

534.08+620.19

## АДАПТАЦИЯ В ВИБРОАКУСТИЧЕСКОМ МЕТОДЕ СВОБОДНЫХ КОЛЕБАНИЙ

Л. М. ГЕЛЬМАН\*, С. В. ГОРПИНИЧ\*, В. Т. ШИРКОВ\*\*

\*Национальный технический университет Украины “КПИ”, Киев,

\*\*ОАО “Мотор-Січ”, Запорожье

Получено 28.02.2000 ◊ Пересмотрено 23.08.2000

Впервые предложена и исследована адаптация виброакустического метода свободных колебаний для диагностики усталостных трещин в зависимости от измеримого мешающего параметра – собственной частоты объектов диагностики. Адаптация заключается в изменении параметров и структуры метода в зависимости от оценок собственной частоты объектов диагностики и основана на использовании адаптивного отношения правдоподобия. Исследована целесообразность адаптации диагностических признаков на основе высших гармоник свободных колебаний, признака на основе фазовых характеристик высших гармоник свободных колебаний, декремента затухания свободных колебаний. Показано, что для спектральных признаков, так же как и для декремента затухания, в случае частотно-зависимого внешнего трения в системе адаптация в зависимости от собственной частоты нецелесообразна. В случаях частотно-независимого трения и частотно-зависимого внутреннего трения в системе адаптация декремента в зависимости от собственной частоты целесообразна, а ее применение должно приводить к существенному увеличению суммарной вероятности правильной диагностики.

Вперше запропонована та досліджена адаптація віброакустичного методу вільних коливань для діагностики утомних тріщин в залежності від вимірюваного заважаючого параметра – власної частоти об'єктів діагностики. Адаптація полягає у зміні параметрів та структури методів в залежності від оцінок власної частоти об'єктів діагностики та базується на використанні адаптивного відношення правдоподібності. Досліджена доцільність адаптації діагностичних ознак на основі вищих гармонік вільних коливань, ознаки на основі фазових характеристик вищих гармонік вільних коливань, декремента затухання вільних коливань. Показано, що для спектральних ознак, як і для декремента затухання у випадку частотно-залежного зовнішнього тертя в системі, адаптація в залежності від власної частоти об'єкта діагностики недоцільна. У випадках частотно-незалежного та частотно-залежного внутрішнього тертя в системі адаптація декремента в залежності від власної частоти об'єкта діагностики є доцільною, а її застосування має приводити до суттєвого збільшення сумарної ймовірності правильної діагностики.

For the first time adaptation in free oscillation method is considered for diagnostics of fatigue cracks depending on measurable interfering parameter: the natural frequency of testing object. Adaptation consists in variation of parameters and structure of method depending on estimates of natural frequency of free oscillations of testing objects and is based on use of adaptive likelihood ratio. The expediency of adaptation is investigated for features on base of higher harmonics of free oscillations, feature on base of phase characteristics of higher harmonics of free oscillations, decrement of damping of free oscillations. It is shown that for features on base of higher harmonics of free oscillations and for feature on base of phase characteristics of higher harmonics of free oscillations an adaptation depending on natural frequency is inexpedient, as well as for decrement of damping in case of frequency-dependent external friction in system. It is shown that in cases of frequency-independent friction and frequency-dependent internal friction in system an adaptation of decrement of damping of free oscillations depending on natural frequency of free oscillations is expedient and it essentially raises total probability of correct diagnostics.

### ВВЕДЕНИЕ

Для виброакустической диагностики усталостных трещин в рабочих элементах различных устройств широко используется метод свободных колебаний, который заключается в возбуждении свободных колебаний объектов диагностики и оценке параметров акустических и вибрационных сигналов, излучаемых при таких колебаниях.

Важным преимуществом метода является возможность его использования для обеспечения эксплуатации устройств не по назначенному ресурсу, а по техническому состоянию. Диагностика по состоянию экономически более выгодна по сравнению с планово-предупредительной диагностикой, поскольку требует проведения предупредительных работ не через запланированные промежутки времени, а в соответствии с фактическим техниче-

ским состоянием.

Диагностические признаки для диагностики усталостных трещин с помощью метода свободных колебаний формируются на основе использования данных о следующих вибро-акустических параметрах: отношениях амплитуд второй и первой гармоник свободных колебаний [1, 2], высших гармониках свободных колебаний [3–5], фазовых характеристиках высших гармоник свободных колебаний, декремента затухания свободных колебаний [6–9], собственной частоте свободных колебаний [3], изменениях в характере звукового излучения объекта.

В дальнейшем мы будем рассматривать следующие параметры.

1. *Высшие гармоники свободных колебаний.* Известно [1–5], что появление усталостных тре-

щин в объекте диагностики существенно изменяет спектральный состав свободных колебаний объекта. В спектре мощности появляются высшие гармонические составляющие, суммарная интенсивность которых растет с ростом размера трещины. Это обуславливает информативность высших гармоник и возможность формирования на их основе диагностических признаков как для неразрушающего контроля, так и для неразрушающего оценивания усталостных трещин в объекте диагностики.

