

УДК 620.179

**Г. Р. Трохим**, канд. техн. наук**І. Г. Стецько**

\* Фізико-механічний інститут ім. Г. В. Карпенка НАН України  
(м. Львів, e-mail: george@ipm.lviv.ua, stko\_i@yahoo.com)

## **ЦІЛІСНІСТЬ ІНФОРМАЦІЇ В СИСТЕМАХ ВІБРОДІАГНОСТИКИ ТА ДОСТОВІРНІСТЬ ЇЇ ВІДБОРУ**

*Здійснено оглядовий аналіз вібродіагностичних систем. Звернено увагу на достовірність відбору та повноту формування сигналів первинними перетворювачами. Вказано на необхідність застосування як конструктивних, так і програмних засобів тестування багатоканальних систем вібродіагностики.*

*Осуществлен обзорный анализ вибродиагностических систем. Внимание сосредоточено на достоверности отбора и полноте формирования сигналов первичными преобразователями. Указана необходимость применения как конструктивных, так и программных средств тестирования многоканальных систем вибродиагностики.*

Високі темпи росту витрат на обслуговування та ремонти експлуатованого обладнання вимагають переходу до методів його експлуатації за фактичним станом. З одного боку, контроль забезпечується вбудовуванням вимірювальних засобів та введенням модулів і алгоритмів оцінки поточного стану. З другого – створюють зовнішні системи збору і аналізу діагностичної інформації як із вбудованих, так і з додаткових джерел прямої чи опосередкованої інформації про стан об'єктів контролю. Однак досвід розробки методів вібродіагностики свідчить про економічну недоцільність вбудовування сучасних вимірювальних засобів в обладнання, виготовлене в минулому столітті. Також невдачею завершуються спроби використати в прогнозуючих системах первинні сигнали з датчиків систем керування чи аварійного захисту. Найчастішою причиною є невідповідність характеристик встановлених первинних перетворювачів вимогам наступного поглибленого аналізу [1].

Цілісність інформації при вібродіагностиці, насамперед, пов'язана з операціями над даними. Дані під час відбору, зберігання, передачі, прийому та подання можуть мінятися. Методи боротьби з такими змінами при передачі та зберіганні в основному зводяться до методичного формування даних блоками, вміст яких або їхні статистичні характеристики кодуються певним числом, що передається разом з даними. При відборі інформації ми маємо справу як з випадковістю поведінки вимірюваної величини, так і з випадковістю дотримання умов вимірювання незмінними.

Достовірність – властивість інформації бути правильно сприйнятою. Для перевірки достовірності визначають, наскільки точно модель або виконувана імітація відображає детальний концептуальний опис, прийнятий розробником. Міра наближення даних до дійсності може характеризуватись, наприклад, точністю або імовірністю правильного визначення властивостей досліджуваного об'єкта (класифікація, ідентифікація, місце знаходження, час появи, стан, активність та ін.). При цьому достовірність визначається як самою мірою відповідності даних дійсності, так і суб'єктивними вимогами до цієї міри.

Для визначення працездатності і технічного стану обладнання параметри його вібрації контролюють на попадання в зону допустимих. Вихід вібрації чи швидкості її росту за допустимі межі трактується як відмова обладнання за вібрацією. Моніторинг вібраційного стану обладнання проводять за низькочастотними коливаннями, притаманними технологічному процесу (орієнтовно до 1000 Гц). Допустимі межі вібрації та місця її заміру звичайно визначаються стандартами [2].

З технічним станом обладнання параметри вібрації також можна пов'язати статистично. Тоді задачі вібраційної діагностики вирішують аналізуючи як низькочастотну, так і високочастотні вібрації, в т.ч. ультразвукову (до 100 кГц і більше). Розв'язання таких задач називають статистичним, бо про ефективність конкретних методів і засобів діагностики судять за імовірністю помилкового розв'язку [3].

