

С.В. Уваров (УМГ «Донбастрасгаз», Україна),  
В.М. Льченко, к.т.н. (Національний авіаційний університет, Україна)

## ДІАГНОСТУВАННЯ ПАРАМЕТРІВ ВІБРАЦІЇ ГАЗОТУРБІННИХ УСТАНОВОК

*У даній роботі розглянуті особливості реалізації завдання діагностування параметрів вібрації для газотранспортної установки. Оцінка вібраційних характеристик дозволяє визначити загальний технічний стан газотранспортного обладнання. Визначена випадкова похибка взаємних спектрів випадкових стаціонарних сигналів.*

Сучасне виробництво висуває все більш зростаючі вимоги до забезпечення дотримання жорстких параметрів технологічних процесів (забезпечення необхідної точності, скорочення тривалості виробничого циклу, компактності виробничих потужностей), що веде до необхідності використання прецизійних вимірювальних систем у виробничих цехових умовах. Особливо критичні до зовнішніх впливів системи контролю механічних величин. Тому останнім часом, зважаючи на посилення вимог, ведуться активні роботи з розробки ефективних засобів їх захисту від зовнішніх збурюючих факторів.

Визначення діагностичних параметрів на інтервалі попередження за результатами моделювання проводиться шляхом порівняння параметрів справного агрегату із прогнозованим, причому цікаві не самі параметри, а ступінь їхнього відхилення від номінальних значень. Для визначення діагностичних параметрів необхідно вирішувати лінеаризовану систему функціональних рівнянь ГПС, у якій по черзі задаються нормовані несправності й розраховуються зміни всіх вимірюваних параметрів потужності, питомої витрати палива, тиску, температури, частоти обертання й т.д.

Системи параметричної діагностики звичайно містять у собі кілька каналів контролю різних процесів, у тому числі вібрації й температури окремих вузлів устаткування. Обсяг використовуваної вібраційної інформації в таких системах обмежений, тобто кожний вібраційний канал контролює два параметри, а саме величину нормованої низькочастотної вібрації й швидкість її наростання. Звичайно вібрація нормується в стандартній смузі частот від 2(10)Гц до 1000(2000)Гц. Величина контрольованої низькочастотної вібрації не завжди визначає реальний стан устаткування, але в передаварійній ситуації, коли з'являються ланцюжки швидко, що розвиваються дефектів, їхній зв'язок істотно виростає. Це дозволяє ефективно використовувати засоби аварійного захисту встаткування по величині низькочастотної вібрації. Такі системи найчастіше використовуються для своєчасного виявлення помилок персоналу, що управляє встаткуванням.

Найбільш істотним і простим методом локалізації джерел вібрації, а також визначення частки вібраційної енергії, переданої від джерела у точку вимірювання, є метод кореляційного аналізу.

Функція взаємної кореляції  $R_{ab}(\tau)$  виражає ступінь кореляції (міра статистичного зв'язку) між двома сигналами  $a(t)$  і  $b(t)$  залежно від їхнього взаємного зсуву (параметра затримки)  $\tau$  у тимчасовій області. Функція взаємної кореляції короткочасних сигналів має вигляд:

$$R_{ab}(\tau) = \int_{-\infty}^{\infty} a(t)b(t+\tau)dt.$$

Для стаціонарних сигналів необхідна невелика модифікація, що допускає перехід від «енергії» до «потужності».

Функцію взаємної кореляції можна визначити на основі відповідного взаємного спектра шляхом зворотного перетворення Фур'є. З урахуванням перетворення Фур'є й теореми згортки одержуємо

$$F\{R_{ab}(\tau)\} = B(f) \cdot A(-f) = B(f) \cdot A^*(f) = S_{AB}(f),$$

тобто, взаємний спектр є трансформацією Фур'є функції взаємної кореляції. Коефіцієнт кореляції  $\rho_{xy}$  випадкових функцій  $x(t)$ ,  $y(t)$  являє собою їх нормований коваріаційний момент як математичне сподівання добутку центрованих значень  $x(t)$  і  $y(t)$ :