2. *Фазовые характеристики высших гармоник свободных колебаний* объекта, достаточно хорошо удовлетворяющего нижеприведенной кусочно-линейной модели, близки нулю для широкого диапазона значений параметров объекта. С появлением и ростом усталостных трещин в объекте их значения, вообще говоря, становятся отличными от нуля, причем степень этого отличия для фаз определенной совокупности высших гармоник возрастает с ростом трещины. Это позволяет сформировать диагностический признак, пригодный для диагностики усталостных трещин.
3. *Декремент затухания свободных колебаний* достаточно давно используется для диагностики усталостных трещин. В подавляющем большинстве случаев декремент затухания свободных колебаний возрастает с появлением и ростом трещин в объекте диагностики, что обуславливает возможность формирования на его основе диагностического признака.

Существуют два принципиальных подхода в формировании и использовании диагностических признаков для идентификации состояния объектов:

- а) основанный на сравнении данных о параметрах тестируемого объекта с параметрами бездефектного объекта – эталона. Параметры эталона обычно получают в результате обучения диагностической системы по некоторой последовательности заведомо бездефектных объектов.
- б) основанный на контроле изменений виброакустических параметров тестируемого объекта в процессе эксплуатации.

В данной работе исследуется первый подход.

Обычно диагностика с помощью метода свободных колебаний осуществляется в условиях изменения мешающих параметров объектов диагностики. Мешающими или неинформативными далее будем называть параметры объектов диагностики, влияющие на результат диагностики, значения которых меняются некоторым случайным образом в процессе диагностики (от объекта к объекту). Для сохранения оптимальных свойств метода в таких условиях необходим адаптивный подход [10, 11], который предполагает учет в каждом акте диагностики (каждом измерении диагностических признаков) основных для данного метода мешающих параметров и модификацию правила принятия решения о состоянии объекта в соответствии с полученной информацией.

Адаптивный подход применительно к методу свободных колебаний исследован недостаточно. В настоящей работе, восполняющей отмеченный пробел, предложена и исследована адаптация метода свободных колебаний.

В разделе 1 описаны экспериментальные предпосылки использования адаптивного подхода в методе свободных колебаний. В разделе 2 описаны используемые математические модели дефекта и объекта диагностики, диагностические признаки метода свободных колебаний, а также мешающие параметры метода. В разделе 3 исследована возможность адаптации спектральных признаков. В разделе 4 исследована адаптация декремента затухания свободных колебаний.

## 1. ЭКСПЕРИМЕНТАЛЬНЫЕ ПРЕДПОСЫЛКИ ИСПОЛЬЗОВАНИЯ АДАПТИВНОГО ПОДХОДА

Необходимость исследования адаптивного подхода для метода свободных колебаний порождается экспериментальными исследованиями и практикой диагностики посредством данного метода. Так, часто в качестве диагностического признака метода свободных колебаний при диагностике усталостных трещин используется изменение декремента затухания свободных колебаний объектов диагностики, величина которого существенна при появлении и развитии трещин в объекте. Поскольку декремент затухания является функцией частоты, изменение собственной частоты колебаний системы приводит к изменению декремента затухания, не связанному с появлением дефекта. На практике часто используются типы объектов диагностики, для собственной частоты которых допустим разброс в пределах  $10 \div 20\%$  и более. Такой широкий разброс порождает значительные от-

клонения в значениях декремента затухания, что, очевидно, ухудшает качество диагностики. Аналогичная ситуация имеет место и для других признаков. Собственная частота в этом случае выступает “мешающим” параметром, разброс значений которого от объекта к объекту затрудняет диагностику.

Такие экспериментальные факты указывают на необходимость поиска эффективной схемы диагностики, уменьшающей влияние мешающих параметров на результат диагностики. В качестве такой схемы мы исследуем далее адаптивный подход.

## 2. МАТЕМАТИЧЕСКИЕ МОДЕЛИ ДЕФЕКТА И ОБЪЕКТА ДИАГНОСТИКИ, ХАРАКТЕРИСТИКИ ДИАГНОСТИЧЕСКИХ ПРИЗНАКОВ И ОБОСНОВАНИЕ МЕТОДОВ ДИАГНОСТИКИ

В литературе используются различные подходы к моделированию усталостных трещин. Так, авторы работы [12] выделяют два основных подхода – так называемые модели “открытых” и “дышащих” трещин. Модель “открытой” трещины, согласно которой трещина остается неизменно открытой вне зависимости от вида деформации в объекте, достаточно широко использовалась до недавнего времени, однако сейчас признаны более адекватными модели “дышащих” трещин, в которых учитывается возможность закрытия трещины при деформации на сжатие. В данной работе рассмотрен простой случай “дышащей” трещины, мгновенно переходящей из открытого в закрытое состояние при смене знака деформации объекта [13]. При сжатии трещина “закрывается” [1], объект диагностики однороден и его жесткость  $c_c$  равна жесткости  $c$  объекта без трещины ( $c_c = c$ ). При растяжении трещина “раскрывается”, объект диагностики становится неоднородным и поэтому его жесткость  $c_s$  уменьшается на величину  $\Delta c$  ( $\Delta c = c - c_s$ ). Такая модель описывает трещину с абсолютно гладкими поверхностями и не учитывает возможность неполного закрытия трещины [12].

