



ДИАГНОСТИКА УСТАЛОСТНЫХ ТРЕЩИН: ИСПОЛЬЗОВАНИЕ НОВЫХ ПРИЗНАКОВ, ОСНОВАННЫХ НА ПРЕОБРАЗОВАНИИ ФУРЬЕ

Л. М. ГЕЛЬМАН, Ю. Ф. ЗИНЬКОВСКИЙ, И. В. ПЕТРУНИН

Исследован новый обобщенный подход к формированию диагностических признаков, предложенный ранее для случаев использования преобразования Фурье. Для обнаружения усталостной трещины в работе рассмотрен диагностический метод вынужденных колебаний с узкополосным гауссовским возбуждением. Проведено сравнение эффективностей диагностики усталостной трещины при использовании новых диагностических признаков и традиционной спектральной плотности мощности. Показано, что новые признаки обеспечивают более высокую эффективность диагностики, чем спектральная плотность мощности сигналов.

A new generalized approach to formation of diagnostic parameters has been studied. This approach was earlier proposed for the cases, when Fourier transform is used. For finding the fatigue crack the paper considers the diagnostic method of forced vibrations with narrow-band Gaussian excitation. The effectiveness of fatigue cracks has been compared when using new diagnostic parameters and traditional spectral power density. It is shown that the new parameters provide a higher effectiveness of diagnostics, than the spectral power density.

В статье исследован новый обобщенный подход [1, 2], предложенный для случаев использования преобразования Фурье. Он применим для задач мониторинга, диагностики, обработки сигналов и распознавания образов [3–6] и в отличие от традиционных методов, базирующихся на спектральной плотности мощности или фазе преобразования Фурье, заключается в одновременном использовании новых диагностических признаков: действительной и мнимой составляющих преобразования Фурье сигналов. Для обнаружения усталостной трещины в данной работе рассматривается диагностический метод вынужденных колебаний с узкополосным гауссовским возбуждением с изменяющейся центральной частотой, предложенный в [7].

Целью работы является сравнение эффективностей диагностики усталостной трещины при использовании новых признаков [1, 2] и традиционного диагностического признака — спектральной плотности. Основа рассматриваемого диагностического метода вынужденных колебаний заключается в том, что уровень нелинейности диагностируемого объекта с трещиной растет с увеличением размера трещины. Диагностируемый объект рассматривается как нелинейный осциллятор с одной степенью свободы [8, 9]:

$$\begin{aligned} \ddot{X} + 2\xi_s \omega_s \dot{X} + \omega_s^2 X &= A(t) \cos(\omega_f t + \varphi), \quad x \geq 0, \\ \ddot{X} + 2\xi_c \omega_c \dot{X} + \omega_c^2 X &= A(t) \cos(\omega_f t + \varphi), \quad x < 0, \end{aligned} \quad (1)$$

где $X = x/m$, x — смещение; $\xi_s = \frac{c}{2\sqrt{k_s m}}$;

$$\xi_c = \frac{c}{2\sqrt{k_c m}}; \quad \omega_s = \sqrt{\frac{k_s}{m}}; \quad \omega_c = \sqrt{\frac{k_c}{m}}; \quad m, c \text{ — соответс-$$

твенно масса и коэффициент демпфирования; k_s, k_c — соответственно жесткость при растяжении (трещина открыта) и сжатии (трещина закрыта); $A(t)$ — рэлеевская огибающая нестационарного узкополосного гауссовского процесса; ω_f, φ — соответственно изменяющаяся частота возбуждения

и случайная начальная фаза нестационарного узкополосного гауссовского шума [10]. При сжатии трещина закрыта, и материал ведет себя аналогично однородному, при этом жесткость такая же, как и у материала без трещины: $k_c = k$. При растяжении трещина открыта, и материал неоднороден; следовательно, происходит уменьшение жесткости на величину $\Delta k = k_c - k_s$. Случайная начальная фаза равномерно распределена в интервале $[0; 2\pi]$.

Собственная частота объекта с трещиной определяется следующим выражением [8, 9]:

$$\omega_0 = 2 \frac{\omega_s \omega_c}{\omega_s + \omega_c} = \omega_n 2 \frac{\sqrt{1 - \Delta k/k}}{1 + \sqrt{1 - \Delta k/k}}, \quad (2)$$

где ω_n — собственная частота бездефектной детали, $\omega_n = \sqrt{k}/m$.