Серед технічних засобів моніторингу стану та діагностики можна виділити три основні групи:

- стаціонарні засоби контролю параметрів робочих процесів в системах керування обладнанням. Жорсткі вимоги до вимірювальних засобів систем керування щодо достовірності отримуваної інформації призводять до обмежень багатьох характеристик вимірювальних перетворювачів та обсягу їх вихідних даних. Однак первинна інформація з таких засобів може бути корисною і для діагностування за вторинними процесами;
- засоби функціональної діагностики (переносні або стаціонарні). Останнім часом стає популярною поглиблена функціональна діагностика за вторинними ознаками. Вона розрахована на довготерміновий прогноз стану і не потребує безперервних вимірювань. Головною причиною зацікавлення нею є мінімізація витрат на першому етапі впровадження засобів діагностики при максимальному охопленні діагностикою більшої частини експлуатованого обладнання. Для такої діагностики найчастіше використовують переносні засоби вимірювання і аналізу діагностичних сигналів. Достовірність діагнозу такими системами не вдається збільшити скороченням інтервалів між вимірюваннями. Тому її піднімають отриманням додаткової інформації з цих самих сигналів вібрації, аналізуючи їх в перехідних режимах роботи машин і обладнання, наприклад при пусках, стрибках навантаження та ін. Для аналізу вібрації в перехідних режимах потрібні багатоканальні засоби синхронного відбору. В переносних системах діагностики без суттєвого зростання витрат можна збільшувати як різноманітність використаних сигналів, так і кількість точок їх відбору;
- засоби візуальної і тестової діагностики, які використовують в спеціальних режимах роботи або на непрацюючому обладнанні. З ефективних засобів візуальної діагностики виділяють системи зовнішнього відеоспостереження та ендоскопи для огляду внутрішніх поверхонь обладнання. Деякі засоби тестової діагностики можуть входити до складу переносних приладів і систем функціональної діагностики для розширення їх можливостей. Так, засоби відеоспостереження можуть контролювати невтручання сторонніх осіб в процес відбору сигналів та ретельність монтажу устаткування.

В переносних системах збільшують не тільки кількість точок контролю, а і кількість використовуваних алгоритмів виявлення дефектів. З розвитком технічних характеристик вимірювальних перетворювачів розширюється їх динамічний і частотний діапазони і, як результат, збільшується обсяг попередньої обробки сигналів. Для розв'язання окремих діагностичних задач в реальному часі створюються спеціалізовані контролери. Так само як і для стаціонарних систем захисту і діагностики, такі контролери можуть виконувати функцію захисту обладнання (сигналізація) і паралельно видавати в інформаційну мережу потік цифрових даних для більш складних діагностичних задач.

Деякі фірми йдуть шляхом виготовлення універсальних інформаційно-вимірювальних систем. Використовуючи можливості багатоканального збору сигналів, попередньої фільтрації, аналого-цифрового перетворення та запам'ятовування великих об'ємів даних, вони пропонують такі системи для широкої гами промислових застосувань, в т.ч. і вібровимірювань. Такі системи перетворюються в діагностичні вибором відповідного програмного забезпечення, яке пропонується розробником, але може розроблятися і власними силами замовника. Серед найвідоміших в ближньому зарубіжжі – російські фірми ZETLab [4] і LCARD [5]. Кожна з них знайшла свою нішу в ціновому діапазоні можливих покупців і подбала про внесення своїх приладів в Держреєстр вимірювальних засобів.

Оцінювати функціональність механічних машин логічно за фізичними параметрами механічного руху або за реакцією опорних елементів його перетворення. Переміщення,

швидкість і прискорення об'єкта – це пов'язані фізичні величини. Швидкість (вібраційна швидкість) визначається як перша похідна переміщення (вібраційне зміщення), а прискорення (вібраційне прискорення) – як друга. Однак взяти другу похідну сильно зашумленого сигналу практично неможливо, оскільки отримаємо дуже велику похибку, навіть при використанні складних схем обробки. Як правило, в низькочастотній області (в смузі порядку 1 Гц) задовільну точність забезпечують давачі положення і переміщення. В зоні середніх частот (менше 1 кГц) вже бажано використовувати давачі швидкості, тоді як на високих частотах, коли переміщення співмірні з рівнем шуму, застосовують давачі прискорення (акселерометри). На етапі моделювання акселерометрами вважають пристрої (принаймні) з одним ступенем вільності, до складу яких входить: еталонна маса, пружна підтримуюча система і рама, що має демпферні властивості [6]. У точці відбору давач вібрації перетворює суперпозицію довокільох коливань в сигнал, що призначений, наприклад, для подальшого гармонічного аналізу.