Процесс раскрытия–закрытия трещины при смене знака деформации приводит к изменению жесткости объекта, что, в свою очередь, является одной из причин различия затухания в системе при растяжении и сжатии [6–9]. При сжатии показатель затухания  $h_2$  равен показателю затухания  $h$  объекта без трещины, при растяжении показатель затухания  $h_1$  в общем случае отличен от  $h_2$ .

Динамическое поведение объекта диагностики

при свободных колебаниях с собственной частотой  $\omega_0$  может быть промоделировано [1] системой с одной степенью свободы и линейной зависимостью между деформацией и восстанавливающей силой.

Свободные колебания модели с трещиной описываются следующей системой дифференциальных уравнений [3]:

$$\begin{cases} \ddot{x} + 2h_1\dot{x} + \left( h_1^2 + \frac{\left(1 + \sqrt{1 - \frac{\Delta c}{c}}\right)^2}{4} \omega_0^2 \right) x = 0, \\ x \geq 0, \\ \ddot{x} + 2h_2\dot{x} + \left( h_1^2 + \frac{\left(1 + \sqrt{1 - \frac{\Delta c}{c}}\right)^2}{4 \left(1 - \frac{\Delta c}{c}\right)} \omega_0^2 \right) x = 0, \\ x < 0. \end{cases} \quad (1)$$

Зависимость между относительным изменением жесткости  $\Delta c/c$  и относительным размером трещины  $\gamma = \Delta l/l$  ( $\Delta l$  – линейный размер трещины,  $l$  – линейный размер объекта диагностики в направлении трещины) для рассматриваемой модели может быть записана в виде [5]

$$\frac{\Delta c}{c} = \frac{H(\gamma)}{H(\gamma) + 1.15}, \quad (2)$$

где

$$H(\gamma) = 9.60\gamma^{10} - 40.69\gamma^9 + 47.04\gamma^8 - 32.99\gamma^7 + 20.30\gamma^6 - 9.98\gamma^5 + 4.60\gamma^4 - 1.05\gamma^3 + 0.63\gamma^2.$$

Выражение (2) справедливо для трещин, удовлетворительно описываемых используемой моделью.

Для исследования адаптации диагностических признаков метода свободных колебаний необходимо вначале определить перечень измеримых мешающих параметров объекта диагностики, от которых зависят признаки. Затем необходимо исследовать изменение диагностического признака при неизменности измеримого мешающего параметра и, наконец, исследовать адаптивный подход, заключающийся в изменении параметров и структуры методов диагностики в зависимости от найденных мешающих параметров. Определим параметры объекта диагностики, от которых зависят диагностические признаки метода свободных колебаний.

Конечное (текущее) преобразование Фурье си-

стемы (1) описывается выражением [4]

$$S(\omega) = v_0 \times \left[ \frac{1 + \frac{\exp(-(h_1 + j\omega)T_1)}{2}}{(h_1 + j\omega)^2 + \left(\frac{\left(1 + \sqrt{1 - \frac{\Delta c}{c}}\right)^2}{2}\right)^2} - \frac{\exp(-(d + j\omega T)) + \frac{\exp(-(h_1 + j\omega)T_1)}{2}}{(h_2 + j\omega)^2 + \left(\frac{\left(1 + \sqrt{1 - \frac{\Delta c}{c}}\right)^2}{2\sqrt{1 - \frac{\Delta c}{c}}}\right)^2} \right] \times \frac{1 - \exp(-n(d + j\omega T))}{1 - \exp(-(d + j\omega T))}, \quad (3)$$

где  $v_0$  – скорость начального возбуждения колебаний в системе (скорость ударного воздействия);  $T = 2\pi/\omega_0$  – период свободных затухающих колебаний системы (1);  $T_1 = 4\pi/(1 + \sqrt{1 + \Delta c/c\omega_0})$ ;  $d$  – декремент затухания свободных колебаний.

Высшие гармоники свободных колебаний описываются выражением

$$Sp_k = \sqrt{\text{Re}^2 S(k\omega_0) + \text{Im}^2 S(k\omega_0)}, \quad (4)$$

где  $k = 2, 3, \dots$ . Здесь мы рассматриваем текущее преобразование Фурье, которое для процесса  $x(t)$  может быть представлено в виде

$$S_x(\omega) = \int_0^t x(t) \exp(-j\omega t) dt, \quad (5)$$

где  $t$  – время.

