

УДК 534.08+620.19

ВИБРОАКУСТИЧЕСКИЙ МЕТОД СВОБОДНЫХ КОЛЕБАНИЙ ДЛЯ НЕРАЗРУШАЮЩЕГО КОНТРОЛЯ ТРЕЩИН

Л. М. ГЕЛЬМАН, С. В. ГОРПИНИЧ

Национальный технический университет Украины “КПИ”, Киев

Получено 5.11.98 ◊ Пересмотрено 14.09.99

Приведены теоретические и экспериментальные исследования виброакустического метода свободных колебаний для неразрушающего контроля усталостных трещин. Предложены обобщения декремента затухания свободных колебаний для нелинейных колебательных систем. Впервые получено выражение для декремента затухания свободных колебаний нелинейной одномассовой модели с трещиной. Проведены систематизированные исследования зависимости декремента затухания от размера трещины. Впервые показано, что с развитием трещины в объекте контроля декремент затухания может как увеличиваться, так и уменьшаться. Показано, что характер зависимости декремента затухания от размера трещины определяется зависимостью показателя несимметрии затухания от относительного размера трещины. Исследован декремент затухания для случаев внутреннего и внешнего трений. Приведены результаты экспериментальных исследований метода для компрессорной лопатки газотурбинного авиационного двигателя, согласующиеся с результатами теоретических исследований. Полученные результаты носят общий характер и могут быть использованы для объектов контроля, описываемых нелинейной одномассовой колебательной моделью.

Наведено теоретичні та експериментальні дослідження виброакустичного метода вільних коливань для неруйнівного контролю тріщин від утоми. Запропоновані узагальнення декремента затухання вільних коливань для нелінійних коливальних систем. Вперше одержано вираз для декремента затухання вільних коливань нелінійної одномасової моделі з тріщиною. Проведено систематизовані дослідження залежності декремента затухання від розміру тріщини. Вперше показано, що з розвитком тріщини в об'єкті контролю декремент затухання може як зростати, так і зменшуватись. Показано, що характер залежності декремента затухання від розміру тріщини визначається залежністю показника несиметрії затухання від відносного розміру тріщини. Досліджено декремент затухання для випадків внутрішнього та зовнішнього тертя. Наведені результати експериментальних досліджень метода для компресорної лопатки газотурбінного авіаційного двигуна, котрі узгоджуються з результатами теоретичних досліджень. Одержані результати носять загальний характер і можуть бути використані для об'єктів контролю, що описуються нелінійною одномасовою коливальною моделлю.

Theoretical and experimental consideration of the free oscillation method for vibroacoustical diagnostics of the fatigue cracks is presented. New generalizations of a decrement of oscillations for nonlinear systems are proposed. For the first time the expression for decrement of the free oscillation of a nonlinear one-mass system with crack has been received. Systematized investigations of dependencies of the decrement from the relative crack size are carried out. For the first time it was shown that with the increase of a crack in controlled object there are possible both the increase and the decrease of decrement. Also, it was shown that the dependence of a decrement from the crack size is controlled by dependence of the attenuation asymmetry factor from the relative crack size. The decrement was investigated for cases of the frequency-dependent and frequency-independent external and internal frictional forces. The experimental results with titanium compressor blades of aircraft gas turbine engine match with the theoretical ones. The obtained results are of general nature, and can be used for diagnostics of objects described by a nonlinear one-mass model.

ВВЕДЕНИЕ

Неразрушающий контроль состояния и характеристик рабочих элементов различных устройств является важным компонентом современных технологий в различных областях техники. При этом используются различные типы динамических полей, включая тепловые, электромагнитные, акустические. Для многих случаев наблюдение за изменениями акустических параметров элементов конструкций дает возможность решить обратную задачу определения важных для оценки работоспособности внутренних параметров объекта.

Одним из вариантов акустического метода является виброакустический метод свободных колебаний, нашедший широкое практическое применение [1–9]. Его суть заключается в ударном возбуждении объекта контроля и последующем на-

блюдении за параметрами свободных колебаний, которые зависят от состояния объекта контроля, а также наличия и характеристик имеющихся в нем дефектов. Такие параметры называют информативными (диагностическими признаками). В простой ситуации, когда информативные параметры бездефектного объекта контроля известны, а условия диагностики неизменны, о появлении дефектов в объекте контроля свидетельствуют изменения данных параметров, а о характеристиках дефектов судят по величине этих изменений. На практике более распространена ситуация, когда значения информативных параметров каждого данного объекта контроля в его дефектном и бездефектном состоянии неизвестны. В этом случае для диагностики используются [10] плотности распределения вероятностей диагностических признаков для классов бездефектных объек-

тов контроля и объектов контроля в дефектном состоянии, полученные либо на основании теоретического анализа, либо по экспериментальным данным (на основании обучающих последовательностей объектов контроля).

Дефектами, эффективно контролируруемыми с помощью метода свободных колебаний, являются усталостные трещины. В числе информативных параметров, используемых для диагностики усталостных трещин, можно выделить амплитуды высших гармоник свободных колебаний [1–3, 7–9], величины которых зависят от размера трещины (с ростом трещины наблюдается рост амплитуд). Работы [7–9] посвящены теоретическому анализу использования данных параметров для метода свободных колебаний. В качестве диагностического признака метода свободных колебаний могут выступать также характеристики затухания свободных колебаний объекта контроля [1–6].

