

<p>ля <i>В работе предлагается решение проблемы устранения субъективности неразрушающего контроля путем автоматической регистрации положения измерительного преобразователя дефектоскопа в процессе контроля с регистрацией места нахождения автоматически выявленных дефектов.</i></p>	<p>subjectivity of non-destructive testing elimination by automatic registration of flaw detector measuring converter position during testing with automatic registration of defects position.</p>
---	--

*Надійшла до редакції
16 травня 2003 року*

УДК 621.833+621.391

ПОТЕНЦІЙНА ТОЧНІСТЬ ОЦІНЮВАННЯ ВТОМНИХ ТРІЩИН ЗА МЕТОДОМ ВИЩИХ ГАРМОНІК

Тяпченко О.М., Національний технічний університет України "Київський політехнічний інститут", м.Київ, Україна

Досліджується потенційна точність оцінювання втомних тріщин в процесі віброакустичної діагностики конструкцій за методом вільних коливань. Проведено порівняльний аналіз якості отриманих оцінок в залежності від шуму вимірювання та параметра, що оцінюється

Вступ

Сучасний прогрес розвитку промисловості пов'язаний з побудовою та експлуатацією надійних та високоефективних машин та механізмів. Подальше зростання їх ресурсу та підвищення надійності викликає потребу вдосконалення існуючих і розробки нових методів та засобів діагностики. І хоча сучасний рівень їх є досить високим, актуальною лишається проблема діагностики дефектів в елементах конструкцій машин і механізмів на етапі їх зародження та початковій стадії розвитку. Відомо, що руйнуванню всієї конструкції передуює поява і розвиток втомного пошкодження елемента конструкції. Виявлення та моніторинг такого пошкодження на ранній стадії розвитку набуває особливого значення і зумовлює необхідність пошуку таких діагностичних ознак, які були б чутливими до незначних відхилень технічного стану об'єкта діагностики (ОД) від норми. В даному напрямку великі можливості мають методи віброакустичної діагностики (ВАД), що ґрунтуються на збудженні в ОД вільно згасаючих або резонансних коливань та в подальшій обробці випромінюваних об'єктом акустичних коливань.

Наявність та розвиток втомної тріщини призводить до зміни параметрів вільних коливань ОД, а саме збагачується спектральна щільність вільних коливань складовими на вищих гармоніках [1]. Така зміна спектральної щільності дала змогу визначити вектор діагностичних ознак (ВДО) [2-4], складові якого є відношенням спектральних щільностей потужностей основної до вищих гармонік. Даний вибір діагностичних ознак інтенсифікує подальший розвиток методу вільних коливань і дає змогу використовувати його для неруйнівного оцінювання

та визначення стану малих втомних тріщин в ОД, які описуються моделлю коливальної системи з кусково-лінійною характеристикою відновлювальної сили, в тому числі в лопатках робочих коліс газотурбінних двигунів (ГТД) [2-4].

Постановка задачі досліджень

У вказаних вище роботах наведено результати теоретичних досліджень стосовно неруйнівного оцінювання малих втомних тріщин в лопатках ГТД за змінюванням спектральної щільності вільних коливань. Дані дослідження показали можливість оцінювання та моніторингу малих значень (до 10%) відносного змінювання жорсткості ОД на півциклах деформування „дыхаючої тріщини”, що розглядалось як узагальнений параметр тріщини. Проведені дослідження дали змогу аналітично визначити оцінки відносного змінювання жорсткості, проаналізувати їх статистичні характеристики та провести оптимізацію діагностичних ознак, що являють собою відношення спектральної щільності потужності (СЩП) на основній гармоніці до СЩП на вищих парних гармоніках. Для оцінювання параметра тріщини за вказаними діагностичними ознаками використовується метод максимальної правдоподібності, який потребує мінімального набору апріорних даних порівняно з іншими методами оцінювання. Для підтвердження працездатності та ефективності розроблених алгоритмів оцінювання було проведено імітаційне моделювання процесу діагностики та оцінювання малої втомної тріщини в лопатці ГТД за методом вільних коливань [5].

