

УДК 621.372

Ю.В. Сопілка

Національний технічний університет України "КПІ", Київ, Україна

**ЗАСТОСУВАННЯ БІСПЕКТРАЛЬНОГО АНАЛІЗУ ВІБРОАКУСТИЧНИХ СИГНАЛІВ
ДЛЯ ДІАГНОСТУВАННЯ ТРІЩИН У ЛОПАТКАХ АВІАЦІЙНИХ ДВИГУНІВ**

Background. The work is devoted to vibroacoustical diagnosis of the crack-like damages of the gas-turbine engines (GTE) blades at the steady-state modes of GTE.

Objective. The effectiveness of the usage bispectrum analysis is investigated for signal processing at the vibroacoustical diagnostic of the blades cracks of aviation gas-turbine engines.

Methods. Bispectral analysis is used for diagnostic information processing. Bispectrum can be found using Fourier transform third-order autocorrelation functions:

$$S_{3x}(f_1, f_2) = \sum_{k, l=-\infty}^{\infty} C_{3x}(k, l) \exp(-j2\pi f_1 k) \exp(-j2\pi f_2 l).$$

Results. Simulation bispectrum analysis vibroacoustical signals, radiated by models blades of working wheels without crack and with crack at the stationary vibrating excitations are carried out and investigated. It demonstrates that appearance and evolution of the fatigue crack in a blade increases intensity of bispectral modules.

Conclusions. Application of a modern signal processing methods allows to detect fault features, which are sensitive to small crack-like damages. The receive results can be used to create a vibroacoustical monitoring system for aircraft engine rotor components.

Keywords: signal processing; vibroacoustical diagnosis; gas-turbine engine; crack-like damage.

Вступ

Як показує практика, значна частина відмов авіаційних двигунів зумовлена експлуатаційними пошкодженнями лопаток робочих коліс компресорів і турбін, що впливають на безпеку польотів та визначають необхідність розвитку і впровадження в експлуатацію методів і засобів їх діагностування. Попадання сторонніх предметів у повітряний тракт двигуна під час його роботи викликає локальні забоїни та вм'ятини, деформацію і обриви лопаток з подальшими вторинними руйнуваннями елементів усього тракту двигуна. Попадання пилу та піску спричиняє інтенсивний ерозійний знос поверхні лопаток. У результаті підвищених вібраційних навантажень та зменшення міцності матеріалу в робочих лопатках виникають втомні тріщини. Під час помпажу відбувається підвищена вібрація лопаток, вони зазнають змінних навантажень і за наявності на них ризик, забоїн, подряпин, а також унаслідок значного абразивного зносу можуть руйнуватися. Внаслідок тривалого впливу на робочі лопатки турбін відцентрових сил в умовах високої температури відбувається їх "витяжка". Через порушення процесу згорання палива в камері згорання, значне збільшення температури газу і нерівномірності температурного поля перед турбіною відбувається обгорання соплових і робочих ло-

паток турбіни. Термічні напруги можуть викликати утворення мікротріщин.

Розглянуті експлуатаційні пошкодження лопаток компресорів і турбін можуть бути віднесені до тріщиноподібних, причому забоїни, корозія, ерозія є концентраторами механічних напружень, що стимулюють зародження і розвиток таких пошкоджень. Тому для підвищення надійності, збільшення ресурсу та попередження відмов або раптових руйнувань у процесі експлуатації газотурбінні двигуни (ГТД) потребують створення системи неперервного контролю (моніторингу) технічного стану (ТС) лопаток робочих коліс з метою виявлення таких пошкоджень і дефектів на стадії їх зародження та початкового розвитку. Процес віброакустичного моніторингу ТС лопаток ГТД повинен містити в собі такі основні процедури, як неперервне отримання інформації про стан об'єкта діагностики (ОД), обробка діагностичної інформації та прийняття рішення про ТС [1].