Незнання просторової орієнтації вектора вимірюваних коливань веде до того, що будь-який однокомпонентний (за чутливістю) перетворювач видасть деяку скалярну величину, що є проекцією вектора на його вимірювальну вісь (яка має випадкову орієнтацію відносно самого вектора). Відповідно, використання системи таких «скалярних» перетворювачів, які просто фізично неможливо розташувати в одній точці, буде давати занижені оцінки енергетичних процесів. Окрім того, потрібно забезпечити синхронне, з урахуванням фазових зсувів пов'язаних просторових компонентів, вимірювання в часі і в просторі параметрів коливань механічного поля в місці встановлення давачів.

У загальному випадку для об'єктивного оцінювання параметрів механічних коливань необхідно і достатньо достовірно визначити шість пов'язаних часом компонентів вектора або довільну компоненту і її просторову орієнтацію відносно вектора. При використанні декартової системи координат для повного опису просторового коливального руху необхідно мати достовірну інформацію про три лінійні і три кутові компоненти [7].

Практично, для знаходження напрямку на джерело вібрації використовують тривісні акселерометри. Для визначення його координат використовують системи з двома і більше тривісними акселерометрами [8]. Для зовнішніх (відносно технологічного обладнання) засобів вібродіагностики має значення визначення координат всіх віброджерел, що діють на точку вимірювання. Зокрема, такі віброджерела можуть бути зовнішніми по відношенню до діагностованого обладнання, тому правильну верифікацію джерел вібрацій можуть забезпечити тільки системи тривісних акселерометрів.

Крім поліпшення, одночасна реєстрація більшої кількості параметрів збільшує вплив непередбачуваних факторів та методичні помилки вимірювань. До них слід віднести помилку встановлення давача (невірне розташування на обладнанні відносно діагностованого вузла, недостатньо щільне прилягання давача до вузла), вплив електромагнітних перешкод на корисний сигнал з давачів вібрації (наводи від кіл живлення), пошкодження чи обрив кабелю. Випадковість дії вказаних чинників не дозволяє відрізнити їх появу від нормального стану функціонування. Мало того, повне усунення цих факторів під час діагностування є неможливим. Для реалізації таких вимог потрібна відповідна методика контролю достовірності відбору сигналу. За методикою, запропонованою в [9], можна виділити такі етапи:

- підтвердження наявності в спектрі сигналу чітко вираженого гармонічного ряду від частоти мережі живлення. Однак такі гармоніки може містити і спектр коректно знятих сигналів, і, власне, за наявності дефектів. Розрізнити їх можна за енергетичними властивостями, тобто за значно більшою амплітудою наведень від кіл живлення, ніж від вібросигналів. Крім основної, аналізують ще другу та третю гармоніки в смугах  $f_x \pm 0,02f_x$ , де  $f_x$  – значення характеристичних частот гармонік (50, 100 і 150 Гц). Потім середньоквадратичне значення амплітуди сигналу в цьому діапазоні частот порівнюється з амплітудою гармоніки  $f_x$ . Коли воно менше від амплітуди гармоніки на задану порогову величину для всіх трьох частот, то роблять висновок про перешкоду від живлення. Для достовірного відбору потрібно усунути причину наводу.

– контроль відповідності місця установки контрольованому вузлу здійснюється порівнянням спектра з еталонним для даного вузла. На цьому етапі також виявляються пошкодження ліній передачі від давачів та помилки їхнього встановлення. Відповідність спектрів оцінюється за величиною коефіцієнта кореляції. Спектр сигналу, отриманий з точки установки давача вібрації, можна подати у вигляді суми незмінної і випадкової складових. Характеристикою точки відбору є незмінна складова, яка обумовлена власними резонансами досліджуваного вузла в даній точці. Еталонний спектр для кожного вузла і описує цю незмінну складову. Випадкова складова формується під впливом різних зовнішніх факторів та поточного стану діагностованого вузла.