Кінцевим етапом вирішення задачі оцінювання втомних тріщин за методом вищих гармонік є визначення потенційної точності розроблених алгоритмів оцінювання, яка для задачі ВАД малих втомних тріщин за методом вільних коливань на сьогодні ще не проведена і потребує вирішення.

Для цього використовуємо найбільш загальноприйнятий критерій для виявлення якості оцінок та визначення потенційної точності самої процедури (алгоритму) знаходження оцінок. Цей критерій називають нерівністю Рао-Крамера [6], яка визначає нижню границю середньоквадратичних похибок оцінок (згідно вибраного методу оцінювання) при використанні будь-яких оцінок параметрів.

Оцінювання параметра тріщини проводиться за методом максимальної правдоподібності, який базується на вирішенні рівняння максимальної правдоподібності з метою отримання максимально правдоподібної оцінки параметра тріщини [2-5]. Отримана оцінка, як відомо з [6], є незміщеною та ефективною. Тому, в загальному вигляді нерівність Рао-Крамера записується як:

$$D_{\min} \{ \hat{\theta}_n \} \geq \frac{1}{n \left[\left[\frac{\partial}{\partial \theta} \sum_{k=1}^n \ln L_k(\theta) \right]^2 \right]}, \quad (1)$$

де n – кількість вимірювань;

$\hat{\theta}$ – оцінка параметра θ за вибраною ознакою;

$D_{\min} \{ \hat{\theta}_n \}$ – нижня границя дисперсії оцінок;

$\sum_{k=1}^n \ln L_k(\vartheta)$ – логарифмічна функція правдоподібності;

$I_n = \frac{1}{n} \left\{ \left[\frac{\partial}{\partial \vartheta} \sum_{k=1}^n \ln L_k(\vartheta) \right]^2 \right\}$ – інформація за Фішером відповідно до вказаних

вище визначень.

В пропонуемій роботі розглядається основна метода оцінювання ефективності розроблених алгоритмів оцінювання та проводиться визначення їх потенційної точності за виразом (1).

Чисельне моделювання та аналіз отриманих результатів

Для вирішення поставленої задачі визначення потенційної точності розроблених в [4] алгоритмів використаємо результати імітаційного моделювання процесу ВАД та оцінювання малих втомних тріщин. В роботі [5] наведена схема імітаційного моделювання процесу ВАД, за якою було отримані реалізації вільних коливань моделі лопатки ГТД, які в адитивній суміші із стаціонарною гаусівською завадою надходили в блок спектральної обробки для аналізу. При моделюванні використано модель ОД у вигляді коливальної системи з одним ступенем вільності з кусково-лінійною характеристикою відновлювальної сили. Як узагальнений параметр тріщини оцінювалось відносне змінювання жорсткості ОД ϑ на півциклах деформування. Розглянуто інтервал змінювання параметру тріщини ϑ в діапазоні $\vartheta = 0,03 - 0,07$. Завади вибирались таким чином, щоб забезпечити широкий інтервал відношення сигнал/шум, а саме $\rho = 100 \dots 1500$. Для кожного значення ρ використано по одній вибірці даних.

Нерівність Рао-Крамера для даної задачі має вигляд (1). Інформація за Фішером в (1) згідно її визначення потребує знання рівняння правдоподібності:

$$\frac{\partial}{\partial \vartheta} \sum_{k=1}^n \ln L_k(\vartheta) = 0,$$

де ϑ – параметр тріщини, який оцінюється.

У відповідності з роботою [4] та тим, що оцінювання параметру ϑ проводилося за одним вимірюванням вибірки даних, рівняння правдоподібності має вигляд:

$$\sum_{h=0}^7 R_h \vartheta^h = 0 \quad (2)$$

де R_h – коефіцієнти рівняння правдоподібності.