Следует отметить, что в работах [1–3] отсутствует теоретическое обоснование применения характеристик затухания для диагностики усталостных трещин. Данное обстоятельство затрудняет практическое применение метода. Работы [4–6] частично восполняют этот пробел и посвящены созданию теоретических основ использования характеристик затухания для метода свободных колебаний. Данная работа является развитием работ [4–6].

В разделе 1 данной статьи проведены теоретические исследования метода свободных колебаний. В подразделе 1.1 описана используемая модель объекта контроля и предложены модели декремента затухания в качестве характеристик затухания для нелинейных колебательных систем. В подразделе 1.2 исследованы зависимости декремента затухания от относительного размера трещины. В подразделе 1.3 исследован метод свободных колебаний при различных типах демпфирования. В разделе 2 проведены экспериментальные исследования метода, их результаты сопоставлены с результатами теоретических исследований.

1. ТЕОРЕТИЧЕСКИЕ ИССЛЕДОВАНИЯ МЕТОДА

1.1. Модель объекта контроля и декремента затухания для нелинейных систем

При рассмотрении динамических свойств объекта вблизи резонансной частоты можно использовать аналогию с системой с одной степенью свободы с массой m и линейной зависимостью между деформацией и восстанавли-

вающей силой. Что касается демпфирования в системе, то здесь можно использовать модели частотно-зависимого и частотно-независимого трения. Случай частотно-независимого трения посредством введения специального корректирующего множителя [11] сводится к случаю частотно-зависимого трения. Поэтому в дальнейшем, без уменьшения общности, будем описывать модель объекта контроля уравнениями для системы с частотно-зависимым трением.

С появлением усталостных трещин в объекте контроля используемая модель становится нелинейной по следующим соображениям. Известно, что при появлении усталостной трещины в объекте контроля жесткость конструкции объекта контроля имеет различные значения при деформациях на растяжение и на сжатие [12]. В работе [13] для объяснения этого факта сделано предположение о том, что изменение жесткости происходит вследствие развития трещины при растяжении, а при сжатии усталостная трещина полностью закрыта и не развивается. Экспериментальное подтверждение такого изменения жесткости, основанное на исследовании фотограмм раскрытия усталостной трещины, приведено в работе [14].

Описанное явление, аналогичное “дышащей” усталостной трещине в многоопорном роторе [15], можно учесть посредством введения функции дыхания образующихся несплошностей в материале, называемой иначе просто “функцией дыхания материала” [7, 16]:

$$c(x) = c \left[1 - 0.5 \frac{\Delta c}{c} \left(1 + \text{sign}(x) \right) \right]. \quad (1)$$

При сжатии ($x < 0$) трещина “закрывается”, объект контроля можно считать однородным и его жесткость c_c , как следует из формулы (1), равна жесткости c объекта контроля без трещины ($c_c = c$). При растяжении ($x > 0$) трещина “раскрывается”, объект контроля неоднороден и поэтому его жесткость c_s уменьшается на величину Δc ($c_s = c - \Delta c$). Следует заметить, что описанная модель изменения жесткости не является универсальной и верна лишь для предположений о поведении усталостной трещины при деформировании объекта контроля, сделанных выше.

Аналогично жесткости, затухание в системе также различно при растяжении и сжатии [4–6]. При сжатии показатель затухания h_2 равен показателю затухания h объекта контроля без трещины, в то время как при растяжении показатель затухания h_1 в общем случае отличен от h_2 .

Свободные колебания объекта контроля, моделируемого как система с трещиной, описываются системой дифференциальных уравнений [9]:

$$\begin{cases} \ddot{x} + 2h_1\dot{x} + \omega_s^2x = 0, & x \geq 0, \\ \ddot{x} + 2h_2\dot{x} + \omega_c^2x = 0, & x < 0, \end{cases} \quad (2)$$

где $\omega_s^2 = c_s/m$; $\omega_c^2 = c_c/m$; h_i - показатели затухания при растяжении ($i=1$) и сжатии ($i=2$).

Обозначим через Δl линейный размер трещины, а через l - линейный размер объекта контроля в направлении трещины. Тогда зависимость между относительным изменением жесткости $\Delta c/c$ и относительным размером трещины $\gamma = \Delta l/l$ для колебаний рассматриваемой модели можно записать в виде [16]

$$\frac{\Delta c}{c} = \frac{H(\gamma)}{H(\gamma) + 1.15}, \quad (3)$$

где

$$H(\gamma) = 19.60\gamma^{10} - 40.69\gamma^9 + 47.04\gamma^8 - 32.99\gamma^7 + 20.30\gamma^6 - 9.98\gamma^5 + 4.60\gamma^4 - 1.05\gamma^3 + 0.63\gamma^2.$$

Для начальных условий $x(t_0) = 0$, $\dot{x}(t_0) = \nu_0$, $t_0 = 0$, соответствующих ударному возбуждению, при малом трении ($h_i < \omega_i$) решение системы (2) имеет вид

$$x(t) = \begin{cases} (\nu_0/\omega_1) \times \\ \times \exp[n(T_2/2)(h_1 - h_2) - h_1 t] \times \\ \times \sin[\omega_1(t - nT)], \\ \quad t \in [nT, nt + T_1/2], \\ \\ -(\nu_0/\omega_2) \times \\ \times \exp[(n+1)(T_1/2)(h_2 - h_1) - h_2 t] \times \\ \times \sin[\omega_2(t - nT - T_1/2)], \\ \quad t \in [nT + T_1/2, (n+1)T], \end{cases} \quad (4)$$

где $n = 0, 1, 2 \dots$; $\omega_1^2 = \omega_s^2 - h_1^2$; $\omega_2^2 = \omega_c^2 - h_2^2$; $T_i = 2/\omega_i$; $T = (T_1 + T_2)/2$ - период свободных затухающих колебаний системы.