Следуя [1, 2], в качестве диагностических признаков используем одновременно действительную X_R и мнимую X_I составляющие кратковременного преобразования Фурье высшей гармоники вынужденных резонансных колебаний:

$$X_R = \int_0^{t_1} X(t) \cos(i\omega_0 t) dt, \quad X_I = \int_0^{t_1} X(t) \sin(i\omega_0 t) dt, \quad (3)$$

где t_1 — верхняя граница временного интервала, i — номер гармоники.

Аналогичным образом вводится диагностический признак на основе спектральной плотности мощности:

$$X_{\text{PSD}} = \left(\int_0^{t_1} X(t) \sin(i\omega_0 t) dt \right)^2 + \left(\int_0^{t_1} X(t) \cos(i\omega_0 t) dt \right)^2.$$

Рассмотрим двухклассовую диагностику относительного коэффициента жесткости $\Delta k/k = (\Delta k/k)_j$ для гипотез $H_j, j = 0, 1$. Оптимальными преобразованиями диагностических признаков согласно системе уравнений (3) и спектральной плотности мощности высшей гармоники резонансных

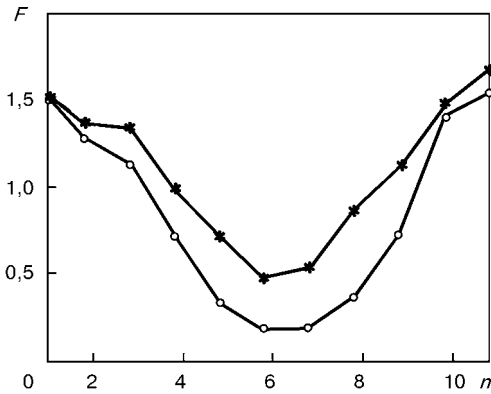


Рис. 1. Зависимости критерия Фишера F от номера эксперимента n для спектра мощности (O) и новых признаков (*)

колебаний являются следующие отношения правдоподобия:

$$L(X_R, X_I) = \frac{W(X_R, X_I | H_0)}{W(X_R, X_I | H_1)},$$

$$L(X_{PSD}) = \frac{W(X_{PSD} | H_0)}{W(X_{PSD} | H_1)},$$

где $W(X_R, X_I | H_j)$ — условная двумерная функция распределения вероятности диагностических признаков для гипотезы H_j ; $W(X_{PSD} | H_j)$ — условная одномерная функция распределения вероятностей спектральной плотности мощности для гипотезы H_j . Так как система уравнений (1) не решается аналитически, то для исследования обнаружения трещины было использовано численное моделирование. Используя эту систему уравнений, промоделировали резонансную реакцию объекта диагностики при наличии трещины, возбуждаемого нестационарным узкополосным случайным гауссовским шумом, затем оценили отношения правдоподобия признаков согласно системе уравнений (3) и спектра мощности синтезированного сигнала.

Для сравнения эффективностей диагностики новых признаков и традиционного спектра мощности был использован критерий Фишера [11]

$$F = \frac{[m_1(u/H_0) - m_1(u/H_1)]^2}{\sigma^2(u/H_0) + \sigma^2(u/H_1)}, \quad (4)$$

где u/H_j — условная величина для гипотезы H_j , $j = 0, 1$; m_1 и σ^2 — символы математического ожидания и дисперсии.

Критерии Фишера для новых признаков F_{new} и спектральной плотности мощности F_{PSD} имеют вид:

$$F_{new} = \frac{[m_1(L\{X_R, X_I, \cdot\} | H_0) - m_1(L\{X_R, X_I, \cdot\} | H_1)]^2}{\sigma^2(L\{X_R, X_I, \cdot\} | H_0) + \sigma^2(L\{X_R, X_I, \cdot\} | H_1)}, \quad (5)$$

$$F_{PSD} = \frac{[m_1(L\{X_{PSD}, \cdot\} | H_0) - m_1(L\{X_{PSD}, \cdot\} | H_1)]^2}{\sigma^2(L\{X_{PSD}, \cdot\} | H_0) + \sigma^2(L\{X_{PSD}, \cdot\} | H_1)}. \quad (6)$$

Экспериментальные значения критериев Фишера для новых признаков и спектра мощности

Критерий Фишера	1	2	3	4	5	6	7	8	9	10	11
F_{new}	1,52	1,37	1,34	0,99	0,71	0,47	0,54	0,86	1,14	1,49	1,69
F_{PSD}	1,50	1,29	1,14	0,72	0,34	0,19	0,20	0,38	0,73	1,42	1,55