Найважливішим та найвідповідальнішим етапом процесу моніторингу є обробка діагностичної інформації з метою визначення ефективних діагностичних ознак дефекту. Вибір методів і алгоритмів обробки інформації в системах віброакустичної діагностики початкових тріщиноподібних пошкоджень у лопатках ГТД нерозривно пов'язується зі структурою вимірюваного акустичного сигналу [2], тому під час розробки

системи важливе значення має модель формування такого сигналу. В роботі [3] запропоновано динамічну модель газотурбінного двигуна як об'єкта віброакустичної діагностики втомних тріщин у лопатках його робочих коліс та проаналізовано процес формування вимірюваних віброакустичних сигналів. Двигун являє собою динамічну систему, елементи якої під час експлуатації зазнають вібраційних збурень як механічного, так і аеродинамічного походження. Складна фізична природа сукупності вібраційних і акустичних збурень елементів робочих коліс ГТД зумовлює складність вимірюваного сигналу. Як джерело діагностичної інформації про початкові тріщиноподібні пошкодження в лопатках робочих коліс використовується вібраційний і акустичний шум у діапазоні 0–10 кГц. Поява та початковий розвиток тріщини в лопатці зумовлює виникнення у вимірюваному віброакустичному сигналі складових, що характеризуються малою коливальною енергією та практично не виділяються традиційними методами спектрального аналізу. Тому необхідно застосовувати інші, більш чутливі методи дослідження [4]. Наприклад, треба використовувати нові перспективні методи частотно-часового аналізу, які дають змогу отримати інформацію не тільки про наявність у сигналі тих чи інших частотних складових, а й про те, як ці частотні складові змінюються в часі. Для віддзеркалення наявності нелінійності в сигналі пропонується використовувати сучасні потужні методи поліспектрального аналізу.

Постановка задачі

Метою роботи є дослідження ефективності застосування біспектрального методу для обробки діагностичної інформації в задачах віброакустичної діагностики тріщин у лопатках авіаційних газотурбінних двигунів на стаціонарному режимі експлуатації.

Поліспектральний аналіз віброакустичних сигналів

Спектральна щільність стаціонарного процесу $x(n)$ формально визначається з використанням перетворення Фур'є автокореляційної послідовності (АКП) або автокореляційної функції (АКФ) процесу [5]. Природним узагальненням АКФ є моменти вищих порядків чи специфічні нелінійні комбінації цих моментів – кумулянти.

Кумулянт першого порядку стаціонарного процесу є його середнє значення (СЗ), кумулянти вищих порядків є інваріантними до зміни СЗ.

Кумулянт 2-го порядку є АКФ процесу:

$$C_{2x}(k) = E\{x^*(n)x(n+k)\}.$$

Кумулянт 3-го порядку або потрійна АКФ:

$$C_{3x}(k,l) = E\{x^*(n)x(n+k)x(n+l)\}.$$

Кумулянт 4-го порядку або АКФ 4-го порядку:

$$C_{4x}(k,l,m) = E\{x^*(n)x(n+k)x(n+l)x^*(n+m)\} - C_{2x}(k)C_{2x}(l-m) - C_{2x}(l)C_{2x}(k-m) - M_{2x}^*(m)M_{2x}(k-l),$$

де $E\{\bullet\}$ означає усереднення за ансамблем; $*$ – знак спряження, а $M_{2x}(m) = E\{x(n)x(n+m)\} = C_{2x}(m)$ – для дійсних процесів.

Кумулянти без зсуву $C_{3x}(0,0) = \gamma_{3x}$, $C_{4x}(0,0,0) = \gamma_{4x}$, відомі як

$$\text{коефіцієнт асиметрії: } \gamma_{3x}/\sigma_{2x}^3,$$

$$\text{коефіцієнт ексцесу: } \gamma_{4x}/\sigma_{2x}^4,$$

характеризують відхилення процесу, що аналізується, відповідно від симетричного та нормального розподілу.

Спектральні характеристики вищих порядків визначаються з використанням перетворення Фур'є послідовностей відповідних кумулянтів:

перетворення Фур'є АКФ – спектральна щільність:

$$S_{2x}(f) = \sum_{k=-\infty}^{\infty} C_{2x}(k) \exp(-j2\pi fk);$$

перетворення Фур'є потрійної АКФ – це біспектр (спектр 3-го порядку):

$$S_{3x}(f_1, f_2) =$$

$$= \sum_{k,l=-\infty}^{\infty} C_{3x}(k,l) \exp(-j2\pi f_1 k) \exp(-j2\pi f_2 l); \quad (1)$$

перетворення Фур'є АКФ 4-го порядку – це триспектр:

$$S_{4x}(f_1, f_2, f_3) = \sum_{k,l,m=-\infty}^{\infty} C_{4x}(k,l,m) \exp(-j2\pi f_1 k) \times \exp(-j2\pi f_2 l) \exp(-j2\pi f_3 m).$$

Причому спектральна щільність є дійсною невід’ємною величиною, тоді як біспектр і три-спектр – комплексні величини.