Выражение для декремента затухания свободных колебаний имеет вид [8, 9]

$$d = \frac{2\pi h_2}{\omega_0} \frac{1 - h^* + \left(1 - \frac{\Delta c}{c}\right)^{1/2}}{1 + \left(1 - \frac{\Delta c}{c}\right)^{1/2}}, \quad (6)$$

где  $h^* = (h_2 - h_1)/h_2$  – показатель несимметрии затухания.

Вектор диагностических признаков на основе фазовых характеристик высших гармоник свободных колебаний имеет вид

$$\vec{Y}(\gamma) = \{\Psi_2, \Psi_3, \dots, \Psi_N\}, \quad (7)$$

где

$$\Psi_k = \arctg \frac{\text{Im} S(k\omega_0)}{\text{Re} S(k\omega_0)};$$

$\Psi_k$  – фазовая характеристика  $k$ -ой гармоники;  $N$  – некоторая постоянная величина.

Воспользовавшись квадратом модуля вектора диагностических признаков (7) для понижения размерности данного вектора [14], вторичный диагностический признак на основе высших гармонических составляющих фазы преобразования Фурье свободных колебаний представим в виде

$$\Psi = \sum_k \Psi_k^2, \quad k = 2, 3, \dots \quad (8)$$

Как следует из выражений (2) – (8), диагностические признаки для метода свободных колебаний зависят от показателей затухания  $h_i$ , собственной частоты  $\omega_0$  и относительного размера трещины  $\gamma$ . Исследуем целесообразность адаптации метода свободных колебаний в зависимости от собственной частоты  $\omega_0$  для вышеуказанных признаков.

### 3. АДАПТАЦИЯ СПЕКТРАЛЬНЫХ ПРИЗНАКОВ

В данном разделе исследована адаптация диагностических признаков на основе преобразования Фурье (5).

#### 3.1. Спектральные признаки на основе высших гармоник свободных колебаний

Рассмотрим высшие гармоники (4) для метода свободных колебаний. Изменения первых десяти гармоник при росте размера трещины  $\gamma$  от нуля до некоторого значения ( $\gamma = 0.6$ ) для различных фиксированных значений частоты  $\omega_0$  в широком диапазоне значений  $\omega_0 \in (2\pi 10, 2\pi 10000)$  незначительны и составляют не более 0.12 %. Это позволяет сделать вывод о том, что при неизменности собственной частоты спектральные признаки (4) слабо зависят (практически не зависят) от размера трещины. При этом упомянутые признаки существенно зависят от собственной частоты  $\omega_0$ . Следовательно, для рассматриваемых условий адаптация в зависимости от собственной частоты

не повышает информативность диагностических признаков на основе высших гармоник (4). Использование адаптивного подхода в этом случае нецелесообразно.

### 3.2. Спектральный признак на основе фазовых характеристик высших гармоник свободных колебаний

Поведение признака (8) в зависимости от относительного размера трещины для различных фиксированных значений  $\omega_0$ :  $2\pi 100$ ,  $2\pi 1000$ ,  $2\pi 10000$ ,  $2\pi 15000$ , при  $k=2, \dots, 10$ , и  $h_i=0.05$  показано на рис. 1 (здесь и далее кривые для различных  $\omega_0$  совпадают с точностью до порядка  $p$ ). Видно, что признак (8) значительно изменяется с ростом размера трещины при фиксированной собственной частоте, но практически не изменяется при существенных изменениях собственной частоты. Это позволяет сделать важный вывод о “помехозащищенности” признака (8) относительно вариаций собственной частоты для объектов, соответствующих системе (1). При этом относительное изменение признака (8) с ростом относительного размера трещины от 0 до 0.6 составляет порядка 12 %, что в некоторых случаях даже превышает изменение для адаптированного декремента затухания, которое будет исследоваться ниже.

Поскольку возможный разброс значений собственной частоты бездефектных объектов диагностики практически не снижает эффективности использования признака на основе фазовых характеристик высших гармоник, дополнительная адаптация этого признака относительно собственной частоты нецелесообразна.

## 4. АДАПТАЦИЯ ДЕКРЕМЕНТА ЗАТУХАНИЯ СВОБОДНЫХ КОЛЕБАНИЙ

Отметим, что изменение декремента затухания с ростом размера трещины  $h$  с изменением собственной частоты существенно зависит от вида трения в системе [7–9, 15]. Поэтому далее исследуем адаптацию для систем с различным трением.