Для здійснення такої методики програмне забезпечення має містити алгоритми монтажу давачів, тесту проходження сигналу та калібрування вимірювального тракту і формування бази еталонів [9]. Прикладом використання властивостей давача є метод спектрального аналізу амплітудної огинаючої віброцигнали на резонансній частоті давача (резонансний метод) [10]. Використовуючи смуговий фільтр, отримують вузькосмуговий високочастотний випадковий процес. У випадку наявності пошкодження несуча частота сигналу такого процесу буде модулюватись частотою проходження дефектної зони контактуючими тілами. Детектуванням огинаючої і подальшою спектральною обробкою отримують складові спектра на частоті повторення та її гармоніках.

До згаданих контрольних процедур як доповнення можна запропонувати використання окремої лінії керування для переводу давача в тестовий режим, але не по входу, як це забезпечено в мікросхемі інтегрального акселерометра ADXL001-70 [11] запуском внутрішнього генератора вібрацій, а по виходу, від'єднанням сигнального виходу давача від лінії передачі і шунтуванням її входу відомим резистором для аналізу спектрального шуму лінії та ідентифікації давача за вибраним опором цього резистора.

Можливість роботи багатоканальних систем з давачами різного принципу дії та компонентного наповнення потребує ускладнення комутації їх вихідних кіл та схем живлення. Прикладом такої системи може бути вібраційна діагностична система «Вектор» [12], яка забезпечує роботу з широким асортиментом вібраційних давачів.

За умови зростання кількості одночасно задіяних вимірювальних каналів систем вібродіагностики та забезпечення універсальності їх входів для різних типів давачів, вимоги забезпечення цілісності та достовірності інформації здійснюють спеціальними методами конструювання давачів, введенням розвинутої комутації входів реєстраторів та програмними засобами тестових та монтажних робіт.

## Література

1. Барков А. В. Основные направления мониторинга состояния и диагностики машин и оборудования на транспорте / А. В. Барков // Докл. на науч.-практ. конф. по технологии судостроения, судоремонта и эксплуатации «Онега – 2009». [Электронный ресурс] – Режим доступа: [http://www.vibrotek.ru/russian/UsersFiles/File/doklad\\_2009.pdf](http://www.vibrotek.ru/russian/UsersFiles/File/doklad_2009.pdf).
2. Внешние модули АЦП/ЦАП и цифрового ввода/вывода LCARD. [Электронный ресурс] – Режим доступа: <http://www.lcard.ru/products/external/about>.
3. *Неразрушающий контроль*: Справочник: в 7 т. / Под общей ред. В. В. Клюева. Т. 7: В 2 кн. Кн. 2: Ф. Я. Балицкий, А. В. Барков, Н. А. Баркова и др. Вибродиагностика. – М.: Машиностроение, 2005. – 829 с.
4. Фрайден Дж. Современные датчики / Дж. Фрайден. – М.: Техносфера, 2005. – 592 с.
5. Переносной анализатор спектра низкочастотного диапазона ZET 017-U2. [Электронный ресурс] – Режим доступа: [http://www.zetms.ru/catalog/analyzers/a17\\_u2.php](http://www.zetms.ru/catalog/analyzers/a17_u2.php).
6. Андриенко В. Ю. Определение координат источника вибровозмущений / В. Ю. Андриенко, Ю. Г. Жуковский // Зб. наук. пр. VI наук.-техн. конф. «ПРИЛАДОБУДУВАННЯ 2007: стан і перспективи», ПБФ НТУУ «КПІ». – К., 2007. – С. 33–34.
7. Сперанский А. А. Фундаментальный подход к реконструкции механических полей для оценки эксплуатационных свойств изделий оборонпрома / А. А. Сперанский, К. Л. Захаров, Д. В. Малютин // Двигатель. – 2009 №3 (63). [Электронный ресурс] – Режим доступа: <http://engine.aviaport.ru/issues/63/page24.html>.

