонарних компонентів корелюють між собою у смузі 13–16 Гц, а максимуму функції когерентності досягають у точках, близьких до 16 Гц. Даний факт дає змогу стверджувати про наявність дефекту *«обертаний зрив»*. Такий висновок підтверджується також аналізом оцінок інших спектральних ПКВП-характеристик сигналів.

Використання оцінок характеристик періодично нестаціонарності сигналів виявилось ефективним при виявленні і інших дефектів підшипників ковзання, а саме при збільшенні зазору між шийкою валу та бабітовим вкладишем, збільшенні кута прилягання валу, відколенні бабіту та ін. Так, при збільшенні зазору між валом та вкладишем оцінка функції когерентності має максимум на частоті 25 Гц, а при наявності дефекту *«вихрове змащення»* — на частоті 23 Гц.

Система ВАС-1 показала себе ефективною також при виявленні на початкових стадіях розвитку дефектів підшипників кочення, зуб-

чатих передач, а також великих механічних систем, до яких обертові та поступово-зворотні вузли входять як складові частини.

Таким чином, використання методів ПКВП і їх узагальнення відкриває нові можливості якісного та кількісного аналізу вібраційних сигналів, породжених різноманітними механізмами, з метою діагностики останніх. Методи виділення детермінованого складника і його аналіз дають можливість виявляти фазові зміни процесів у механізмах. Адаптивні методи оцінювання параметрів мінімізують втручання людини у процес обробки, отже їх слід використовувати в автоматизованих діагностичних системах. Методи виділення періодично нестационарного складника дають змогу відокремлювати ті характеристики процесу, які відповідають за дефектні відгуки системи, мінімізуючи тим самим шумові характеристики. Розроблена методика і створена на її основі інформаційно-вимірювальна система дозволяють виявляти дефекти механізмів вже на ранніх стадіях їх розвитку, а також проводити їх класифікацію.

ЛІТЕРАТУРА

1. Михайлишин В.Ю., Яворський І.М., Василюк Ю.Т. та ін. Імовірнісні моделі та статистичні методи аналізу сигналів вібрацій для діагностики машин та конструкцій // Фізико-хімічна механіка матеріалів. — 1997. — № 5. — С. 61–74.
2. Механіка руйнування та міцність матеріалів. Дов. посібник. Т. 5. Неруйнівний контроль та технічна діагностика // Під ред. Назарчука З.Т. — Львів: ФМІ, 2001. — 1132 с.
3. Василюк Ю.Т., Михайлишин В.Ю., Яворський І.М. Аналіз нестационарних модульованих випадкових сигналів вібрацій в системах технічної діагностики // Надійність. Современное состояние, проблемы, перспективы. I-ая Украинская науч.-техн. конф. — Киев, 1995. — С. 92–93.
4. Василюк Ю.Т., Михайлишин В.Ю., Яворський І.М. Виявлення прихованих періодичностей в сигналах вібрації машинного обладнання // 2-а Українська конф. з автоматичного керування «Автоматика-1995». — Львів, 1995. — С. 48–49.
5. Назарчук З.Т., Яворський І.М., Михайлишин В.Ю. Застосування теорії періодично корельованих випадкових процесів до раннього виявлення дефектності обертювих систем // 3-я міжнародна конференція «Механіка руйнування матеріалів і міцність конструкцій». — Львів, 2004. — С. 403–410.
6. Яворський І.М., Драбич П.П., Драбич О.П. та ін. Методи і нові технічні засоби вібродіагностики підшипникових вузлів та зубчатих передач // Проблеми ресурсу безпеки експлуатації конструкцій, споруд та машин. — К.: Інститут електрозварювання ім. Є.О. Патона НАН України, 2006. — С. 52–56.
7. Яворський І.М., Ісаєв І.Ю., Кравець І.Б. та ін. Методи підвищення ефективності статистичного аналізу сигналів вібрації підшипникових опор турбоагрегатів теплоелектростанцій // Фізико-хімічна механіка матеріалів. — 2009. — № 3. — С. 49–59.
8. Яворський І.М., Драбич П.П., Ісаєв І.Ю. та ін. Розробка інформаційно-вимірювальної системи для вібродіагностики підшипників великих стаціонарних агрегатів // Проблеми ресурсу безпеки експлуатації конструкцій, споруд та машин. — К.: Інститут електрозварювання ім. Є.О. Патона НАН України, 2009. — С. 113–122.
9. Яворський І.М., Драбич П.П., Кравець І.Б. та ін. Методи і засоби ранньої діагностики обертювих механізмів // Праці міжнар. наук.-техн. конф. “Ресурс, надійність та ефективність використання енергетичного обладнання”. — Харків, 2010. — С. 31–38.
10. Яворський І.М., Драбич П.П., Кравець І.Б., Мацько І.Й. Методи вібраційної діагностики початкових стадій пошкодження обертювих систем // Фізико-хімічна механіка матеріалів. — 2011. — Т. 47, № 2. — С. 134–140.
11. Capdessus C., Sidahmed M., Lacoume J.L. Cyclostationary processes: Application in Gear Faults Early Diagnosis // Mechanical Systems and Signal Processing. — 2000. — Vol. 14 (3). — P. 371–385.
12. Antoni J., Bonnardot F., Raad A., El Badaoui. Cyclostationary modeling of rotating machine vibration signals // Mechanical Systems and Signal Processing. — 2004. — Vol. 18. — P. 1285–1314.
13. Zhu Z., Kong F. Cyclostationary Analysis for Gearbox Condition Monitoring: Approaches and Effectiveness // Mechanical Systems and Signal Processing. — 2005. — Vol. 19 (3). — P. 467–482.
14. Antoni J. Cyclostationarity by examples // Mechanical Systems and Signal Processing. — 2009. — Vol. 23. — P. 987–1036.
15. Javorskyj I., Isaev I., Zakrzewski Z., Brooks S.P. Coherent Covariance Analysis of Periodically Correlated Random Processes // Signal Processing. — 2007. — Vol. 87. — P. 13–32.
16. Javorskyj I., Isayev I., Majewski J., Yuzefovych R. Component covariance analysis for periodically correlated ran-