В случае частотно-независимого и частотно-зависимого (вязкого) трения в системе выражение

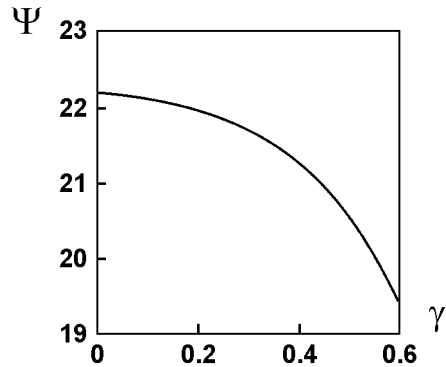


Рис. 1. Зависимость признака (8) от относительного размера трещины  $\gamma$  при фиксированной собственной частоте  $\omega_0$

для силы трения имеет вид [9, 15]

$$F = \begin{cases} - \left[ \left( \frac{\alpha_i}{\omega_s} + \beta_i \right) c_s + \left( \frac{\alpha_e}{\omega_s} + \beta_e \right) m \right] \dot{x} & \text{при } x \geq 0, \\ - \left[ \left( \frac{\alpha_i}{\omega_c} + \beta_i \right) c_c + \left( \frac{\alpha_e}{\omega_c} + \beta_e \right) m \right] \dot{x} & \text{при } x < 0, \end{cases} \quad (9)$$

где  $\alpha_i$ ,  $\alpha_e$  – коэффициенты соответственно внутреннего и внешнего частотно-независимого трения, не зависящие от жесткости материала объекта;  $\beta_i$ ,  $\beta_e$  – коэффициенты соответственно внутреннего и внешнего частотно-зависимого трения, не зависящие от жесткости материала объекта.

Из выражения (9) следует

$$h_1 = \frac{1}{2} \left[ \left( \frac{\alpha_i}{\omega_s} + \beta_i \right) \omega_s^2 + \frac{\alpha_e}{\omega_s} + \beta_e \right], \quad (10)$$

$$h_2 = \frac{1}{2} \left[ \left( \frac{\alpha_i}{\omega_c} + \beta_i \right) \omega_c^2 + \frac{\alpha_e}{\omega_c} + \beta_e \right],$$

$$h^* = 1 - \frac{\left( \frac{\alpha_i}{\omega_s} + \beta_i \right) \omega_s^2 + \frac{\alpha_e}{\omega_s} + \beta_e}{\left( \frac{\alpha_i}{\omega_c} + \beta_i \right) \omega_c^2 + \frac{\alpha_e}{\omega_c} + \beta_e}. \quad (11)$$

Используя зависимости (10), (11), рассмотрим далее различные случаи трения в системе для анализа адаптации декремента затухания.

#### 4.1. Частотно-зависимое внешнее трение

Показатель несимметрии затухания  $h^*$  равен нулю для любых размеров трещины. Выраже-

ние (6) с учетом (11) преобразуется к виду

$$d = 2\pi h_2 / \omega_0. \quad (12)$$

Этот случай аналогичен ситуации для признака на основе высших гармонических составляющих спектральной плотности мощности колебаний. Адаптация нецелесообразна, поскольку при неизменности частоты  $\omega_0$  признак (12) не зависит от размера трещины.

#### 4.2. Частотно-независимое внешнее трение

Показатель несимметрии затухания определяется выражением

$$h^* = 1 - \sqrt{\frac{1}{1 - \frac{\Delta c}{c}}},$$

и выражение (6) преобразуется к виду

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

Зависимость декремента (13) от относительного размера трещины представлена на рис. 2. Как следует из выражения (13), декремент существенно зависит от собственной частоты. Однако адаптация в этом случае целесообразна, так как при неизменности частоты  $\omega_0$  признак зависит от размера трещины (рис. 2) и его относительное изменение при росте относительного размера трещины от 0 до 0.6 составляет порядка 8 %.

#### 4.3. Частотно-зависимое внутреннее трение

В этом случае показатель несимметрии затухания равен  $h^* = \Delta c / c$ , и выражение (6) приобретает вид

$$d = \frac{2\pi h_2}{\omega_0} \left[ \frac{1 - \frac{\Delta c}{c} + \left(1 - \frac{\Delta c}{c}\right)^{1/2}}{1 + \left(1 - \frac{\Delta c}{c}\right)^{1/2}} \right]. \quad (14)$$

Изменение декремента (14) в зависимости от размера трещины  $\gamma$  показано на рис. 3. В этом случае декремент также существенно зависит от собственной частоты. Как и в предыдущем случае, адаптация целесообразна, так как при неизменности частоты  $\omega_0$  признак зависит от размера трещины (рис. 3) и его относительное изменение при росте относительного размера трещины от 0 до 0.6 составляет порядка 13 %.

#### 4.4. Частотно-независимое внутреннее трение

Показатель несимметрии затухания определяется выражением  $h^* = 1 - \sqrt{1 - \Delta c / c}$ , и формула (6) приобретает вид

$$d = \frac{2\pi h_2}{\omega_0} \left[ \frac{2 \left(1 - \frac{\Delta c}{c}\right)^{1/2}}{1 + \left(1 - \frac{\Delta c}{c}\right)^{1/2}} \right]. \quad (15)$$

Зависимость признака (15) от относительного размера трещины показана на рис. 4. Как и в предыдущих двух случаях, адаптация целесообразна, поскольку декремент существенно зависит как от собственной частоты (выражение (15)), так и от размера трещины, и его относительное изменение при росте относительного размера трещины от 0 до 0.6 составляет порядка 9 %.