Спектральні характеристики вищих порядків найбільш доцільно використовувати для обробки складних нелінійних процесів, які є адитивною сумішшю негауссових сигналів із гауссовим шумом [6], що є характерним для віброакустичних процесів, які протікають в авіаційному двигуні при його експлуатації.

Модельовання вібраційних сигналів

За схемою на рис. 1 проведено модельовання та обробку сигналів, що випромінюється моделлю робочого колеса з бездефектними лопатками і за наявності тріщини в одній з лопаток. Розглядається режим стаціонарного вібраційного збурення лопаток робочих коліс.

Для формування стаціонарного вібраційного збурення моделей лопаток було використано модель полігармонічного процесу, яким описується роторна вібрація на стаціонарних режимах експлуатації двигуна:

$$P(nT) = \sum_{i=1/m}^k P_i \sin(i\omega_p nT - \varphi_{i0}), \quad (2)$$

де ω_p – частота обертання ротора двигуна; P_i , φ_{i0} – відповідно амплітуда та початкова фаза i -ї гармоніки; k і m – цілі додатні числа.

Як модель лопатки без тріщини розглядається модель лінійної коливальної системи з одним ступенем вільності, імпульсна характеристика якої має вигляд [2]

$$g_*(nT) = \frac{1}{\omega_*} \sin \omega_* nT, \quad (3)$$

де ω_* – власна частота коливань моделі ОД без тріщини.

Модель ОД з тріщиною, що зумовлена порушенням суцільності матеріалу, являє собою модель коливальної системи з одним ступенем вільності з кусково-лінійною характеристикою відновлювальної сили. Як узагальнений параметр тріщини покладається відносне змінювання жорсткості ϑ ОД на півциклах деформування. Імпульсна характеристика моделі має подання у вигляді розкладання в ряд Фур’є за гармоніками основної частоти коливань моделі ОД з тріщиною ω_0 [2]:

$$g(nT) = \frac{a_0}{2} + \sum_{k=1}^K a_k \cos k\omega_0 nT, \quad (4)$$

де a_0, a_k та ω_0 є функціями відносного змінювання жорсткості ϑ [7].

Сигнали $s_1(nT) \dots s_{21}(nT)$ (див. рис. 1) отримано згорткою вхідного сигналу (2) з імпульсною характеристикою (3), яка для кожного дискретного відліку обчислюється за виразом

$$s_j = T \sum_{\mu=1}^j g_{j-\mu+1} P_\mu,$$

де T – період дискретизації; j – номер дискретного відліку.

Для моделі лопатки без пошкодження за виразом (3) використано значення власної частоти $\omega_* = 3768 \text{ с}^{-1}$, що відповідає $f_* = 600 \text{ Гц}$. Для моделі лопатки з пошкодженням враховано чотири гармоніки в розкладанні імпульсної характеристики (4), параметр тріщиноподібного пошкодження ϑ задавався дискретними значеннями в межах 0,01–0,09.

Формування вібраційного збурення для стаціонарного режиму за виразом (2) проведено для даних, які забезпечують резонансні вібраційні збудження моделей лопаток [6]: $\omega_p = 1570 \text{ с}^{-1}$, що відповідає значенню $f_p = 250 \text{ Гц}$; $m = 2$; $\varphi_{i0} = 0$.

Модельовання та обробка віброакустичних процесів проводились із періодом дискретизації

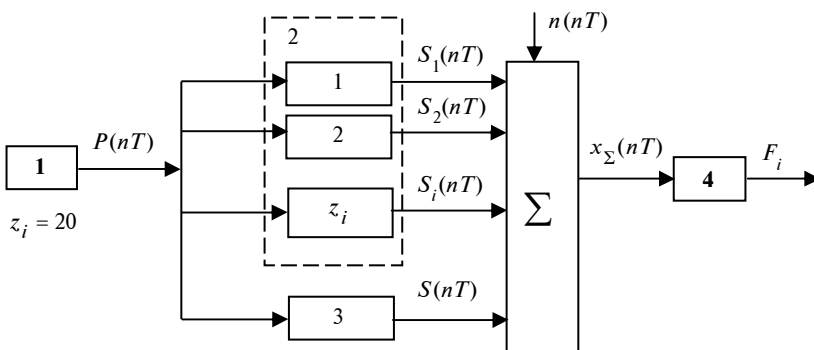


Рис. 1. Схема модельовання та обробки вібраційних сигналів: 1 – блок формування вібраційного збурення $P(nT)$; 2 – модель ОД без пошкодження, z_i – кількість лопаток; 3 – модель лопатки з тріщиноподібним пошкодженням; 4 – блок обробки інформації та відображення результату F_i за кожним методом

$T = 2 \cdot 10^{-4}$ с ($f_d = 5$ кГц), що забезпечило обсяг вибірки $N = 5000$ на часовому інтервалі 1 с.

