

УДК 629.7

А.В. КОСИЦЫН; И.И. КИСЛЫЙ, канд. техн. наук

Военная академия Республики Беларусь, г. Минск

П.Ю. БРАНЦЕВИЧ, канд. техн. наук

Белорусский государственный университет информатики и радиоэлектроники, г. Минск

## ЭКСПЕРИМЕНТАЛЬНОЕ ОПРЕДЕЛЕНИЕ ДЕФЕКТОВ В МАТЕРИАЛЕ УПРУГОГО ТЕЛА

*В данной статье предлагается использовать собственные формы колебаний в качестве диагностического признака для обнаружения дефектов в материале упругого тела. При осуществлении способа выбирают несколько собственных форм, определяют параметры наблюдения в различных точках эталонной и исследуемой деталей. Значения собственных форм колебаний находятся как отношения выбранных параметров к параметрам в базовой точке, а о возникновении дефекта судят по разности значений собственных форм в выбранных точках эталонной и исследуемой деталей.*

**Ключевые слова:** собственные формы колебаний, динамическая податливость, собственные частоты колебаний

Основными характеристиками собственных колебаний конструкций (модальными параметрами) являются собственные частоты колебаний, собственные формы колебаний и коэффициенты демпфирования. Собственные формы колебаний упругого тела определяются с точностью до постоянного множителя. При определении собственной формы колебаний можно условно принять, что значение этой формы (т.е. значение параметра наблюдения при колебаниях конструкции по заданной форме) в некоторой базовой точке  $B_i$  конструкции равно единице. Тогда значение собственной формы колебаний конструкции в любой другой точке  $B_j$  равно отношению значения параметра наблюдения в точке  $B_j$  при колебаниях конструкции по данной форме к значению параметра наблюдения в точке  $B_i$ .

Известен способ обнаружения дефектов в материале упругой конструкции, при котором возбуждают колебания эталонной и исследуемой конструкций, выбирают несколько форм колебаний, измеряют для этих форм резонансные частоты колебаний конструкций, а о возникновении дефекта судят по разности значений резонансных частот эталонной и исследуемой конструкций [1].

Недостатком данного способа является то, что резонансная частота колебаний является интегральной характеристикой упругой конструкции, т.е. характеризует конструкцию в целом, а не отдельные ее точки, и по изменению резонансной частоты можно судить о возникновении дефекта, но невозможно определить место его возникновения. Кроме того, с развитием дефекта резонансная частота изменяется медленно. Все это ведет к низкой надежности обнаружения дефекта в материале упругой конструкции.

Также известен способ обнаружения дефектов в материале упругой конструкции, при котором возбуждают колебания эталонной и исследуемой конструкций, выбирают несколько собственных форм колебаний, на выбранных формах колебаний

определяют один из параметров наблюдения для эталонной и исследуемой конструкции в точке наблюдения. В качестве диагностического признака используют эквивалентные массы [2, 3].

Согласно этому способу, измеряют коэффициенты внутреннего трения, действительную часть динамической податливости на частотах возбуждения, статическую податливость и определяют эквивалентные массы.

К недостаткам способа можно отнести то, что для определения эквивалентных масс необходимо измерение динамической податливости конструкции. Процедура таких измерений включает в себя определение не только величины изменения параметра наблюдения (амплитуды виброперемещения, виброскорости, виброускорения, вибронапряжения), но и величины возбуждающего воздействия, что часто является невозможным по различным причинам, в частности по причине недоступности необходимых мест для установки датчиков.

Кроме того, данный способ требует применения сложного математического аппарата для определения эквивалентных масс и характеризуется высокой трудоемкостью практической реализации. Для его осуществления нужны высококвалифицированные специалисты и специальная многоканальная виброизмерительная аппаратура.

Целью рассматриваемых исследований является отработка методических основ практически-ориентированных методик технической диагностики объектов исследования в режиме экспресс-анализа.

В данной статье решается задача использования при обнаружении дефектов в материале упругого тела в качестве диагностического признака параметра, для вычисления которого не требуется измерения динамической податливости детали, а следовательно, и величины возбуждающего воздействия.

Рассмотрим собственные формы колебаний жестко закрепленного эталонного образца (рису-

нок 1). При этом область образца, совершающая колебания (рабочая часть), представляла собой прямоугольный брус размером 240 × 40 × 2,9 мм. По длине на одинаковых расстояниях размещались три пьезоэлектрических акселерометра типа 4344 фирмы Briel & Kjaer массой 2,7 гр.

Контрольный датчик служит для управления вибростендом. Образец выполнен из алюминиевого сплава, модуль Юнга  $E = 6,9 \cdot 10^{10}$  Па, плотность  $\rho = 2700$  кг/м<sup>3</sup>, коэффициент Пуассона  $\mu = 0,33$ .

Вибрационное возбуждение в контрольной точке представляло собой полигармонический сигнал с равномерным спектром в частотном диапазоне 10—1000 Гц с шагом по частоте 2,5 Гц. Такое возбуждение является «щадящим» для объекта испытаний, т.к. исключает влияние негативных факторов резонанса по сравнению с резонансными методами возбуждения. На рисунке 2 представлены АЧХ в каждой точке наблюдения (месте установки датчика). Проанализированы первые три поперечные формы колебаний и определены амплитуды виброускорений в каждой точке.

Собственные частоты колебаний оказались равными  $\omega_1 = 34,2$  Гц,  $\omega_2 = 218,4$  Гц,  $\omega_3 = 651,1$  Гц.