- dom processes // Signal Processing. — 2010. — Vol. 90. — P. 1083–1102.
17. *Javorskyj I., Yuzefovych R., Kravets I., Zakrzewski Z.* Least Squares Method in the Statistic Analysis of Periodically Correlated Random Processes // Radioelectronics and Communications Systems. — 2011. — Vol. 54 (1). — P. 45–59.
 18. *Javorskyj I., Leskow J., Kravets I., Isayev I., Gajacka E.* Linear filtration methods for statistical analysis of periodically correlated random processes — Part I. Coherent and component methods and their generalization // Signal Processing. — 2012. — 92. — P. 1559–1566.
 19. *Javorskyj I., Leskow J., Kravets I., Isayev I., Gajacka E.* Linear filtration methods for statistical analysis of periodically correlated random processes — Part II. Harmonic series representation // Signal Processing. — 2011. — 91. — P. 2506–2519.
 20. *Javorskyj I.M.* The Probabilistic Analysis of Stochastic Oscillation // Informatisation Technologies and Systems. — P 1. — 1999. — Vol. 2. — № 1. — P. 42–64; P 2. — 2002. — Vol. 5. — № 1–2. — P. 168–184.
 21. *Яворский И.Н.* Применение схемы Буй-Балло при статистическом анализе ритмических сигналов // Изв. ВУЗов. Радиоэлектроника. — 1984. — Т. 27. — С. 31–37.
 22. *Яворский И.Н.* О статистическом анализе периодически коррелированных случайных процессов // Радиотехника и электроника. — 1985. — № 6. — С. 1096–1104.
 23. *Javorskyj I., Mykhajlyshyn V.* Probabilistic Models and Investigation of Hidden Periodicities // Appl. Math. Letters. — 1996. — Vol. 9. — № 2. — P. 21–23.
 24. *Михайлишин В.Ю., Яворский И.Н.* Статический анализ радиофизических процессов со скрытой периодичностью // Радиофизика и радиоастрономия. — 1996. — № 2. — С. 243–254.

*И.Н. Яворский, Р.М. Юзефович, И.Б. Краветц,
И.Й. Мацько, И.Г. Стецько, П.П. Луферчик*

ВИБРОАКУСТИЧЕСКАЯ СИСТЕМА VAS-1 ДЛЯ РАННЕЙ ВИБРАЦИОННОЙ ДИАГНОСТИКИ ВРАЩАЮЩИХСЯ МЕХАНИЗМОВ

Представлена разработанная в Физико-механическом институте им. Г.В. Карпенка НАН Украины виброакустическая система для выявления и диагностики дефектов вращательных узлов механизмов на ранних стадиях их развития, основой которой являются теория и методы статистики периодически нестационарных случайных процессов и их обобщений. Описаны функциональные возможности системы. Рассмотрен пример её применения при выявлении и идентификации дефектов подшипников скольжения турбоагрегатов ТЭС.

Ключевые слова: виброакустическая система, дефекты механизмов, периодически нестационарные случайные процессы.

*I.M. Javorskyj, R.M. Yuzefovych, I.B. Kravets,
I.Y. Matsko, I.G. Stetsko, P.P. Lufcherchik*

VIBROACOUSTIC SYSTEM VAS-1 FOR EARLY VIBRATION DIAGNOSTICS OF ROTATING MECHANISMS

Vibroacoustical system developed in Karpenko Physico-mechanical institute of NAS of Ukraine and intended for detection and diagnostic of rotating mechanisms defects on their early stage is presented in the article. It is based on theory and statistic methods of periodically non-stationary random processes and their generalizations. The functional properties of the system are described. The example of its usage for detection and identification of sliding bearings defects of turbo-unit of power plants is shown.

Key words: vibroacoustic system, defects in the mechanisms, periodically nonstationary random processes.

Стаття надійшла до редакції 10.08.12