Применение классического логарифмического декремента затухания, определяемого как натуральный логарифм отношения двух последовательных экстремумов, для описания демпфирования в нелинейных системах в общем случае может оказаться некорректным [17], так как оценка затухания с использованием классического логарифмического декремента затухания производится либо для деформации при сжатии, либо для деформации

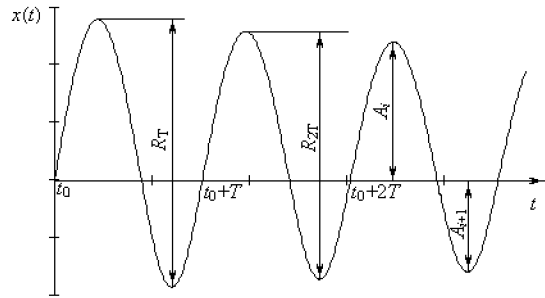


Рис. 1. Временная диаграмма колебаний (4)

при растяжении и не описывает затухание в целом. Поэтому ниже рассмотрены три следующих обобщения понятия логарифмического декремента затухания для нелинейных систем, учитывающие процесс затухания в целом:

обобщение 1. Логарифмический декремент затухания вычисляется как натуральный логарифм отношения двух последовательных размахов, взятых на промежутках, равных периоду затухающих колебаний:

$$d_1 = \ln \left(\frac{R_T}{R_{2T}} \right), \quad (5)$$

где R_T , R_{2T} - размахи на временных интервалах $\Delta t_1 = [t_0, t_0 + T]$ и $\Delta t_2 = [t_0 + T, t_0 + 2T]$ соответственно; $t_0 = \arg x(t) = 0$ (рис. 1). Размах функции $x(t)$ на некотором промежутке Δt из области ее существования есть разность между максимальным и минимальным значением $x(t)$ на этом промежутке;

обобщение 2. Логарифмический декремент затухания вычисляется как среднее арифметическое двух классических логарифмических декрементов затухания для деформации при сжатии (d_c) и для деформации при растяжении (d_s):

$$d_2 = \frac{d_s + d_c}{2}; \quad (6)$$

обобщение 3. Логарифмический декремент затухания вычисляется как удвоенный натуральный логарифм отношения двух последовательных экстремумов A_i и A_{i+1} , направленных в разные стороны, т.е. минимума и максимума отклонения системы от положения равновесия (см. рис. 1):

$$d_3 = 2 \ln \left(\frac{A_i}{A_{i+1}} \right). \quad (7)$$

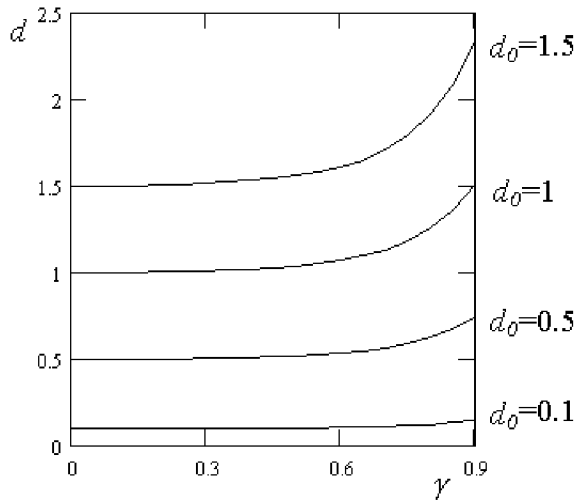


Рис. 2. Зависимость декремента d от относительного размера трещины при $h^* = 0$ и постоянных параметрах d_0

Применительно к линейному осциллятору предложенные обобщения дают результат, совпадающий с классическим логарифмическим декрементом затухания. Определим классический логарифмический декремент затухания и логарифмический декремент затухания по обобщениям 1–3 для рассматриваемой модели. Используя обобщения 1–2 для системы (4), после преобразований получим

$$d_1 = d_2 = \frac{h_1 T_1 + h_2 T_2}{2}. \quad (8)$$

Используя обобщение 3 для системы (4), получим

$$d_3 \cong d_1 \pm 0.5 \left(\ln \frac{h_1 T_1}{h_2 T_2 \left(1 - \frac{\Delta c}{c} \right)} \right), \quad (9)$$

где знак “+” имеет место при условии что первым берется максимум при растяжении, а знак “–” – при обратном условии. По классическому определению логарифмического декремента затухания для системы (4) для деформации при растяжении и для деформации при сжатии имеем:

$$d = \frac{h_1 T_1 + h_2 T_2}{2}. \quad (10)$$

Как видно из выражений (7), (10), классический логарифмический декремент затухания не зависит от направления деформации x и совпадает с результатом, полученным по обобщениям 1, 2. Это

доказывает применимость классического логарифмического декремента затухания для рассматриваемой нелинейной модели. Из выражения (9) следует, что результат по обобщению 3 зависит от того, берется ли отношение максимума на растяжение к максимуму на сжатие или наоборот. Указанный результат отличается от результата, полученного по обобщениям 1, 2. Поэтому далее обобщение 3 мы не будем использовать для системы (4), хотя оно может быть применено для характеристики затухания в других нелинейных системах.