Для аналізу ефективності діагностування за допомогою біспектрів було проаналізовано вплив різноманітних факторів, а саме: 1) наявності адитивної гауссової завади; 2) можливих розбіжностей у значеннях власних частот лопаток; 3) можливого виникнення субгармонічних коливань. Моделювання стаціонарної гауссової завади $n(nT)$ проведено за допомогою генераторів випадкових чисел з відповідними коефіцієнтами для забезпечення величини відношення сигнал/шум $\rho = 10^2$. При моделюванні

враховані можливі розбіжності в значеннях ω_* окремих лопаток у межах 1–3 %. Можливі субгармонічні коливання моделювалися з частотою $f_p = 125$ Гц. Оскільки найбільшу інтенсивність у (4) має перша роторна гармоніка, то для моделювання відношення $P_1/P_{0,5}$ вибрано рівним 10^2 .

Обробка сигналів і аналіз отриманих результатів

За виразом (1) проведено обробку вибірок з 512 точок змодельованих сигналів. Біспектр є

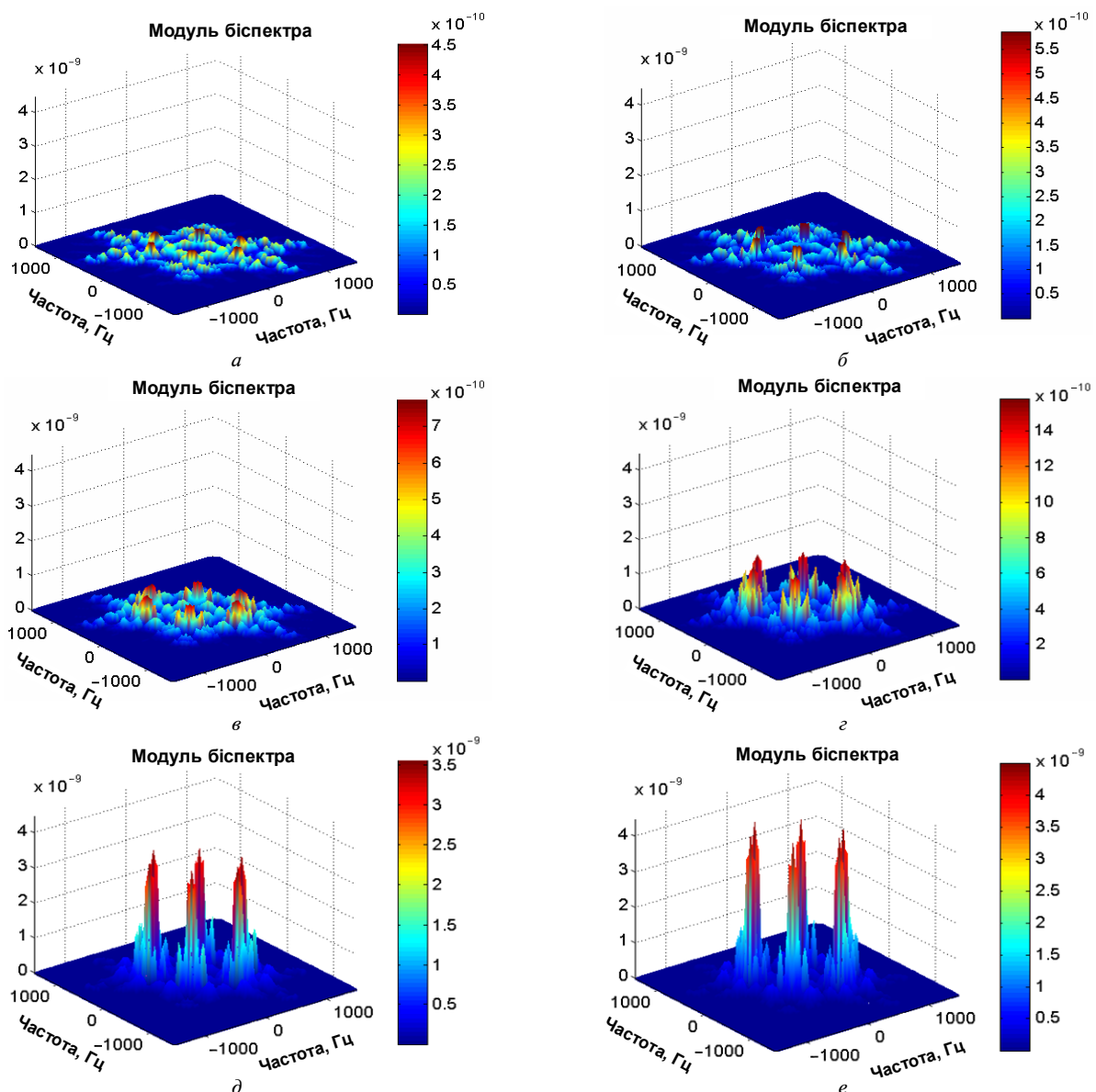


Рис. 2. Результати біспектральної обробки віброакустичного сигналу: $a - \vartheta = 0$; $b - \vartheta = 0,01$; $c - \vartheta = 0,03$; $d - \vartheta = 0,05$; $e - \vartheta = 0,07$; $e - \vartheta = 0,09$

тривимірною залежністю. Проведено порівняльний аналіз результатів біспектральної обробки для бездефектного робочого колеса і в разі зародження та початкового розвитку пошкодження однієї лопатки ($\vartheta = 0,01-0,09$).

Результати біспектрального аналізу для стаціонарного режиму показують (рис. 2), що поява і розвиток значень ϑ у діапазоні 0,01–0,09 тріщиноподібного пошкодження призводить до зростання амплітуди модуля біспектра з $4,5 \times 10^{-10}$ до $4,48 \times 10^{-9}$ (таблиця). Як бачимо, завдяки використанню біспектрів чутливість до зародження тріщини збільшилася на порядок.

