ціонарних імпульсних потоків на основі екстремального аналізу // Вісн. ДУ "Львівська політехніка". 1998. № 321. С.84–88. З. Погрібний В.О., Рожанківський І.В., Таянов С.А. Бортова інформаційно-вимірювальна система для дослідження потоків часток в навколоземному просторі //Космічна наука та технологія. 1998. Т.4. № 4. С.44–48.

## УДК 621.311

## ГРЕНЬ Я.В.

## ВИКОРИСТАННЯ РІЗНИЦЕВОГО КОРЕЛЯЦІЙНО-СПЕКТРАЛЬНОГО АНАЛІЗУ ДЛЯ ДІАГНОСТУВАННЯ ТРІЩИН В ЛОПАТКАХ ТУРБІН

© Грень Я.В., 2000

## The technique of turbines blades cracks detection based on analysis damping oscillations after an one-time impulse perturbation is offered. The results of the difference analysis of blades vibration signals in time and frequent areas are represented.

Сучасні засоби неруйнівного контролю, які дозволяють ефективно виявляти тріщини в лопатках турбін на ранніх стадіях їх зародження, вимагають пересування давача вздовж об'єкта дослідження. Ці засоби важко застосувати при огляді лопаток турбін з середини без розкривання корпусу турбіни. У зв'язку з цим актуальною є розробка нових методів діагностування, які позбавлені вказаних недоліків. В роботі пропонується застосувати різницеві методи обробки [1] згасаючих вібраційних сигналів в лопатках турбін після збудження їх імпульсним молотком. Такі вібраційні сигнали є нестаціонарними і їх можна зобразити моделлю локально-стаціонарного процесу. В цьому випадку для ділянок локальної стаціонарності можна адаптувати відомі методи цифрової обробки стаціонарних процесів. Метою даної роботи є розробка нових методів дослідження коливань на локально стаціонарних ділянках за допомогою різницевого кореляційно-спектрального аналізу для діагностування механічних об'єктів, зокрема лопаток турбін.

Тривалість коливань лопаток останніх ступенів після імпульсного збудження становить приблизно 0,1 с, тому ці коливання можна вважати короткотривалими. Для визначення ділянок локальної стаціонарності короткотривалих реалізацій доцільно використати метод ковзного вікна аналізу, логічна схема алгоритму якого записується так [2]:

$$\forall D, \overline{x}, \overline{y}, \Theta \Biggl( \bigwedge_{r=i+1}^{k} \Biggl( \Biggl( \left| D_{x}^{(r)} - D_{x}^{(\partial o \theta)} \right| \le \varepsilon_{Dx} \Biggr) \land \Biggl( \left| \overline{x}^{(r)} - \overline{x}^{(\partial o \theta)} \right| \le \varepsilon_{\overline{x}} \Biggr) \land$$
$$\land \Biggl( \left| D_{y}^{(r)} - D_{y}^{(\partial o \theta)} \right| \le \varepsilon_{Dy} \Biggr) \land \Biggl( \left| \overline{y}^{(r)} - \overline{y}^{(\partial o \theta)} \right| \le \varepsilon_{\overline{y}} \Biggr) \land \Biggl( \left| D_{xy}^{(r)} - D_{xy}^{(\partial o \theta)} \right| \le \varepsilon_{Dxy} \Biggr) \Biggr) \vdash$$

$$\begin{split} \big(\Theta_{A} \in [(i+1)T, (k+N_{gi\kappa}-1)T]\big)\big) & \lor \\ & \bigvee_{r=i+1}^{k} \Big(\Big(\Big(\Big|D_{x}^{(r)} - D_{x}^{(\partial o \beta)}\Big| > \varepsilon_{Dx}\Big) \lor \Big(\Big|\overline{x}^{(r)} - \overline{x}^{(\partial o \beta)}\Big| > \varepsilon_{\overline{x}}\Big) \lor \\ & \lor \Big(\Big|D_{y}^{(r)} - D_{y}^{(\partial o \beta)}\Big| > \varepsilon_{Dy}\Big) \lor \Big(\Big|\overline{y}^{(r)} - \overline{y}^{(\partial o \beta)}\Big| > \varepsilon_{\overline{y}}\Big) \lor \Big(\Big|D_{xy}^{(r)} - D_{xy}^{(\partial o \beta)}\Big| > \varepsilon_{Dxy}\Big)\Big) \Big| & \mapsto \\ & (\Theta_{A} \in [(i+1)T, (k+N_{gi\kappa}-2)T] \land \Theta_{\partial o \beta} \in [kT, (k+N_{gi\kappa}-1)T]))), \end{split}$$