1.2. Исследование зависимостей декремента затухания от относительного размера трещины

Учитывая что $\omega_s^2 / \omega_c^2 = (\omega_1^2 + h_1^2) / (\omega_2^2 + h_2^2) = 1 - \Delta c / c$ (см. [9]), из выражения (10) получаем:

$$d = \frac{d_0}{2} \left(1 + \frac{1 - h^*}{\sqrt{1 - \frac{\Delta c}{c} + \eta}} \right), \quad (11)$$

где $d_0 = h_2 T_2$ – логарифмический декремент затухания свободных колебаний объекта контроля без трещины; $h^* = (h_2 - h_1) / h_2$ – показатель несимметрии затухания;

$$\eta = \frac{d_0^2}{4\pi^2} \left(1 - \frac{\Delta c}{c} - (1 - h^*)^2 \right).$$

При неизменных параметрах h^* и d_0 величина d является функцией относительного размера трещины γ и растет с ростом величины γ (рис. 2), d также растет с ростом d_0 при неизменных γ и h^* и с уменьшением h^* при неизменных γ и d_0 . Величина d_0 является параметром бездефектного объекта контроля и не зависит от γ . Величина h^* в общем случае может зависеть от размера γ (различные случаи такой зависимости рассмотрены ниже), и поэтому поведение декремента d как функции γ различно для различных зависимостей $h^*(\gamma)$. Если известны величина d_0 и зависимость $h^*(\gamma)$, то по экспериментальной оценке d на основании выражения (11) можно не только судить о наличии трещины в объекте контроля, но и производить оценку относительного размера трещины.

Если зависимость $h^*(\gamma)$ затруднительно определить аналитически, то логарифмический декремент затухания, определяемый формулой (11), можно использовать как диагностический признак после обучения системы неразрушающего контроля по обучающему набору объекта контроля.

В случае априорно известного значения признака для бездефектного объекта контроля целесообразно рассматривать относительный логарифмический декремент затухания, определяемый как

$$d^* = \frac{d}{d_0}. \quad (12)$$

Этот параметр равен единице для всех бездефектных объекта контроля, и по его отклонению от единицы можно судить о наличии трещины в объекте контроля. Принимая во внимание то, что для твердого тела выполняется условие $hi < 0.048\omega_i$, $i=1, 2$ [18], рассмотрим отдельно случай $h_i \ll \omega_i$, $i=1, 2$. При этом можно положить $\eta=0$. Тогда выражения (11), (12) преобразуются к виду

$$d = \frac{2\pi h_2}{\omega_0} \frac{1 - h^* + \left(1 - \frac{\Delta c}{c}\right)^{1/2}}{1 + \left(1 - \frac{\Delta c}{c}\right)^{1/2}}, \quad (13)$$

$$d^* = \frac{1 - h^* + \left(1 - \frac{\Delta c}{c}\right)^{1/2}}{2 \left(1 - \frac{\Delta c}{c}\right)^{1/2}}. \quad (14)$$

Зависимость $d^*(\gamma)$ при $h^* = \text{const}$ для различных значений h^* представлена на рис. 3. Как следует из графика, при $h^*(\gamma) = \text{const}$ функция (14) является возрастающей функцией аргумента γ . Выражения (13), (14) показывают, что характер зависимости логарифмического декремента затухания и относительного логарифмического декремента затухания от размера трещины определяется зависимостью показателя несимметрии затухания от относительного размера трещины. Если функция $h^*(\gamma)$ известна, то на основании выражений (13), (14) можно оценить относительный размер трещины.

С точки зрения применимости для неразрушающего контроля, относительный логарифмический декремент затухания d^* обладает рядом преимуществ по сравнению с логарифмическим декрементом затухания d . Как следует из выражения (14), относительный логарифмический декремент затухания d^* инвариантен относительно параметра бездефектного объекта контроля d_0 , равен для всех таких объектов контроля единице и поэтому оценки d^* более помехоустойчивы (зависят от меньшего количества мешающих параметров). Кроме того, так как показатель несимметрии затухания есть функция относительного

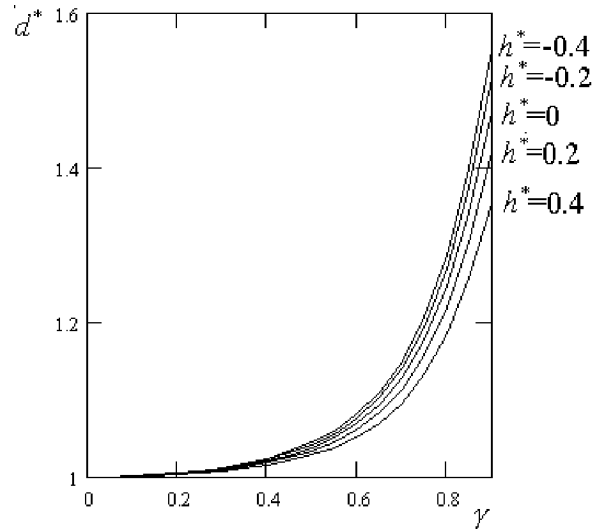


Рис. 3. Зависимость относительного декремента d^* от относительного размера трещины γ при постоянных параметрах h^*

размера трещины, то относительный логарифмический декремент затухания d^* зависит лишь от размера γ .

Следует однако отметить, что в реальных условиях неразрушающего контроля использование относительного логарифмического декремента затухания может оказаться затруднительным, так как для его оценки необходимо знать значение логарифмического декремента затухания для этого же объекта контроля в бездефектном состоянии. Если логарифмический декремент затухания для бездефектного объекта контроля неизвестен, то для неразрушающего контроля следует использовать оценки логарифмического декремента затухания, которые получаются посредством применения обобщений 1, 2 или классического определения к свободным колебаниям с применением усреднения по нескольким периодам сигнала, и используются по схеме, приведенной во введении.