Вплив стаціонарної гауссової завади (рис. 3) призводить до поступового зростання ампліту-

ди модуля біспектра з $1,01 \times 10^{-9}$ до $5,08 \times 10^{-9}$ (див. таблицю, фактор 1), тобто збільшується в 5 разів. Амплітуда модуля біспектра при можливих розбіжностях у значеннях власних частот лопаток (рис. 4) також збільшується майже в 5 разів з $1,33 \times 10^{-9}$ до $5,12 \times 10^{-9}$ (див. таблицю, фактор 2). При можливому виникненні субгармонічних коливань (рис. 5) амплітуда модуля біспектра поступово зростає з $4,46 \times 10^{-10}$ до $4,5 \times 10^{-9}$ (див. таблицю, фактор 3), тобто збільшилася на порядок. Отже, розглянуті фактори суттєво не впливають на чутливість біспектра до зародження та початкового розвитку пошкодження.

Таблиця. Залежності діагностичних ознак від параметра тріщини

Вплив	$\vartheta = 0$	$\vartheta = 0,01$	$\vartheta = 0,03$	$\vartheta = 0,05$	$\vartheta = 0,07$	$\vartheta = 0,09$
Відсутній	$4,51 \times 10^{-10}$	$5,83 \times 10^{-10}$	$7,71 \times 10^{-10}$	$1,57 \times 10^{-9}$	$3,54 \times 10^{-9}$	$4,48 \times 10^{-9}$
Фактор 1	$1,01 \times 10^{-9}$	$1,09 \times 10^{-9}$	$1,65 \times 10^{-9}$	$1,83 \times 10^{-9}$	$3,23 \times 10^{-9}$	$5,08 \times 10^{-9}$
Фактор 2	$1,33 \times 10^{-9}$	$1,34 \times 10^{-9}$	$1,69 \times 10^{-9}$	$2,79 \times 10^{-9}$	$3,99 \times 10^{-9}$	$5,12 \times 10^{-9}$
Фактор 3	$4,45 \times 10^{-10}$	$5,79 \times 10^{-10}$	$7,65 \times 10^{-10}$	$1,59 \times 10^{-9}$	$3,56 \times 10^{-9}$	$4,49 \times 10^{-9}$