$$\rho_{xy} = \frac{\overline{x(t) \cdot y(t)}}{\sigma_y \sigma_x}.$$

Залежно від значень коефіцієнта кореляції прийняті умовні градації взаємозв'язку двох процесів:  $0 < |\rho| < 0,2$  – дуже слабка;  $0,2 < |\rho| < 0,4$  – слабка;  $0,4 < |\rho| < 0,7$  – середня;  $0,7 < |\rho| < 0,9$  – сильна;  $0,9 < |\rho| < 1$  – дуже сильна. Коефіцієнт кореляції визначає загальну частку енергії (потужності, дисперсії) яку вносить один процес в інший, тобто частку дисперсії процесу  $x(t)$ , обумовлену лінійною залежністю від  $y(t)$ . Співвідношення

$$\sigma_{x|y}^2 = \rho_{yx}^2 \cdot \sigma_x^2$$

називається співвідношенням лінійно обумовленої потужності процесу  $x(t)$ , лінійно пов'язаного з вихідним процесом  $y(t)$ .

Взаємний спектр визначається на основі миттєвих (комплексних) спектрів  $A(f)$  і  $B(f)$  (3). Амплітуда взаємного спектра дорівнює добутку амплітуд двох миттєвих спектрів, а його фазовий кут дорівнює різниці властивим цим миттєвим спектрам ( $A \longrightarrow B$ ) фазових кутів. Взаємний спектр  $S_{BA}(B \rightarrow A)$  має ідентичну взаємному спектру  $S_{AB}$  амплітуду, але протилежну фазу. Використовується однобічний взаємний спектр, що позначається  $G_{AB}(f)$  й визначається наступними вираженнями:

$$G_{AB}(f) = 0, f < 0; G_{AB}(f) = S_{AB}, f = 0; G_{AB}(f) = 2S_{AB}(f), f > 0.$$

За аналогічними виразами визначають однобічний власний спектр.

Випадкова похибка взаємних спектрів випадкових стаціонарних сигналів з нормальним (гаусовим) розподілом має вираження [1]:

$$\varepsilon_r \llbracket G_{AB}(f) \rrbracket = \frac{1}{\sqrt{\gamma^2(f) n_d}},$$

де  $\varepsilon_r \llbracket G_{AB}(f) \rrbracket$  – нормована похибка абсолютного значення (модуля) взаємного спектра,  $\gamma^2(f)$  – функція когерентності,  $n_d$  – еквівалентне число незалежних середніх.

Для визначення кількісної міри тісноти спектрального зв'язку величину модуля взаємного спектра нормують. Отримують функцію когерентності (квадрат функції когерентності) двох процесів

$$\gamma_{xy}^2(f) = \frac{|G_{xy}(f)|^2}{G_x(f) \cdot G_y(f)}, 0 \leq \gamma_{xy}^2 \leq 1,$$

де  $G_x(f)$ ,  $G_y(f)$  – відповідні спектральні щільності досліджуваних процесів. Когерентність за аналогією з коефіцієнтом кореляції несе інформацію про ступінь кореляції, тобто про ступінь лінійного взаємозв'язку двох процесів, але тільки в частотній області. Якщо коливальні процеси статистично незалежні, то при всіх значеннях частоти  $\gamma_{xy}^2 \equiv 0$ .

Якщо  $\gamma_{xy}^2(f) \equiv 1$ , то процеси  $x(t)$  і  $y(t)$  абсолютно когерентні. Властивому кожному значенню частоти значення функції когерентності можна розглядати як зведене у квадрат значення коефіцієнта кореляції, що відображає ступінь лінійної залежності між двома процесами – з урахуванням того, що оцінки власних спектрів відповідають варіації змінних величин, а оцінка взаємного спектра відповідає коваріації цих величин.

Алгоритм обробки вібраційних сигналів, отриманих із двох акселерометрів, установлених на двох підшипникових опорах одного ротора, передбачає наступні дії:

1. У синхронному режимі із двох акселерометрів в однойменних напрямках отримують два автоспектра  $|G_{1B}(f)|^2$ ,  $|G_{2B}(f)|^2$ . Динамічний діапазон устанавлюється єдиний – за максимальним значенням рівня віброшвидкості найбільшої частотної складової двох автоспектрів.