1.3. Исследование метода для различных типов демпфирования

Для проведения дальнейшего анализа получим выражение $h^* = f(\gamma)$ в явном виде. Сила трения F в системе (2) имеет в общем случае внутреннюю F_i и внешнюю F_e составляющие. Учитывая, что во внутреннем и во внешнем трении имеются частотно-зависимая и частотно-независимая составляющие, силу внутреннего трения представим

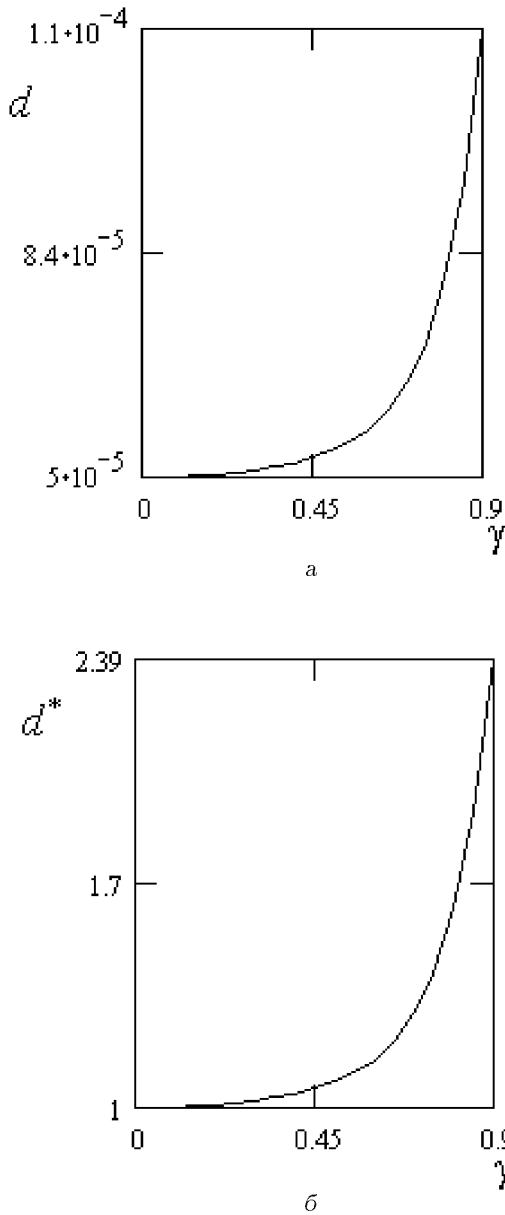


Рис. 4. Зависимости декрементов от относительного размера трещины при частотно-независимом внешнем трении в системе ($f_2=1000$ Гц, $h_2=0.05$):
 а - декремент d ;
 б - относительный декремент d^*

в виде [11]

$$F_i = -a_i \tilde{x} - b_i \dot{x}, \quad (15)$$

где a_i - коэффициент внутреннего частотно-независимого трения; b_i - коэффициент внутреннего частотно-зависимого трения; \tilde{x} - производная деформации по фазе; \dot{x} - производная деформации по времени. В дальнейшем, не ограничивая

общности рассуждений, будем рассматривать деформацию на растяжение.

Величины \tilde{x} и \dot{x} связаны соотношением $\tilde{x} = I\dot{x}$, где I - корректирующий множитель. В данном случае $I = \omega_s^{-1}$. Коэффициенты a_i и b_i связаны с жесткостью конструкции объекта контроля следующими соотношениями [11]:

$$a_i = \alpha_i c_s, \quad b_i = \beta_i c_s, \quad (16)$$

где α_i ; β_i - коэффициенты, не зависящие от материала объекта контроля. Аналогичным образом сила внешнего трения представляется в виде [11]:

$$F_e = -a_e \tilde{x} - b_e \dot{x}, \quad (17)$$

где a_e - коэффициент внешнего частотно-независимого трения; b_e - коэффициент внешнего частотно-зависимого трения. Эти коэффициенты связаны с массой объекта контроля зависимостями [11]

$$a_e = \alpha_e m, \quad b_e = \beta_e m, \quad (18)$$

где α_e ; β_e - коэффициенты, не зависящие от материала объекта контроля.

С учетом выражений (15) - (18) сила трения в системе (2) может быть представлена в виде

$$F = \begin{cases} - \left[\left(\frac{\alpha_i}{\omega_s} + \beta_i \right) c_s + \left(\frac{\alpha_e}{\omega_s} + \beta_e \right) m \right] \dot{x} & \text{при } x \geq 0, \\ - \left[\left(\frac{\alpha_i}{\omega_c} + \beta_i \right) c_c + \left(\frac{\alpha_e}{\omega_c} + \beta_e \right) m \right] \dot{x} & \text{при } x < 0. \end{cases} \quad (19)$$

Из выражения (19), учитывая что $h = F/(2m\dot{x})$, получаем

$$\begin{cases} h_1 = \frac{1}{2} \left[\left(\frac{\alpha_i}{\omega_s} + \beta_i \right) \omega_s^2 + \left(\frac{\alpha_e}{\omega_s} + \beta_e \right) \right], \\ h_2 = \frac{1}{2} \left[\left(\frac{\alpha_i}{\omega_c} + \beta_i \right) \omega_c^2 + \left(\frac{\alpha_e}{\omega_c} + \beta_e \right) \right], \end{cases} \quad (20)$$

$$h^* = 1 - \frac{\left(\frac{\alpha_i}{\omega_s} + \beta_i \right) \omega_s^2 + \frac{\alpha_e}{\omega_s} + \beta_e}{\left(\frac{\alpha_i}{\omega_c} + \beta_i \right) \omega_c^2 + \frac{\alpha_e}{\omega_c} + \beta_e}. \quad (21)$$

Используя выражения (20), (21), можно исследовать декременты d , d^* при различных силах трения в системе.