тут  $D_x^{(r)}$ ,  $D_y^{(r)}$ ,  $D_x^{(\partial o \beta)}$  та  $D_y^{(\partial o \beta)}$  – миттєві (віконні) дисперсії на поточному та довірчому інтервалах, відповідно, сигналів x(t) та y(t);  $D_{xy}^{(r)}$  та  $D_{xy}^{(\partial o \beta)}$  – миттєві взаємні дисперсії сигналів x(t) та y(t) на поточному та довірчому інтервалах, відповідно;  $\bar{x}_r$ ,  $\bar{y}_r$ ,  $\bar{x}_{\partial o \beta}$  та  $\bar{y}_{\partial o \beta}$  – миттєві середні значення на поточному та довірчому інтервалах, відповідно, сигналів x(t) та y(t);  $\varepsilon_{\bar{x}}$ ,  $\varepsilon_{\bar{y}}$ ,  $\varepsilon_{Dx}$  та  $\varepsilon_{Dy}$  – допустимі відхилення середнього значення та дисперсії відповідно сигналів x(t) та y(t);  $\varepsilon_{Dxy}$  – допустиме відхилення взаємної дисперсії;  $\Theta_A$  – інтервал аналізу (поточний сумарний інтервал локальної стаціонарності);  $T_{\partial}$  – період дискретизації;  $\Theta_{\partial o \beta}$  – довірчий інтервал, що складається з  $N_{\delta i \kappa}$  відліків;  $r, k = \overline{i+1, N-n+1}$ ;  $N_{\delta i \kappa}$  – кількість відліків вікна аналізу;  $N = ENT(\Theta/T_{\partial})$  – кількість відліків, що аналізуються (повна довжина часового ряду).

Кореляційну функцію на локально стаціонарній ділянці для додатних  $m = \overline{0, P}$  часових зсувів визначаємо як [3]:

$$\hat{K}_{xy}(m, N_A(t)) = \frac{1}{N_A(t) - m} \sum_{k=0}^{N_A(t) - m - 1} x_k^{\circ} y_{k+m}^{\circ}$$

1

і для від'ємних  $-m = \overline{-P, -1}$  зсувів

$$\hat{K}_{xy}(-m, N_A(t)) = \frac{1}{N_A(t) - m} \sum_{k=0}^{N_A(t) - m - 1} x_{k+m} y_k,$$

де  $N_A(t) = ENT(\Theta_A/T_{\partial})$  – кількість відліків локально стаціонарної ділянки,  $\ddot{x}_k$  – центровані відліки досліджуваного сигналу,  $PT_{\partial}$  – інтервал кореляції.

Різниці між кореляційними функціями для додатних та від'ємних зсувів знаходимо з виразів

$$\Delta K_{xy}(m) = \overline{\hat{K}_{xy}(m)} - \hat{K}_{xy}(m), \ \Delta K_{xy}(-m) = \overline{\hat{K}_{xy}(-m)} - \hat{K}_{xy}(-m),$$

де взірцеві кореляційні функції  $\hat{K}_{xy}(m)$ ,  $\hat{K}_{xy}(-m)$  визначаються усередненням за *n* реалізаціями, отриманими при дослідженні неушкодженої лопатки

$$\overline{\hat{K}_{xy}(m)} = \frac{1}{n} \sum_{i=1}^{n} \left( \hat{K}_{xy}(m) \right)_{i} \quad \text{ta} \quad \overline{\hat{K}_{xy}(-m)} = \frac{1}{n} \sum_{i=1}^{n} \left( \hat{K}_{xy}(-m) \right)_{i}.$$

159

Взаємний спектр потужності для  $k = \overline{1, P}$  частот визначаємо на основі перетворення Вінера-Хінчина

$$\hat{G}_{xy}(k) = \sum_{m=-P}^{P} \hat{K}_{xy}(m) \exp\left(-j\frac{2\pi}{2P+1}mk\right),$$

а різницю спектрів як [2]:

$$\Delta G_{xy}(k) = \overline{\hat{G}_{xy}(k)} - \hat{G}_{xy}(k),$$

тут  $\overline{\hat{G}_{xy}(k)}$  – взірцевий взаємний спектр потужності, визначений з усередненої кореляційної функції  $\overline{\hat{K}_{xy}(m, N_A(t))}$ .

Запропонований підхід застосовано при дослідженні розвитку тріщин в лопатці 29 ступеня турбіни К-200-130 ЛМЗ. Тріщина симулювалась шляхом надрізання її на різну глибину при ширині надрізу 1 мм. Дослідження відбувалися за допомогою розробленої автором вібровимірювальної системи, блок-схема якої зображена на рис.1. Система складасться з двох каналів, кожен з яких має первинний перетворювач VS-080 та прилад VIBROTEST 30 виробництва фірми SCHENCK, 16-розрядного аналого-цифрового перетворювача ES-1868,



Рис. 1. Вібровимірювальна система.