#### 4.5. Оценки эффективности адаптации декремента затухания

Для исследования эффективности адаптации декремента затухания в зависимости от собственной частоты для случаев 4.2–4.4 проведен модельный эксперимент по диагностике со следующими двумя классами объектов:

- класс  $S_0$  – бездефектные объекты, относительный размер трещины  $\gamma$  равен 0;
- класс  $S_1$  – дефектные объекты, относительный размер трещины  $\gamma$  подчиняется равномерной плотности вероятности в диапазоне  $(0 \div 0.6)$ .

Адаптивный метод принятия решения о состоянии объекта диагностики в этом случае состоит [10, 11] в измерении собственной частоты  $\omega_0$  и формировании адаптивного отношения правдоподобия, которое зависит от оценки  $\hat{\omega}_0$  и признака  $d$ :

$$L = \frac{W(d/\hat{\omega}_0, S_1)}{W(d/\hat{\omega}_0, S_0)}, \quad (16)$$

где  $W(d/\hat{\omega}_0, S_j)$  – распределение плотности вероятностей признака  $d$ , зависящее от состояния (класса)  $S_j$  объектов и оценки  $\hat{\omega}_0$ . Далее следует стандартная процедура сравнения отношения правдоподобия  $L$  с одним или несколькими порогом и принятия решения о принадлежности объекта диагностики к одному из классов [14]. В данном эксперименте оптимальность принятия решения достигается использованием критерия максимального правдоподобия, который минимизирует

суммарную ошибку диагностики при условии равных априорных вероятностей классов и коэффициентов матрицы потерь [14].

Предположим, что декремент и собственная частота объекта диагностики оцениваются без погрешностей. Тогда в силу монотонного характера зависимостей на рис. 2–4, при адаптации в зависимости от частоты  $\omega_0$  в условиях рассматриваемого модельного эксперимента оценка суммарной вероятности правильной диагностики равна единице для каждого из рассматриваемых видов трения, поскольку область значений признака (декремента) для объекта класса  $S_0$  не пересекается с областью значений признака для объекта класса  $S_1$ .

Предположим, что собственная частота бездефектных объектов диагностики равномерно распределена в диапазоне 1100–1200 Гц (такой разброс согласуется с данными для реальных объектов). Для класса  $S_1$  плотность распределения вероятностей декремента затухания определяется двумя случайными величинами – собственной частотой бездефектных объектов, равномерно распределенной в диапазоне 1100–1200 Гц, и относительным размером трещины, равномерно распределенным в диапазоне 0–0.6. Оценки плотностей распределения вероятностей декремента затухания в случаях 4.2–4.4 для классов  $S_0$  и  $S_1$ , полученные по методу гистограмм, представлены на рис. 5, а, б и в соответственно. В нашем случае эксперимент осуществлялся путем компьютерного моделирования в системе MATHCAD 8.0. Для оценок плотностей распределения вероятностей использовано 950 измерений признака для каждого класса.

Напомним, что при установлении принадлежности объекта контроля к классам  $S_0$  или  $S_1$  возможны два рода ошибок. Ошибка 1-го рода, называемая также ошибкой производителя, определяется как вероятность принятия решения о принадлежности объекта контроля к классу дефектных объектов в случае, когда на самом деле объект бездефектен. Ошибка 2-го рода, называемая также ошибкой потребителя, возникает в том случае, когда дефектный объект диагностируется как не содержащий дефектов.

Как следует из рис. 5, оценка вероятности ошибки 1-го рода равна нулю для всех рассматриваемых видов трения в системе. Оценки вероятности ошибки 2-го рода отличны от нуля. Их значения (для случая отсутствия адаптации) вместе со значениями суммарной вероятности правильной диагностики при адаптации представлены в таблице. Как показывают данные таблицы, оценка суммар-

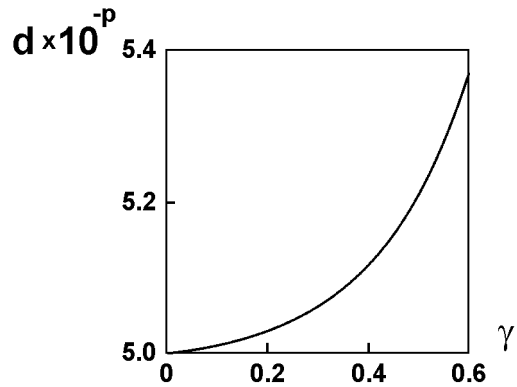


Рис. 2. Зависимость декремента (10) от относительного размера трещины  $\gamma$  ( $h_2=0.05$ ):

$$\begin{aligned} p=4 & \text{ при } \omega_0=2\pi 100, \\ p=5 & \text{ при } \omega_0=2\pi 1000, \\ p=6 & \text{ при } \omega_0=2\pi 10000 \end{aligned}$$