Рассмотрим следующие четыре случая:

случай 1. Частотно-зависимое внешнее трение: $\alpha_i = \alpha_e = \beta_i = 0$. Из выражения (21) после преобразований получим $h^* = 0$ для $\gamma \in (0, 1)$, поэтому декременты d , d^* возрастают с ростом относительного размера трещины γ (см. рис. 2);

случай 2. Частотно-независимое внешнее трение:

$\alpha_i = \alpha_i = \beta_e = 0$. Из выражения (21) получаем $h^* = 1 - 1/\sqrt{1 - \Delta c/c}$. Следовательно, декременты d, d^* возрастают с ростом относительного размера трещины γ (рис. 4);

случай 3. Частотно-зависимое внутреннее трение:

$\alpha_e = \alpha_i = \beta_e = 0$. Из выражения (21) следует, что $h^* = \Delta c/c$, поэтому значения декрементов d, d^* убывают с ростом относительного размера трещины γ (рис. 5). Заметим, что возможность уменьшения декремента затухания с ростом размера трещины показан здесь впервые и ранее в литературе не обсуждалась;

случай 4. Частотно-независимое внутреннее трение:

$\alpha_e = \beta_i = \beta_e = 0$. Из выражения (21) получим $h^* = 1 - \sqrt{1 - \Delta c/c}$. Следовательно, декременты d, d^* не изменяются с ростом относительного размера трещины γ .

Заметим, что частотно-зависимое (вязкое) внутреннее трение характерно для полимеров, частотно-независимое (гистерезисное) внутреннее трение характерно для металлов [11]. Поэтому случаи 3 и 4 описывают соответственно полимерный и металлический объекты контроля при наличии только внутреннего трения.

Рассмотрим также важный для практики неразрушающего контроля случай металлического объекта контроля, находящегося под действием сил внутреннего (частотно-независимого) и внешнего (частотно-зависимого и частотно-независимого) трения: $\alpha_i \neq 0, \beta_i = 0; \alpha_e \neq 0, \beta_e \neq 0$. В этом случае выражение (13) с учетом выражения (21) преобразуется к виду

$$d^* = D_1 + D_2 \left(1 - \frac{\Delta c}{c}\right) + D_3 \left(1/\sqrt{1 - \frac{\Delta c}{c}}\right), \quad (22)$$

где $D_1 = (2h_2 + \alpha_i \omega_2)/(4h_2)$; $D_2 = (\alpha_e)/(4h_2 \omega_2)$; $D_3 = 1/2 - (\alpha_i \omega_2 + \alpha_e/\omega_2)/(4h_2)$; D_1, D_2, D_3 – положительные постоянные коэффициенты, такие что $D_1 + D_2 + D_3 = 1$. При выводе соотношения (21) считалось, что выполняется условие $h_i \ll \omega_i, i = 1, 2$,

Как следует из выражения (22), для последнего случая и логарифмический декремент затухания, и относительный логарифмический декремент затухания увеличиваются с ростом размера трещины. Выражения для коэффициентов D_1, D_2, D_3 показывают, что относительный логарифмический декремент затухания в данном случае не зависит от коэффициента внешнего частотно-зависимого трения.

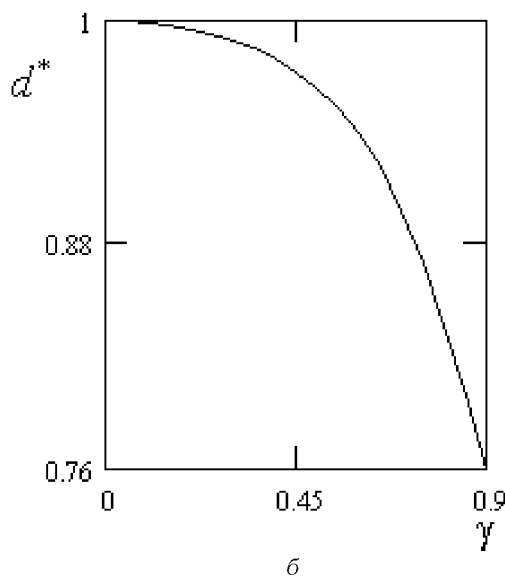
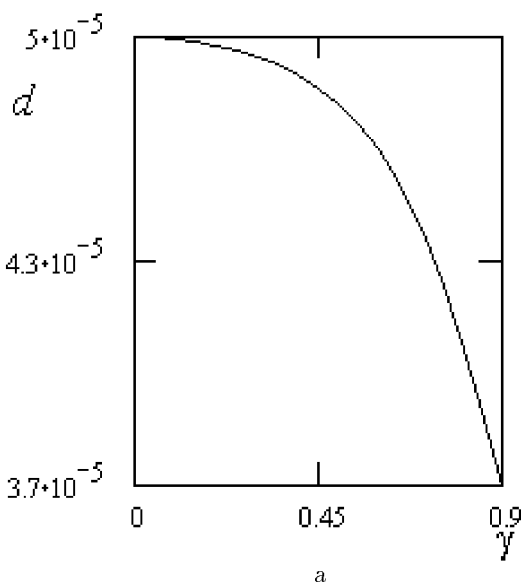


Рис. 5. Зависимости декрементов от относительного размера трещины при частотно-зависимом внутреннем трении в системе ($f_2 = 1000$ Гц, $h_2 = 0.05$):

а – декремент d ;
б – относительный декремент d^*

Полученные результаты позволяют сделать общий вывод о том, что само изменение во времени декремента затухания без знания физики и особенностей демпфирования не может служить диагностическим признаком роста трещины.