2. Частотний діапазон устанавлюється для двох каналів і становить  $F_1 = 0...1000$  Гц із роздільною здатністю  $\Delta f = 1$  Гц;

3. По двох автоспектрах отримуємо однобічний взаємний спектр

$$\overline{G_{1B}^*(f) \cdot G_{2B}(f)}.$$

Взаємний спектр визначається по двох миттєвих спектрах, але для стаціонарних випадкових сигналів або короткочасних сигналів з накладеним шумом більше значна оцінка взаємного спектра виходить шляхом усереднення по ансамблі певного числа реалізацій цих сигналів у тимчасовій області (автоспектри) [1]. Оцінка взаємних спектрів сигналів на входах і виходах лінійних систем не має систематичної похибки за умови достатнього розділення при аналізі.

4. По взаємному спектрі визначається спектр функції когерентності

$$\gamma_{1,2}^2(f) = \frac{|G_{1,2}(f)|^2}{G_1(f) \cdot G_2(f)}.$$

Динамічний діапазон функції когерентності постійний і становить  $0 \leq \gamma \leq 1$ .

Частотний діапазон і розділення по частоті зберігаються від досліджуваних спектрів. Всі частотні складові спектра функції когерентності мають значення від 0 до 1. З огляду на те, що аналізу підлягають частотні складові автоспектра, що мають дуже сильний взаємозв'язок ( $\gamma^2 \geq 0,95$ ), проводимо цифрову фільтрацію.

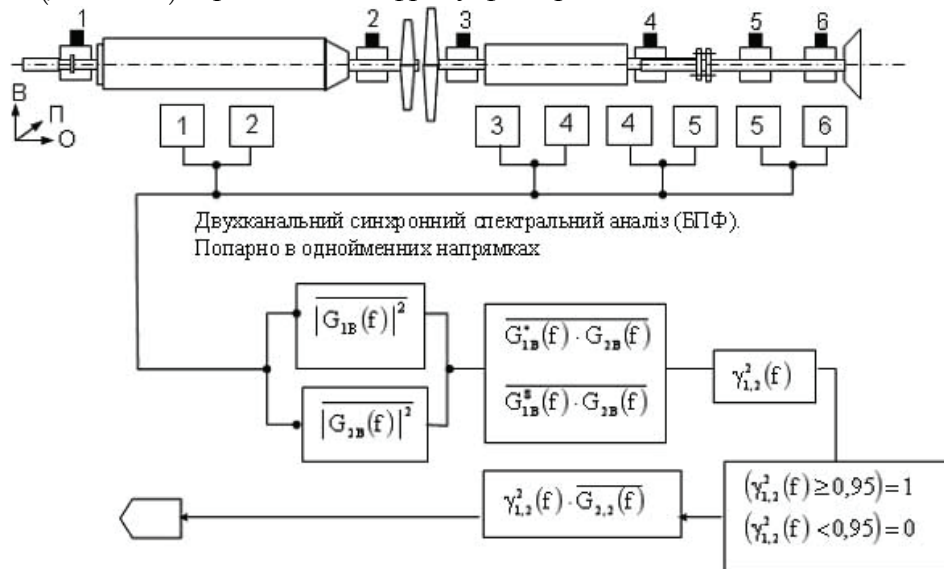


Рис.1. Двухканальний синхронний спектральний аналіз (БПФ) попарно в однойменних напрямках

5. Цифрова фільтрація передбачає тільки два значення частотних складових функції когерентності. Іншими словами, створюється маска для перетворення спектра когерентної вихідної потужності, у якій залишаються частотні складові тільки з високим рівнем функції когерентності, а інші частотні складові відфільтровуються.

6. Береться спектр когерентної вихідної потужності  $\gamma_{1,2}^2(f) \cdot \overline{G_{2,2}(f)}$ . У даному спектрі (рис.2) присутні спектральні складові, які збуджуються тільки ротором турбокомпресора ГТД НК-12.