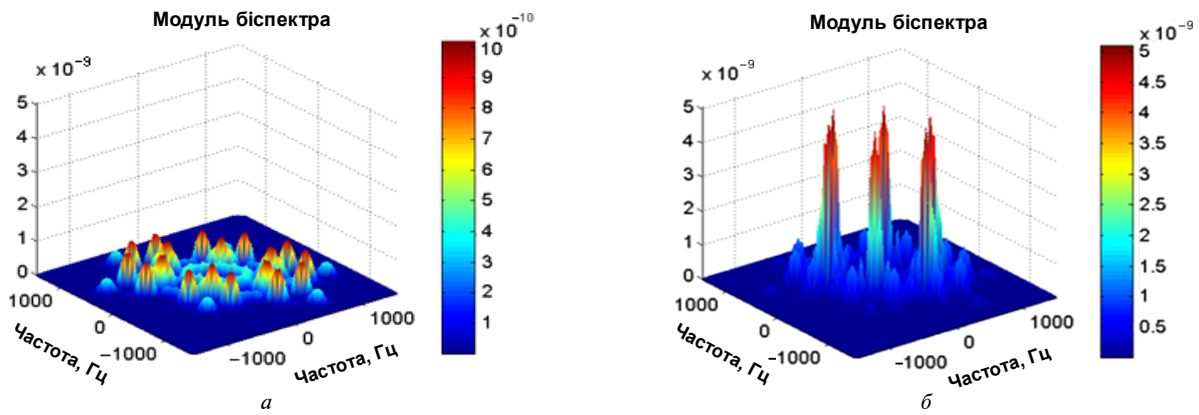


Рис. 3. Вплив гауссової завади на результати оцінювання модуля біспектра: а – $\vartheta = 0$; б – $\vartheta = 0,09$

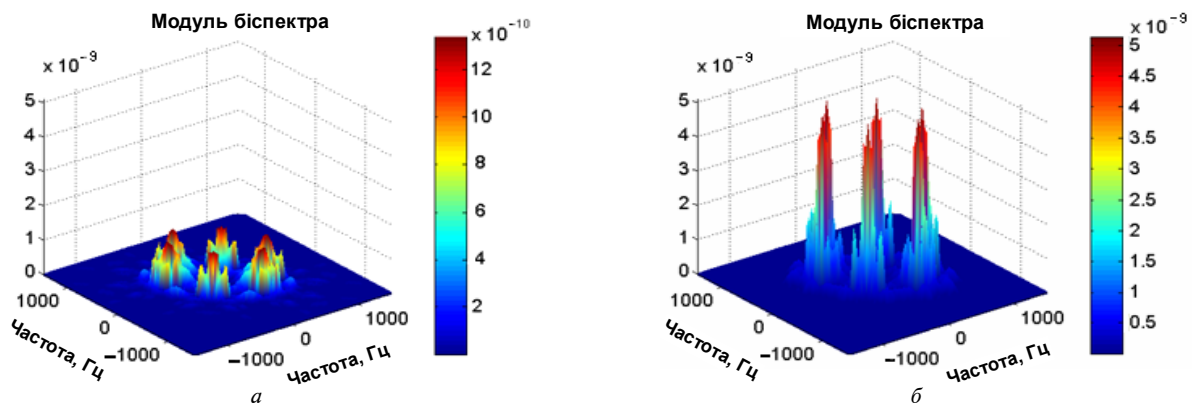


Рис. 4. Результати оцінювання модуля біспектра з урахуванням можливих розбіжностей у значеннях власних частот окремих лопаток у межах 1–3 %: а – $\vartheta = 0$; б – $\vartheta = 0,09$