В практике неразрушающего контроля весьма распространена ситуация, когда собственная ча-

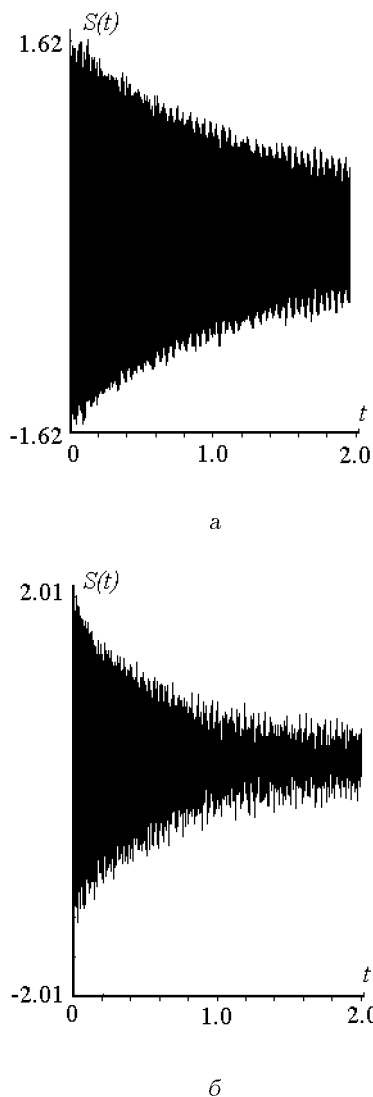


Рис. 6. Временные диаграммы свободных колебаний турбинной лопатки, полученные в эксперименте:

а – без трещины;
б – с трещиной относительного размера $\gamma = 0.4$

стота объекта контроля без трещины ω_0 априорно неизвестна. Указанная априорная неизвестность, как следует из выражения (14), несущественна при диагностике на основе относительного логарифмического декремента затухания, но значительно снижает эффективность диагностики на основе логарифмического декремента затухания. Снижение эффективности можно уменьшить путем использования адаптивного метода принятия решения [19, 20]. Зависимости (11), (13) показывают, что для адаптации метода к неизвест-

ной собственной частоте объекта контроля целесообразно использовать оценку $\hat{\omega}_0$ этой частоты в качестве измеримого мешающего параметра. Метод принятия решения включает в этом случае измерение собственной частоты объекта контроля ω_0 параллельно с измерением декремента затухания, а также формирование адаптивного отношения правдоподобия [19], зависящего от оценок собственной частоты и декремента, и сравнение его с порогом [10].

2. ЭКСПЕРИМЕНТАЛЬНЫЕ ИССЛЕДОВАНИЯ МЕТОДА

Экспериментальные исследования метода на основе использования данных о декрементах (10) проведены на тестовом стенде авиадвигательного завода «Мотор-Січ» [21]. Для исследований использовалась титановая лопатка первой ступени компрессора авиационного газотурбинного двигателя ТВЗ-117. Прием акустических сигналов, излучаемых при свободных механических колебаниях лопатки, осуществлялся конденсаторным микрофоном. Для ударного возбуждения свободных колебаний в объекте контроля использовалось специальное ударное устройство с резиновым бойком.

После серии экспериментов с лопаткой в бездефектном состоянии, в ней искусственным образом создавалась усталостная трещина, и эксперимент повторялся при неизменных прочих условиях. Сигналы свободных колебаний лопатки без трещины и с трещиной приведены на рис. 6. Значения логарифмического декремента затухания для лопатки с трещиной и без трещины приведены в таблице, причем под номерами 1–4 представлены результаты нескольких повторов эксперимента для лопатки без трещины, а под номерами 5–8 – для лопатки с трещиной.

Условия, в которых проводился эксперимент, соответствуют рассмотренному в разделе 1.3 случаю металлического объекта контроля под действием сил внутреннего и внешнего трения (выражение (22)). В эксперименте проверялся теоретический прогноз об ожидаемом увеличении декремента затухания при появлении трещины в объекте контроля. Как видно из таблицы, при появлении трещины в лопатке компрессора (относительный размер трещины 0.4) действительно имеет место рост логарифмического декремента затухания, что указывает на согласованность экспериментальных данных с теоретическим прогнозом.