Собственная частота объекта диагностики при условии отсутствия трещины $f_n = 20$ Гц ($\omega_n = 40\pi$ рад/с). В представленной работе рассмотрены объекты с трещинами, характеризующиеся следующими значениями относительных жесткостей:

$$\left(\frac{\Delta k}{k}\right)_{H_0} = 0,1, \left(\frac{\Delta k}{k}\right)_{H_1} = 0,15.$$

В качестве воздействия использовался узкополосный гауссовский шум. Центральная частота гауссовского воздействия изменялась в диапазоне от 18,5 до 20,0 Гц, при этом собственные частоты диагностируемых объектов каждого из классов ($\omega_0 | H_0 = 19,47$, $\omega_0 | H_1 = 19,19$ Гц), полученные из выражения (2), находились внутри указанного диапазона. Значение параметра релейской огибающей сигнала возбуждения $b = 1,3 \cdot 10^3$, скорость изменения частоты составляла 0,5 Гц/с. Полученные при помощи моделирования резонансные колебания диагностируемого объекта были подвергнуты кратковременному преобразованию Фурье. В работе использована вторая гармоника резонансных колебаний, т. е. $i = 2$. Выбор второй гармоники объясняется [9] ее более высокой чувствительностью к наличию трещины по сравнению с другими гармониками, что является особенностью нелинейного поведения объекта диагностики, описываемого системой уравнений (1). В качестве диагностических признаков использованы: новые признаки — действительная и мнимая составляющие преобразования Фурье; традиционный диагностический признак — спектральная плотность мощности. Интервал дискретизации при моделировании был принят равным $\Delta t = 2,5 \cdot 10^{-3}$ с. При этом длительность сигнала t_1 увеличивается с 2,49 до 2,54 с. В работе [9] также исследовалось влияние просачивания на чувствительность диагностических признаков. Параметр просачивания ξ [12], характеризующийся количеством нецелых периодов колебаний, содержащихся в обрабатываемом сигнале, находился в интервале $[0, 1]$. При ξ , принадлежащем интервалу $(0; 1)$, эффект просачивания существует, для случаев $\xi = 0; 1$ просачивание отсутствует. Число экспериментов при моделировании равно 5000 для каждой из гипотез (H_0 или H_1) и для каждого значения параметра просачивания ξ . В таблице приведены значения критериев Фишера F_{new} и F_{PSD} для 11 экспериментов, в которых параметр просачивания ξ изменялся.

Поскольку определение параметра просачивания для случая изменяющейся частоты воздействия представляет определенную сложность, то для сопоставления данных таблицы со значениями ξ использовались работы, ранее опубликованные по данной теме [4, 5, 13]. Исходя из этих работ, а

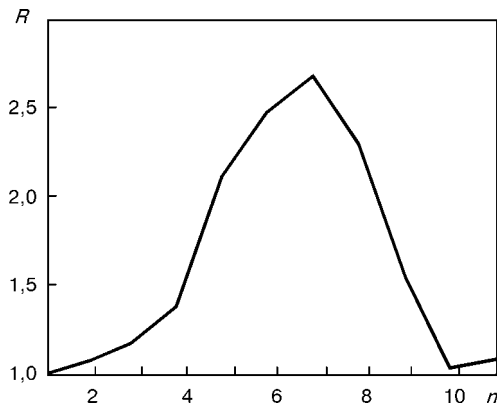


Рис. 2. Зависимость относительной эффективности новых признаков R от номера эксперимента n

также физической сути явления просачивания, можно предположить, что минимальные значения критерия Фишера из таблицы будут соответствовать значениям параметра просачивания в диапазоне 0,4...0,6, а максимальные — вблизи 0 и 1. Очевидно, что каждому номеру эксперимента будет соответствовать значение параметра просачивания из интервала [0; 1].