8. Барков А. В. Корпоративные системы диагностики эксплуатируемых машин и оборудования / А. В. Барков, П. П. Якобсон // Докл. на 10-й европ. конф. по неразрушающему контролю. – М., 2010. [Электронный ресурс] – Режим доступа: [http://www.vibrotek.ru/russian/UsersFiles/File/statiy/Korporativnie\\_sistemy\\_dagnostiki.pdf](http://www.vibrotek.ru/russian/UsersFiles/File/statiy/Korporativnie_sistemy_dagnostiki.pdf).
9. Тэттер В. Ю. Обеспечение целостности информации в задачах вибродиагностики / В. Ю. Тэттер, И. В. Федоров, В. Г. Шахов // Машиностроение и машиноведение. Омск. науч. вестн. (80), 2009 № 2. – С. 130–132.
10. Балицкий Ф. Я. Виброакустическая диагностика зарождающихся дефектов / Ф. Я. Балицкий, М. А. Иванова, А. Г. Соколова. – М.: Наука, 1984. – 120 с.
11. ADXL001: High Performance, Wide Bandwidth Accelerometer Data Sheet (Rev A, 02/2010). [Электронный ресурс] – Режим доступа: [http://www.analog.com/static/imported-files/data\\_sheets/ADXL001.pdf](http://www.analog.com/static/imported-files/data_sheets/ADXL001.pdf)
12. Вібраційна діагностична система «Вектор» // Фізико-механічний інститут ім. Г.В. Карпенка НАН України / [Електронний ресурс] – Режим доступа: <http://www.ipm.lviv.ua/departments/dep25/vector.htm>

Надійшла до редакції  
10.11.12

УДК: 658.589: 539.3: 518.61

**Б. Д. Дробенко**, д-р фіз.-мат. наук

**С. Ф. Будз**, канд. фіз.-мат. наук

**В. І. Асташкін**, канд. фіз.-мат. наук

Інститут прикладних проблем механіки і математики

ім. Я.С.Підстригача НАН України,

(м. Львів, e-mail: [drobenko@ukr.net](mailto:drobenko@ukr.net), [budz@iapmm.lviv.ua](mailto:budz@iapmm.lviv.ua),

[dept13@iapmm.lviv.ua](mailto:dept13@iapmm.lviv.ua))

## УТОЧНЕНИЙ РОЗРАХУНОК РЕСУРСУ БАРАБАНА КОТЛА З ЕКСПЛУАТАЦІЙНИМИ ПОШКОДЖЕННЯМИ

*Розглянуто результати скінченноелементного моделювання напруженого стану діючого барабана парового котла високого тиску за умов експлуатації з урахуванням пружно-пластичного деформування та реальної геометрії барабана на післяремонтній стадії. Встановлено значення параметра накопиченої пошкоджуваності металу барабана за режимів стаціонарної експлуатації, планового пуску-зупинки, гідравлічних випробувань та аварійної зупинки котла.*

*Рассмотрены результаты конечноэлементного моделирования напряженного состояния действующего барабана парового котла высокого давления в условиях эксплуатации с учетом упруго-пластического деформирования и реальной геометрии барабана на послеремонтной стадии. Определено значение параметра накопленной поврежденности металла барабана при режимах стационарной эксплуатации, планового пуска-остановки, гидравлических испытаний и аварийной остановки котла.*

### Вступ

В останні роки особливої важливості набуває проблема продовження термінів експлуатації інженерних споруд, конструкцій та об'єктів теплоенергетики, оскільки значна частина з них вже вичерпала свій паспортний ресурс чи наблизилась до цього. За тривалої експлуатації від механічних навантажень, підвищеної температури, абразивного та корозійно-активного середовища у таких елементах утворюються різні пошкодження, серед яких найнебезпечнішими є тріщини і тріщиноподібні дефекти. У разі виявлення таких пошкоджень дієвим способом їх ліквідації є виконання ремонтних технологічних вибірок (усунення