ВЫВОДЫ

1. В работе проведены теоретические и экспериментальные исследования применения виброакустического метода свободных колебаний для неразрушающего контроля усталостных трещин.
2. Приведены три варианта обобщения декремента затухания для нелинейных колебательных систем. Получены выражения для декремента затухания свободных колебаний нелинейной одномассовой модели с трещиной.
3. Показано, что для нелинейной одномассовой колебательной модели объекта с трещиной декремент затухания зависит от следующих параметров: показателя затухания и собственной частоты колебаний модели без трещины, показателя несимметрии затухания и размера трещины.
4. Проведены систематизированные исследования зависимости декремента затухания от размера трещины. Впервые показано, что при появлении трещины в объекте контроля декремент затухания может как увеличиваться, так и уменьшаться. Показано, что характер зависимости декремента затухания от размера трещины определяется зависимостью показателя несимметрии затухания от относительного размера трещины. Последняя зависимость получена в явном виде.
5. Исследован декремент затухания для случаев с внутренним и внешним трением. Показано, что:
 - в случае частотно-независимого внутреннего трения, характерного для металлических объектов контроля, декремент затухания не изменяется с ростом трещины;
 - в случае частотно-зависимого внутреннего трения, характерного для полимерных объектов контроля, декремент затухания уменьшается с ростом размера трещины;
 - в случае частотно-зависимого и частотно-независимого внешнего трения декремент затухания возрастает с ростом размера трещины.
6. Проведены экспериментальные исследования метода с компрессорной лопаткой газотурбинного авиационного двигателя. Показана

Таблица. Экспериментальные результаты

Номер теста	Состояние лопатки	Оценка логарифмического декремента затухания $d \times 10^{-3}$
1	без трещины	1.739
2	без трещины	1.830
3	без трещины	1.664
4	без трещины	1.685
5	с трещиной	2.217
6	с трещиной	2.420
7	с трещиной	2.145
8	с трещиной	2.353

согласованность экспериментальных данных с теоретическим прогнозом.

1. *Приборы для неразрушающего контроля материалов и изделий. Справочник. В 2-х кн. /* Ред. В. В. Клюева. Кн. 2.– М.: Машиностроение, 1976.– 447 с.
2. *Неразрушающий контроль металлов и изделий. Справочник /* Ред. Г. С. Самойловича.– М.: Машиностроение, 1976.– 651 с.
3. *Неразрушающий контроль. В 5-и кн. Кн. 2. Акустический контроль /* Ред. В. В. Сухорукова.– М.: Высшая школа, 1992.– 519 с.
4. *Gelman L. M., Gorpnich S. V. Nonlinear vibroacoustical free oscillation method for crack detection and evaluation // J. Acoust. Soc. Amer.– 1998.– 103, N 5, Pt. 2.– P. 2949.*
5. *Banas F. P., Gelman L. M., Gorpnich S. V. Nonlinear vibroacoustical free oscillation method for cracks detection and evaluation // Proc. of the 3-rd Int. Conf. "Acoustical and Vibratory Surveillance Methods and Diagnostic Techniques".– CETIM: Senlis, France, 1998.– P. 521–531.*
6. *Гельман Л. М., Горпинич С. В. Неразрушающий контроль трещин на основе декремента затухания свободных колебаний изделий // Техн. диагност. и неразр. контр.– 1998.– N 4.– С. 21–26.*
7. *Карасев В. А., Ройтман А. Б. Доводка эксплуатируемых машин. Вибродиагностические методы.– М.: Машиностроение, 1975.– 411 с.*
8. *Ройтман А. Б., Пылов А. А., Александрова Н. Б. Продольные колебания консольного стержня с поперечной трещиной. Сообщение 1. Малые колебания // Пробл. прочн.– 1999.– N 2.– С. 23–34.*
9. *Bourau N., Gelman L. Theoretical bases of free oscillation method for acoustical non-destructive testing // Proc. of NOISE-CON-97.– The Pennsylvania State University. Pennsylvania, 1997.– P. 417–423.*
10. *Патрик В. Основы теории распознавания образов.– М.: Сов. радио, 1980.– 720 с.*
11. *Василенко Н. В. Теория колебаний.– К.: Вища школа, 1992.– 580 с.*

12. Коцаньда С. Усталостное разрушение металлов.– М.: Металлургия, 1976.– 456 с.
13. Буцорога В. П. Аппаратура для экспериментального исследования развития усталостной трещины // Пробл. прочн.– 1996.– N 2.– С. 110–119.
14. Романов А. Н., Махутов Н. А. Исследования развития трещины при высокотемпературном однократном и малоцикловом нагружении // Завод. лаб.– 1978.– N 1.– С. 85–91.
15. Шульженко Н. Г., Овчарова Г. Б. Колебания многоопорного ротора с поперечной трещиной // Тр. межд. конф. “Динамика роторных систем”.– Хмельницкий: Технол. Ун-т Подолья, 1996.– С. 75–76.
16. Матвеев В. В. К анализу эффективности метода спектральной вибродиагностики усталостного повреждения элементов конструкций. Сообщение 2. Изгибные колебания, аналитическое решение // Пробл. прочн.– 1997.– N 6.– С. 67–81.
17. Андронов А. А., Витт А. А., Хайкин С. Э. Теория колебаний.– М: Физматгиз, 1959.– 690 с.
18. Писаренко Г. С., Яковлев А. П., Матвеев В. В. Вибропоглощающие свойства конструкционных материалов.– К.: Наук. думка, 1971.– 376 с.
19. Gelman L. M., Burau Y. V., Krytsyn V. I. Automatic adaptive method for testing data processing for nondestructive testing in civil engineering // Proc. of Int. Symp. of Nondestructive Testing in Civil Engineering.– Berlin, Germany, 1995.– P. 378–384.
20. Гельман Л. М. Адаптивный последовательный анализ с переменными порогами // Радиотехника.– 1983.– 38, N 9.– С. 30–33.
21. Отчет по ОКР “Разработка и изготовление аппаратурного комплекса для диагностики роторных деталей авиационных двигателей” (Рук. темы Гельман Л. М.).– К.: НПО “Славутич”, 1995.– 291 с.