персонального комп'ютера та програмного забезпечення, розробленого на основі розглянутих вище різницевих методів обробки сигналів. Для проведення досліджень було збудовано спеціальний стенд, який забезпечував постійність величини та напрямку сили збудження.

Зовнішній вигляд лопатки показано на рис.2, а умовні зображення перерізів А-А, Б-Б, В-В, Г-Г цієї лопатки зображені на рис.3. Місце та напрямок прикладання удару Р показано на рис.3, а (переріз А-А), місце встановлення первинних перетворювачі S1 та S2 – на рис.3, б (перерізи Б-Б та Г-Г), а місце надрізу на глибину 1В, 2В та 3В показане на рис.3, в (переріз В-В).

Досліджуваний після імпульсного збудження вібросигнал (рис.4,а) дискретизовано з частотою 6000 Гц. Віконні середні значення та дисперсії вібросигналу, які визначені за методом ковзного вікна аналізу, зображено на рис.4,б. Величина вікна аналізу при цьому становила 100 відліків.



Рис.2. Лопатка 29 ступеня турбіни К-200-130 ЛМЗ.



Рис. 3. Місце та напрям удару Р (а); місце встановлення первинних перетворювачів S1 та S2 (б); розвиток тріщини (в).

Допустимі відхилення середнього значення  $\varepsilon_{\bar{x}}^{(\max)}$  та дисперсії  $\varepsilon_D^{(\max)}$  визначались на основі виразу

$$\varepsilon_{\overline{x}}^{(\max)} = K_x \sigma_{\Delta \overline{x}} \text{ tr } \varepsilon_D^{(\max)} = K_D \sigma_{\Delta D},$$

тут

$$\sigma_{\Delta \overline{x}} = \left[\frac{1}{n}\sum_{i=1}^{n} \left(\overline{x}^{(i)} - \overline{x}^{(\partial o_{\beta})}\right)^{2}\right]^{1/2} \operatorname{Ta} \sigma_{\Delta D} = \left[\frac{1}{n}\sum_{i=1}^{n} \left(D^{(i)} - D^{(\partial o_{\beta})}\right)^{2}\right]^{1/2},$$

 $K_x$ ,  $K_D$  – коефіцієнти, які вибираються експериментально залежно від характеристик сигналу та допустимих похибок обчислень. Середньоквадратичні відхилення  $\sigma_{\Delta \overline{x}}$  та  $\sigma_{\Delta D}$  знайдені для 30 реалізацій вібросигналу, отриманих при дослідженні неушкодженої лопатки, а  $K_x = K_D = 3$ .

Під час експерименту визначено ряд ділянок локальної стаціонарності вібросигналу лопатки, найдовшу з яких зображено на рис.4,а,б. На цій ділянці віконні середні значення та дисперсії не виходять за межі допустимих відхилень. Тривалість і місцезнаходження цієї ділянки залишалась сталою для усіх реалізацій вібросигналів протягом усього дослідження.



б – поточні миттєві (віконні) середні значення та дисперсії, визначені

за методом ковзного вікна, ----- S1, ----- S2, ---- взаємна дисперсія.

Для кращого сприйняття в роботі використано різниці нормованих кореляційних функцій. Результати визначення різницевих нормованих кореляційних функцій та спектрів потужності в міру зростання тріщини подано на рис.5–7.

При появі і розвитку тріщин спостерігаються зміни взаємних кореляційних функцій. Однак, як видно, різниці взаємних кореляційних функцій є недостатньо наочними, а тому незручними для діагностування тріщин.



Рис.5. Різниці КФ (а) та спектрів потужності (б). Тріщина 1 В.

Цього недоліку позбавлені різниці взаємних спектрів потужності. При малих розмірах тріщин зміна спектрів потужності є незначною і нерегулярною. При зростанні тріщини зміни набувають регулярного характеру, що виявляється у поступовому "перетіканні" спектральних складових у зону низьких частот.



Рис.7. Різниця КФ (а) та спектрів потужності (б). Тріщина ЗВ.

Отримані результати досліджень на основі різницевої обробки короткотривалих вібраційних сигналів, зокрема різниці спектрів, дозволяють зробити висновок про перспективність запропонованого в роботі методу для діагностики лопаток турбін, а також інших механічних об'єктів.

1. Погрибной В.А. Дельта-модуляция в цифровой обработке сигналов. М., 1990. 216 с. 2. Погрібний В.О., Собульски А., Рожанківський І.В. та ін. Адаптивний кореляційний аналіз локально-стаціонарних випадкових процесів // Космічна наука та технологія. 1998. Т.4. № 4. С.30–35. 3. Pogribny Wlodzimierz, Rozhankivsky Igor, Gren Yaroslav Adaptive Measurement of Non-stationary Vibration //  $2^{nd}$  International Conference on Measurement, Smolenice. Slovak Republic, 26-29 April 1999. P.331–334.

162