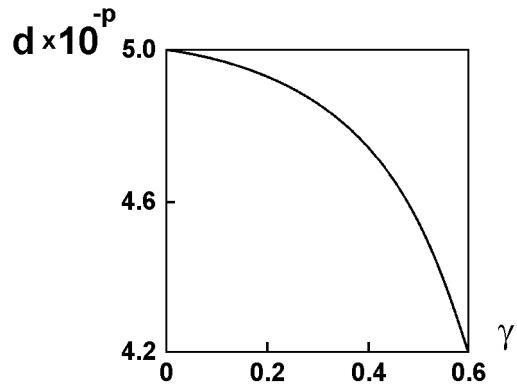


Рис. 3. Зависимость признака (11) от относительного размера трещины  $\gamma$  ( $h_2=0.05$ ):

$$\begin{aligned} p=4 & \text{ при } \omega_0=2\pi 100, \\ p=5 & \text{ при } \omega_0=2\pi 1000, \\ p=6 & \text{ при } \omega_0=2\pi 10000 \end{aligned}$$

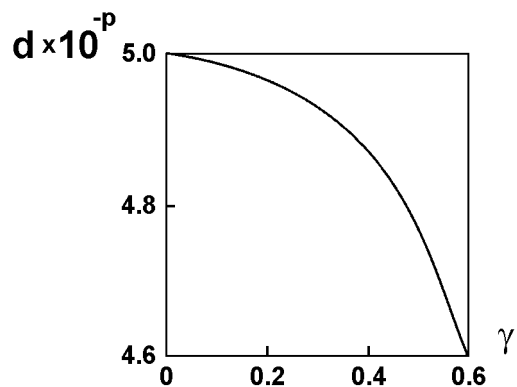
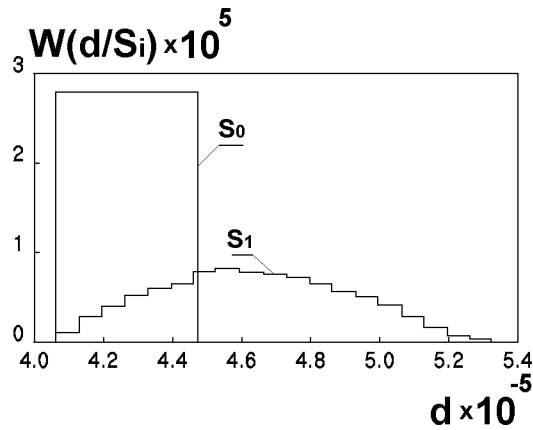
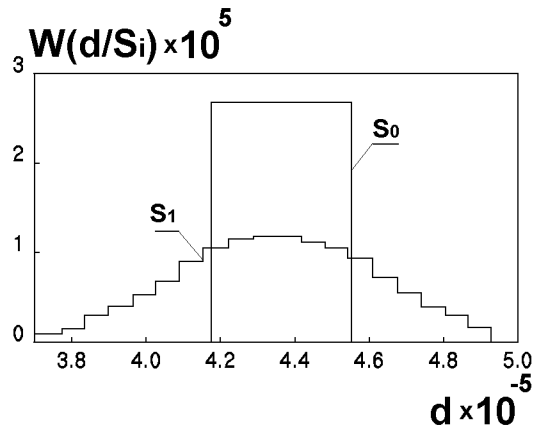


Рис. 4. Зависимость признака (12) от относительного размера трещины  $\gamma$  ( $h_2=0.05$ ):

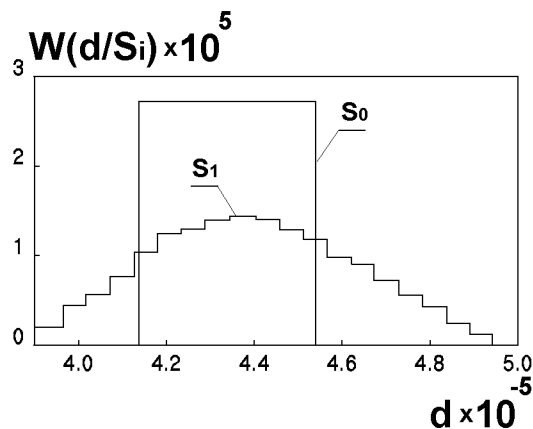
$$\begin{aligned} p=4 & \text{ при } \omega_0=2\pi 100, \\ p=5 & \text{ при } \omega_0=2\pi 1000, \\ p=6 & \text{ при } \omega_0=2\pi 10000 \end{aligned}$$



а



б



в

Рис. 5. Оценки плотностей распределения вероятностей для классов  $S_1$  и  $S_0$  ( $\omega_0 = 2\pi 1000$ ,  $h_2 = 0.05$ ):