На рис. 1 представлены зависимости критериев Фишера, описываемые уравнениями (5), (6), от номера эксперимента для новых признаков и спектральной плотности мощности. Для всех значений параметра ξ , принадлежащих интервалу (0; 1), критерий Фишера F для предложенных новых признаков [1, 2] выше, чем для традиционного диагностического признака — спектра мощности. Это указывает на то, что диагностика на основе новых признаков имеет более высокую эффективность, чем на основе спектральной плотности мощности. Рассмотрим отношение R эффективностей диагностики по критерию Фишера для новых признаков F_{new} и спектральной плотности мощности F_{PSD} в зависимости от номера эксперимента:

$$R = F_{\text{new}} / F_{\text{PSD}}, \quad (7)$$

Согласно рис. 2 отношение R , описываемое выражением (7), всегда больше 1 и достигает максимального значения вблизи точки $\xi = 0,5$. Очевидно, что при диагностике усталостной трещины во всем диапазоне значений параметра ξ , принадлежащим [0; 1], примененный новый подход на основе признаков, описываемых формулами (3), оказывается более эффективным по сравнению с традиционным, основанным на использовании спектральной плотности мощности. Эффект просачивания еще более подчеркивает это преимущество.

ВЫВОДЫ

1. Применен новый обобщенный подход [1, 2] к обнаружению структурных повреждений. Его новизна заключается в одновременном использовании в качестве диагностических признаков действительной и мнимой составляющих преобразования

Фурье. Примененный подход обобщает традиционные методы диагностики, основанные на спектральной плотности мощности и фазовом спектре.

2. Рассмотрен метод вынужденных колебаний, использующий в качестве воздействия нестационарный узкополосный гауссовский шум. Приведенные результаты моделирования основаны на анализе сигналов, полученных с использованием нелинейной модели объекта диагностики с усталостной трещиной при возбуждении нестационарным узкополосным шумом. Результаты показывают, что эффективность диагностики усталостной трещины выше при использовании новых диагностических признаков по сравнению со спектральной плотностью мощности, и спектральная плотность мощности не является оптимальным признаком при диагностике трещин. Это подтверждают данные, опубликованные ранее [1–6, 13].

1. Gelman L. M., Braun S. G. The optimal usage of the Fourier transform for pattern recognition // Mech. Syst. and Signal Processing. — 2000. — **15**, № 3. — P. 641–646.
2. Гельман Л. М., Удовенко Л. Н. Новые диагностические признаки на основе одно- и многомерного преобразований Фурье // Технич. диагностика и неразруш. контроль. — 2000. — № 4. — С. 13–16.
3. Гельман Л. М., Удовенко Л. Н. Новые признаки, основанные на преобразовании Фурье для диагностики и распознавания образов // Там же. — 2001. — № 3. — С. 27–28.
4. Diagnostics via Fourier transforms: real and imaginary components vs. power spectral density // Proc. of the 4th Intern. conf. on acoustical and vibratory surveillance methods and diagnostic techniques, CETIM-Senlis, France, 12–14 Sept., 2001.
5. Gelman L. M., Petrunin I. V. New generic optimal approach for vibroacoustical diagnostics and prognostics // Proc. of the symp. on Acoustics, Vellore, India. — Vol. 2. — P. 10–21.
6. Оптимальное использование преобразования Фурье для диагностического метода вынужденных колебаний / Л. М. Гельман, Ю. Ф. Зиньковский, А. А. Миропольский, И. В. Петрунин // Радиоэлектроника. — 2001. — № 12. — С. 34–40.
7. Разработка и изготовление аппаратного комплекса для диагностики роторных деталей авиационных двигателей: (Отчет по ОКР). — НПО «Славутич»; Руководитель темы Л. М. Гельман. — Киев, 1995.
8. Gelman L. M., Gorpnich S. V. Non-Linear vibroacoustical free oscillation method for crack detection and evaluation // Mech. Syst. and Signal Processing. — 2000. — **14**, № 3. — P. 343–351.
9. Bouraou N. L., Gelman L. M. Theoretical bases of the free oscillation method for acoustical nondestructive testing // Proc. of Noise-Con'97, the Pennsylvania State University. — 1997. — P. 417–423.
10. Гельман Л. М., Зиньковский Ю. Ф., Петрунин И. В. Спектральный анализ нестационарного узкополосного случайного воздействия // Радиоэлектроника. — 2000. — № 8. — С. 35–40.
11. Young T. Y., Fu K.-S. Handbook of pattern recognition and image processing. — Academic Press, Inc., 1986.
12. Oppenheim A., Schaffer R. Digital signal processing / Ed. C. Englewood. — NJ: Prentice Hall, 1975.
13. Гельман Л. М., Зиньковский Ю. Ф., Петрунин И. В. Эффективность использования действительной и мнимой составляющих преобразования Фурье для диагностики усталостных трещин // Технич. диагностика и неразруш. контроль. — 2001. — № 4. — С. 21–23.