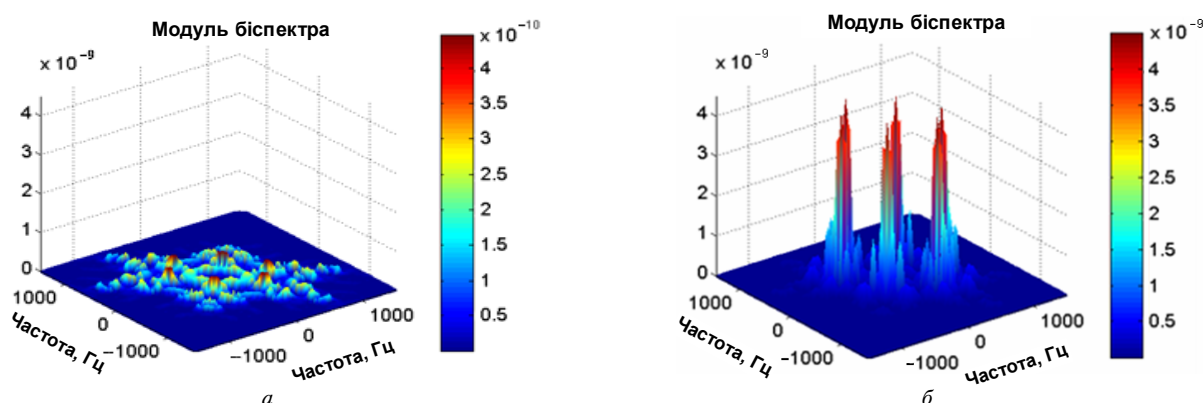


Рис. 5. Результати оцінювання модуля біспектра з урахуванням можливого виникнення субгармонічних коливань: *a* – $\theta = 0$; *б* – $\theta = 0,09$

Висновки

У результаті моделювання і біспектрального аналізу віброакустичних сигналів встановлено, що значення амплітуди отриманих біспектрів, використаних як діагностична ознака, зростає при появі та розвитку пошкодження.

Аналіз ефективності діагностування за допомогою біспектрів за наявності адитивної гауссової завади, можливих розбіжностей у значеннях власних частот лопаток або можливого виникнення субгармонічних коливань показав,

що розглянуті фактори не впливають на чутливість біспектра до зародження та початкового розвитку пошкодження.

Отримані результати є новими, вони показують можливість і ефективність використання біспектрів для діагностики малої втомної тріщини в задачах віброакустичної діагностики лопаток робочих коліс на стаціонарних режимах експлуатації та доцільність їх використання при розробці системи віброакустичного моніторингу роторних елементів авіаційних газотурбінних двигунів.

Список літератури

1. Егоров И.В., Карасев В.А., Скибин В.А. Информационные технологии в диагностике технического состояния ГТД / Под ред. И.В. Егорова. – М.: ТОРУС ПРЕСС, 2011. – 368 с.
2. Бурау Н.И. О новых направлениях в развитии виброакустических методов диагностики прочностных дефектов в лопатках газотурбинных двигателей // Вибрации в технике и технологиях. – 2001. – № 4(20). – С. 45–48.
3. Бурау Н.И. Динамическая модель газотурбинного двигателя как объекта виброакустической диагностики усталостных трещин в лопатках рабочих колес // Вибрации в технике и технологиях. – 2001. – № 1(17). – С. 28–32.
4. Bouraou N., Sopilka Iu. Vibroacoustical diagnosis of the crack-like damages of aircraft engine blades at the steady-state and non-steady-state modes // Vibrations in Physical Systems. – 2010. – 24. – P. 69–74.
5. Бендат Дж., Пирсол А. Прикладной анализ случайных данных. – М.: Мир, 1989. – 540 с.
6. Методи цифрової обробки сигналів для віброакустичної діагностики авіаційних двигунів / Н.І. Бурау, Л.Л. Яцко, О.М. Павловський, Ю.В. Сопілка. – К.: НАУ, 2012. – 152 с.
7. Бурау Н.И. Нестационарные колебания нелинейных (кусочно-линейных) систем. – Кировоград: Полімед-Сервіс, 2009. – 104 с.

References

1. I.V. Egorov et al., *Information Technology in the Diagnosis of the Technical State of GTE*. Moscow, Russia: Torus Press, 2011, 368 p. (in Russian).
2. N.I. Bouraou, "About the new tendencies of the development of vibroacoustical diagnostics methods of rigidity faults of the gas-turbine engines blades", *Vibratsii v Tekhnike i Tekhnologiyakh*, no. 4(20), pp. 45–48, 2001 (in Russian).
3. N.I. Bouraou, "The aircraft gas-turbine engine dynamic model is proposed for the usage at the vibroacoustical diagnosis of the blades fatigue cracks", *Vibratsii v Tekhnike i Tekhnologiyakh*, no. 1(17), pp. 28–32, 2001 (in Russian).
4. N. Bouraou and Iu. Sopilka, "Vibroacoustical diagnosis of the crack-like damages of aircraft engine blades at the steady-state and non-steady-state modes", *Vibrations in Physical Systems*, vol. 24, pp. 69–74, 2010.
5. J. Bendat and A. Piersol, *Applied Analysis of Random Data*. Moscow, USSR: Mir, 1983, 540 p. (in Russian).