У спектрі когерентної вихідної потужності присутні п'ять кратних роторних гармонік, рівні яких убувають за експоненціальним законом. Це характерно для залишкового (у межах

норми) дисбалансу ротора турбокомпресора НК-12. Крім того в спектрі виявилися три вузькосмугові процеси із центральними частотами 208, 457 і 523 Гц. Вузькосмугові процеси не містять у собі резонансних, комбінаційних і модуляційних процесів. Це вібрації, що ставляться до корпусних деталей і мають високий рівень функції когерентності, тому що акселерометри встановлені на корпусі турбокомпресора й корпусні вібрації також мають високу когерентність.

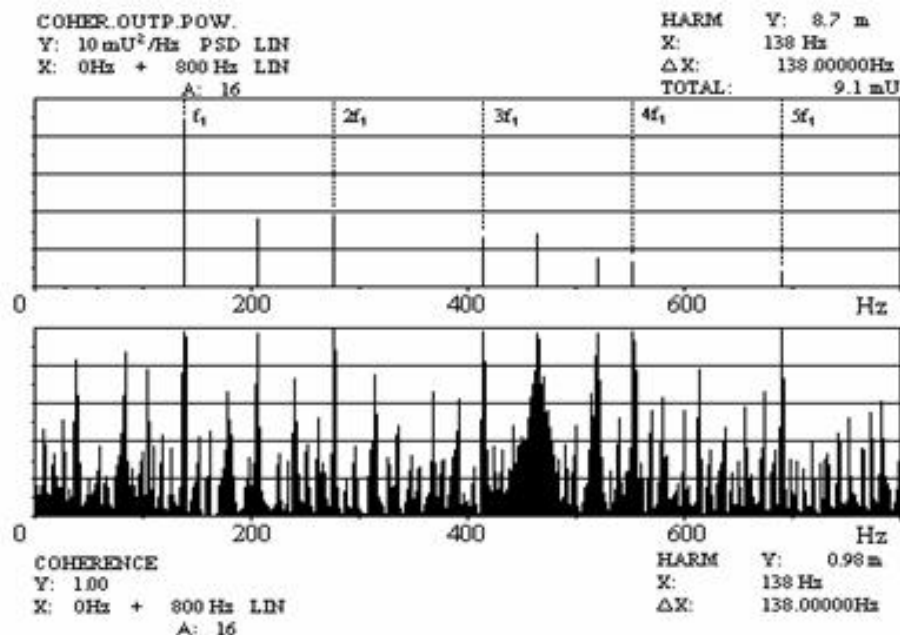


Рис.2. Спектр когерентної вихідної потужності й функції когерентності двигунів

7. Провести аналіз порушуваних вібраційних процесів у роторі турбокомпресора ГТД НК-12 після такої обробки не представляє складності.

Парному аналізу піддаються вібраційні сигнали, отримані з акселерометрів інших вузлів агрегату, послідовно (рис.1.). У системах автоматизованого безперервного контролю з достатнім числом синхронних каналів весь агрегат контролюється одночасно.

### Список літератури

1. В.И. Люлько Докторская диссертация. «Разработка теоретических основ и практических рекомендаций с целью эксплуатации авиационных двигателей воздушных судов гражданской авиации по техническому состоянию и совершенствование процессов их диагностирования». М.: ГОСНИИГА, 2004.
2. А.В. Барков, Н.А. Баркова, А.Ю. Азовцев Мониторинг и диагностика роторных машин по вибрации. Санкт-Петербург.: Изд. СПМТУ, 2000. 158 с.
3. С.В. Тварадзе, А.П. Ушаков. Вопросы оперативного выявления дефектов силовых установок транспортных средств. Академия гражданской авиации, Межвузовский тематический сборник научных трудов «Проблемы эксплуатации и совершенствования транспортных систем». Том X, 2005. С.174-181.
4. В.П. Максимов, И.В. Егоров, В.А.Карасев. Измерение, обработка и анализ быстропеременных процессов в машинах. М.: Машиностроение, 1987. 206с.
5. М. К. Сидоренко. Виброметрия газотурбинных двигателей. М.: Машиностроение 1973. 224с.
6. Добрынин С.А., Фельдман М.С., Фирсов Г.И. Методы автоматизированного исследования вибрации машин: Справочник. – М.: Машиностроение, 1987. – 224 с