Тоді інформація за Фішером у нашому випадку визначається як:

$$I_n = \left[\sum_{h=0}^7 R_h \vartheta^h \right]^2.$$

Для оцінювання використаємо наступні вектори діагностичних ознак:

$$\vec{Y}_1 = \left\{ \frac{S_{n1}}{S_{n2}}; \frac{S_{n1}}{S_{n4}} \right\}; \quad \vec{Y}_2 = \left\{ \frac{S_{n1}}{S_{n2}}; \frac{S_{n1}}{S_{n4}}; \frac{S_{n1}}{S_{n6}} \right\},$$

складові яких є відношенням СЩП основної гармоніки до СЩП вищих парних гармонік. Для вказаних векторів за вирішенням рівняння (2) визначалась оцінка параметра тріщини $\hat{\vartheta}$ для кожної складової ВДО, математичне сподівання $m_{\hat{\vartheta}}$ за вектором та дисперсія $D_{\hat{\vartheta}}$. Також за поданими ВДО та нерівністю Рао-Крамера (1) розраховувалось мінімальне значення дисперсії $(D_{\hat{\vartheta}})_{\min}$, яке визначає потенційну точність отриманих оцінок. Якісну характеристику отриманих оцінок та їх потенційну точність визначимо за статистичним показником якості оцінки [4]:

$$Q = 20 \lg \frac{D_{\hat{\vartheta}}}{(m_{\hat{\vartheta}})^2};$$

На рис.1 та рис.2 наведено графіки залежності показника Q оцінки та її потенційної точності Q_{\min} від відношення сигнал/шум ρ вимірювань для двох векторів ознак \vec{Y}_1, \vec{Y}_2 та різних значеннях параметра ϑ .

Як видно з наведених результатів, потенційна точність алгоритмів оцінювання є досить високою, Q_{\min} не перевищує значення -100 дБ у широкому діапазоні значень відношення сигнал/шум за різних значеннях параметра тріщини, та зростає із збільшенням відношення сигнал/шум. Оцінки параметра тріщини за ВДО \vec{Y}_2 є точнішими ніж за \vec{Y}_1 , якість оцінок збільшується із зростанням відношення сигнал/шум та розміру параметра тріщини ϑ . В той же час склад ВДО та розмір параметра тріщини, який оцінюється, не суттєво впливають на потенційну точність. Показник якості Q , в залежності від змінюваних параметрів, веде себе майже так, як і потенційна точність з різницею $-40... -120$ дБ. Хоча ця різниця дуже велика, якість оцінок за Q є достатньо високою ($Q \ll 0$) в широкому діапазоні відношення сигнал/шум. Слід також зауважити, що розглядувана різниця зменшується із збільшенням параметра тріщини. В цілому розглядувані на рис.1 та рис.2 залежності характеризують високу потенційну точність розроблених в [4] алгоритмів оцінювання та достатню ефективність отриманих за ними оцінок.

Висновки

В роботі отримані аналітичні вирази визначення потенційної точності алгоритмів оцінювання параметру тріщини в елементах конструкцій за методом вищих гармонік.

На основі моделювання процесу віброакустичної діагностики лопатки ГТД були отримані оцінки параметру пошкодження(тріщини), що зароджується