а - частотно-независимое внешнее трение,  
 б - частотно-зависимое внутреннее трение,  
 в - частотно-независимое внутреннее трение

Таблица. Оценки вероятности ошибки 2-го рода и суммарной вероятности правильной диагностики

Тип трения	Оценка вероятности ошибки 2-го рода	Суммарная вероятность правильной диагностики
Частотно-независимое внешнее	0.21	0.845
Частотно-зависимое внутреннее	0.43	0.785
Частотно-независимое внутреннее	0.52	0.74

ной вероятности правильной диагностики, обеспечиваемая декрементом затухания, значительно возрастает (на  $0.155 \div 0.26$  для рассматриваемого эксперимента) в случае применения адаптивного подхода. Это указывает на эффективность применения адаптации в зависимости от собственной частоты при диагностике на основе декремента затухания для рассмотренных случаев трения в системе.

### ЗАКЛЮЧЕНИЕ

1. Впервые рассмотрена адаптация метода свободных колебаний для диагностики усталостных трещин в зависимости от измеримого мешающего параметра – собственной частоты объектов диагностики. Адаптация заключается в изменении параметров и структуры метода в зависимости от оценок собственной частоты объектов диагностики и основана на использовании адаптивного отношения правдоподобия.

2. Исследована целесообразность адаптации:

- диагностических признаков на основе высших гармонических составляющих преобразования Фурье свободных колебаний;
- диагностического признака на основе фазы высших гармонических составляющих преобразования Фурье свободных колебаний;



- декремента затухания свободных колебаний.

3. Для спектральных признаков показано, что:

- для признака на основе высших гармонических составляющих преобразования Фурье свободных колебаний адаптация в зависимости от собственной частоты является нецелесообразной вследствие слабой зависимости признака от относительного размера трещины при фиксации собственной частоты;
- для признака на основе фазы высших гармонических составляющих преобразования Фурье свободных колебаний адаптация в зависимости от собственной частоты является нецелесообразной, поскольку возможный разброс значений собственной частоты бездефектных объектов диагностики практически не снижает эффективность использования этого признака.

4. Для декремента затухания показано, что:

- в случае частотно-зависимого внешнего трения в системе адаптация в зависимости от собственной частоты нецелесообразна вследствие независимости признака от размера трещины при адаптации;
- в случаях частотно-независимого трения и частотно-зависимого внутреннего трения в системе адаптация в зависимости от собственной частоты целесообразна.

5. Для исследования эффективности адаптации в случаях частотно-независимого внешнего трения, а также частотно-зависимого и частотно-независимого внутреннего трения проведен модельный эксперимент по двухклассовой диагностике усталостных трещин, в котором показано существенное увеличение (на  $0.155 \div 0.26$  для данных эксперимента) оценки суммарной вероятности правильной диагностики при адаптации.

## БЛАГОДАРНОСТИ

Авторы выражают глубокую благодарность академику НАН Украины профессору В. Т. Гринчен-

ко за постоянное внимание к нашим исследованиям и ценные замечания, высказанные им в ходе подготовки этой работы.

1. Карасев В. А., Ройтман А. Б. Доводка эксплуатируемых машин. Вибродиагностические методы. – М.: Машиностроение, 1975. – 411 с.
2. 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.
3. 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.
4. Gelman L. M., Gorpinich S. V., Kondratyuk L. V., Mayevskyy S. M., Shyrkov V. T. Non-linear forced oscillation vibroacoustical diagnosis method of cracks with nonstationary excitation // Proc. 3-rd Int. Conf. "Acoustical and Vibratory Surveillance Methods and Diagnostic Techniques". – CETIM: Senlis, France, 1998. – P. 509–519.
5. 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.
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. Gelman L. M., Gorpinich S. V. Nonlinear vibroacoustical free oscillation method for crack detection and evaluation // J. Acoust. Soc. Amer. – 1998. – 103, N 5, Pt. 2. – P. 2949.
8. Banas F. P., Gelman L. M., Gorpinich 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.
9. Гельман Л. М., Горпинич С. В. Виброакустический метод свободных колебаний для неразрушающего контроля трещин // Акуст. вісн. – 1999. – 2, N 4. – С. 13–22.
10. Гельман Л. М. Адаптивный последовательный анализ с переменными порогами // Радиотехника. – 1983. – 38, N 9. – С. 30–33.
11. 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.
12. Cheng S. M., Wu X. J., Wallace W., Swamidass A. S. J. Vibrational response of a beam with a breathing crack // J. Sound Vib. – 1999. – 225, N 1. – P. 201–208.
13. Коцаньда С. Усталостное разрушение металлов. – М.: Металлургия, 1976. – 456 с.
14. Патрик В. Основы теории распознавания образов. – М.: Сов. радио, 1980. – 720 с.
15. Василенко Н. В. Теория колебаний. – К.: Вища школа, 1992. – 580 с.