6. N.I. Bouraou *et al.*, *Methods of Digital Signal Processing for Vibroacoustic Diagnostics of Aircraft Engines*. Kyiv, Ukraine: NAU, 2012, 152 p. (in Ukrainian).
7. N.I. Bouraou, *Non-Stationary Oscillations of Nonlinear (Piecewise Linear) Systems*. Kirovograd, Ukraine: Polimed-Servis, 2009, 104 p. (in Ukrainian).

Ю.В. Сопілка

ЗАСТОСУВАННЯ БІСПЕКРАЛЬНОГО АНАЛІЗУ ВІБРОАКУСТИЧНИХ СИГНАЛІВ ДЛЯ ДІАГНОСТУВАННЯ ТРІЩИН У ЛОПАТКАХ АВІАЦІЙНИХ ДВИГУНІВ

Проблематика. Робота присвячена віброакустичній діагностиці тріщиноподібних пошкоджень лопаток газотурбінних двигунів на стаціонарному режимі.

Мета дослідження. Досліджується ефективність застосування біспектрального аналізу для обробки віброакустичних сигналів у задачах діагностики тріщин у лопатках авіаційних газотурбінних двигунів.

Методика реалізації. Для обробки діагностичної інформації використовується біспектральний аналіз. Біспектр визначається з використанням перетворення Фур'є потрійної автокореляційної функції:

$$S_{3x}(f_1, f_2) = \sum_{k, l=-\infty}^{\infty} C_{3x}(k, l) \exp(-j2\pi f_1 k) \exp(-j2\pi f_2 l).$$

Результати дослідження. Проведено моделювання і біспектральний аналіз віброакустичних сигналів, що є реакціями на виході моделей лопаток робочих коліс без пошкодження і з тріщиноподібним пошкодженням на стаціонарному режимі. Встановлено, що зародження та початковий розвиток пошкодження призводить до зростання амплітуди біспектра.

Висновки. Застосування сучасних методів обробки сигналів дало змогу виявляти діагностичні ознаки, які чутливі до малих тріщиноподібних пошкоджень. Отримані результати доцільно використовувати для створення віброакустичної системи моніторингу елементів робочих коліс авіаційних двигунів.

Ключові слова: цифрова обробка сигналів; віброакустична діагностика; газотурбінний двигун; тріщиноподібне пошкодження.

Ю.В. Сопілка

ПРИМЕНЕНИЕ БИСПЕКТРАЛЬНОГО АНАЛИЗА ВИБРОАКУСТИЧЕСКИХ СИГНАЛОВ ДЛЯ ДИАГНОСТИКИ ТРЕЩИН В ЛОПАТКАХ АВИАЦИОННЫХ ДВИГАТЕЛЕЙ

Проблематика. Работа посвящена виброакустической диагностике трещиноподобных поврежденных лопаток газотурбинных двигателей на стационарном режиме.

Цель исследования. Исследуется эффективность применения биспектрального анализа для обработки виброакустических сигналов в задачах диагностики трещин в лопатках авиационных газотурбинных двигателей.

Методика реализации. Для обработки диагностической информации используется биспектральный анализ. Биспектр определяется путем преобразования Фурье тройной автокорреляционной функции:

$$S_{3x}(f_1, f_2) = \sum_{k, l=-\infty}^{\infty} C_{3x}(k, l) \exp(-j2\pi f_1 k) \exp(-j2\pi f_2 l).$$

Результаты исследования. Проведены моделирование и биспектральный анализ виброакустических сигналов, являющихся реакциями на выходе моделей лопаток рабочих колес без повреждения и с трещиноподобным повреждением на стационарном режиме. Установлено, что зароджение и начальное развитие повреждения приводит к росту амплитуды биспектра.

Выводы. Применение современных методов обработки сигналов позволило выявить диагностические признаки, которые чувствительны к малым трещиноподобным повреждениям. Полученные результаты целесообразно использовать для создания виброакустической системы мониторинга элементов рабочих колес авиационных двигателей.

Ключевые слова: цифровая обработка сигналов; виброакустическая диагностика; газотурбинный двигатель; трещиноподобное повреждение.

Рекомендована Радою
приладобудівного факультету
НТУУ "КПІ"

Надійшла до редакції
2 липня 2015 року