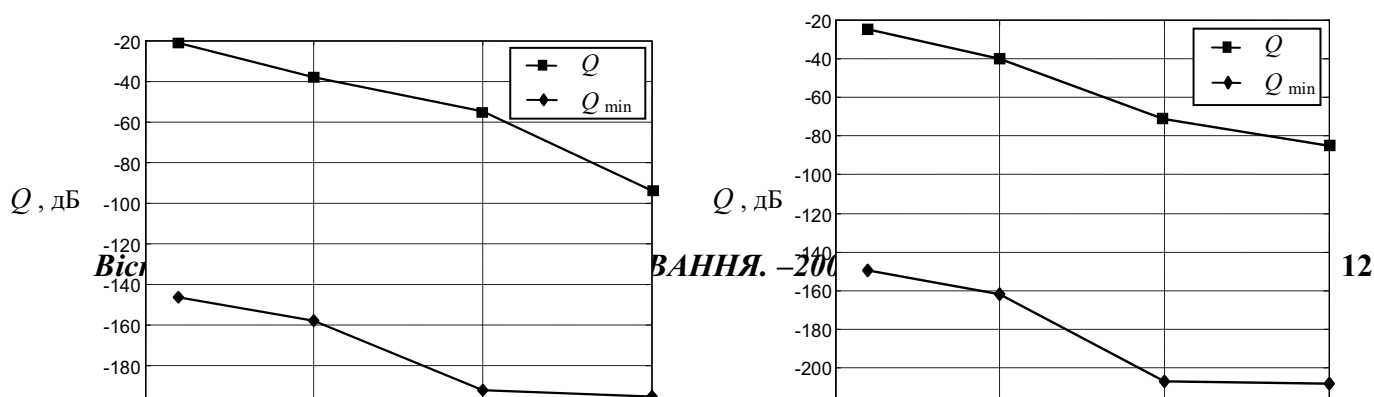


Рисунок 1 - Графік залежності показника якості оцінки Q та її потенційної точності Q_{\min} від відношення сигнал/шум ρ для $\mathcal{S} = 0,03$: а) за \vec{Y}_1 ; за б) \vec{Y}_2

Рисунок 2 - Графік залежності показника якості оцінки Q та її потенційної точності Q_{\min} від відношення сигнал/шум ρ для $\mathcal{S} = 0,07$: а) за \vec{Y}_1 ; за б) \vec{Y}_2

в лопатці, та визначена потенційна точність отриманих оцінок для різних значень параметру тріщини та відношення сигнал/шум.

Отримані результати дозволили проаналізувати ефективність процедури оцінювання та підтвердити високу потенційну точність розроблених алгоритмів оцінювання малих значень тріщин при дії достатньо високого рівня шуму. Дані

результати можуть використовуватись для визначення якості діагностики та оцінювання втомних тріщин в елементах конструкцій.

Для остаточного прийняття рішення про працездатність та ефективність розроблених алгоритмів оцінювання малих втомних тріщин у подальшому необхідно провести експериментальні випробування методу та порівняльний аналіз потенційної точності отриманих оцінок для моделювання та експериментальних даних.

Література

1. *Матвеев В.В., Бовсуновский А.П.* К анализу эффективности метода спектральной вибродиагностики усталостного повреждения элементов конструкций. Сообщ. 2. Изгибные колебания. Аналитическое решение // Пробл. Прочности. – 1998. – № 6. – С. 9–22.
2. *Бурау Н.И., Тяпченко А.Н.* О статистических характеристиках оценок относительного размера трещины по методу высших гармоник // Дефектоскопия. – 2000. - №5. – С.89-95.
3. *Бурау Н.И., Тяпченко А.Н.* Виброакустическая диагностика и оценивание усталостных трещин по изменению фазы спектральной плотности свободных колебаний изделий // Високі технології в машинобудуванні: Збірник наукових праць ХДПУ. – Харків, 2000 – Вип 1(3). – С.32 – 37.
4. *Бурау Н.И., Тяпченко О.М.* Оцінювання втомних тріщин за зміною спектральної щільності потужності вільних коливань об'єкта // Наукові вісті НТУУ “КПІ”. – 2000. – №6. – С. 67 – 75.
5. *Бурау Н.И., Тяпченко О.М., Посуховський Д.В.* Імітаційне моделювання процесу діагностики та оцінювання втомних тріщин за методом вільних коливань // Авіаційно-космічна техніка і технологія.– Харків, 2001. – Вип. 26. – С. 151 – 153.
6. *Левин Б.З.* Теоретические основы статистической радиотехники. В трех книгах. Книга вторая. Изд. 2-е, перераб. и дополнен. – М.: Сов. Радио, 1975. – 392с.

Тяпченко А.Н. Потенциальная точность оценивания усталостных трещин по методу высших гармоник
Исследуется потенциальная точность оценивания усталостных трещин в процессе виброакустической диагностики конструкций по методу свободных колебаний. Проведен сравнительный анализ качества полученных оценок в зависимости от шума измерения и оцениваемого параметра.

Tyapchenko O.M. Potential accuracy evaluation fatigue cracks by using the method of higher harmonics
Potential accuracy evaluation of fatigue cracks in process vibroacustical diagnosis of designs by using the method of free oscillations is investigated. The comparative analysis of quality of the received estimations is carried out depending on noise of measurement and the estimated parameter.

*Надійшла до редакції
12 листопада 2002 року*