На основе полученных результатов вычислены все возможные отношения

$$\bar{X}_k(B_{ji}) = \frac{X_k(B_j)}{X_k(B_i)}, (i, j = 1, 2, 3)$$

измеренных параметров в выбранных точках наблюдения по исследуемым формам колебаний  $k$ . Затем были измерены значения образца с запилom глубиной 1 мм (рисунок 3), на середине рабочей части. Изменение указанных отношений с возникновением дефекта в образце определялось по формуле:

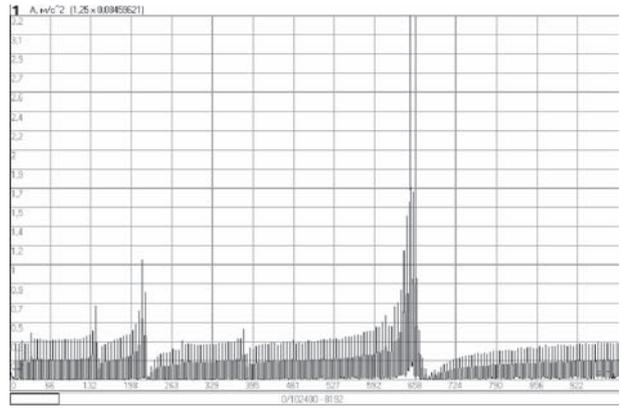
$$\Delta \bar{X}_k(B_{ji}) = \frac{\bar{X}_k(B_{ji}) - \bar{X}_k^*(B_{ji})}{\bar{X}_k(B_{ji})} \cdot 100\%,$$

где  $\bar{X}_k(B_{ji})$ ,  $\bar{X}_k^*(B_{ji})$  — амплитудные функции  $j$ -й и  $i$ -й точек наблюдения образца без дефекта и с дефектом соответственно,  $k = 1, 2, 3$ .

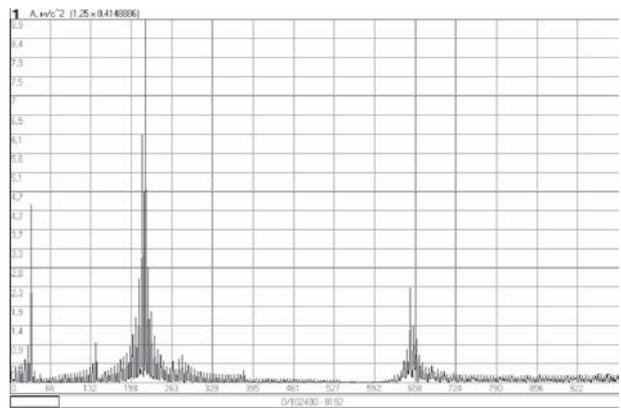
В таблице приведены максимальные изменения параметра  $\Delta \bar{X}_k(B_{ji})$  при сочетании наиболее информативных пар точек наблюдения  $B_j$  и  $B_i$ .



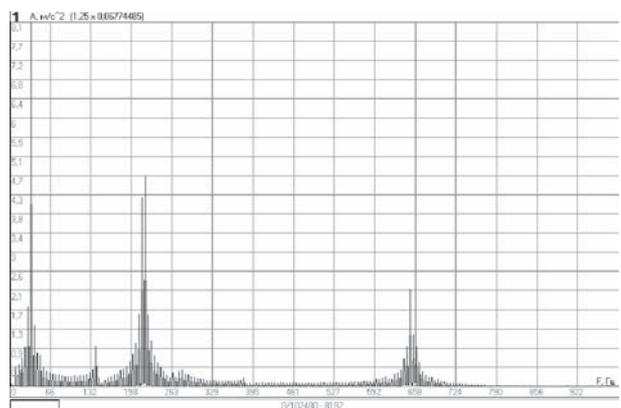
Рисунок 1 — Схема закрепления образца на вибростенде



а



б



в

Рисунок 2 — АЧХ образца в различных точках: а — 1-й датчик; б — 2-й датчик; в — 3-й датчик

При наличии дефекта в образце собственная частота колебаний изменяется не существенно (не более 2,1 %), в то время как изменение амплитудной функции  $\Delta \bar{X}_k(B_{ji})$  достигает в некоторых точках более 115 %.

Изменение собственной частоты колебаний рассчитывалось также по отношению к собственной частоте исходного образца

$$\Delta \omega_k = \frac{\omega_k - \omega_k^*}{\omega_k} \cdot 100\%,$$

где  $\omega_k$  — собственная частота колебаний образца без дефекта;  $\omega_k^*$  — собственная частота колебаний образца с дефектом.

Таблица — Максимальные изменения параметров  $\Delta\bar{X}_k(B_{ji})$  и  $\Delta\omega_k$ 

Параметры		Изменение, %		
		1-я форма	2-я форма	3-я форма
Изменение собственной частоты колебаний $\Delta\omega_k$		1,17	2,06	1,55
$\Delta\bar{X}_k(B_{ji})$	по СКЗ ускорений	$B_2/B_1$	$B_1/B_3$	$B_1/B_3$
		47,16	9,23	115,68

Из таблицы видно, что для исследуемого образца наиболее эффективно дефект обнаруживается по первой и третьей форме колебаний. Если принять за критерий обнаружения дефекта изменение диагностического признака не менее чем на 15 %, то дефект можно считать обнаруженным. Максимальные значения в области узловых линий объясняются тем, что в этих точках амплитуды колебаний равны нулю (абсолютно жесткая конструкция). При возникновении дефекта узловые линии смещаются по конструкции и амплитуды в этих точках принимают некоторые конечные значения (жесткость сильно уменьшается). Аналитические выкладки, объясняющие опытные данные, изложены в публикациях [3, 4]. В работах [4, 5] приведены численные эксперименты по диагностике поврежденности упругих тел с различными повреждениями.

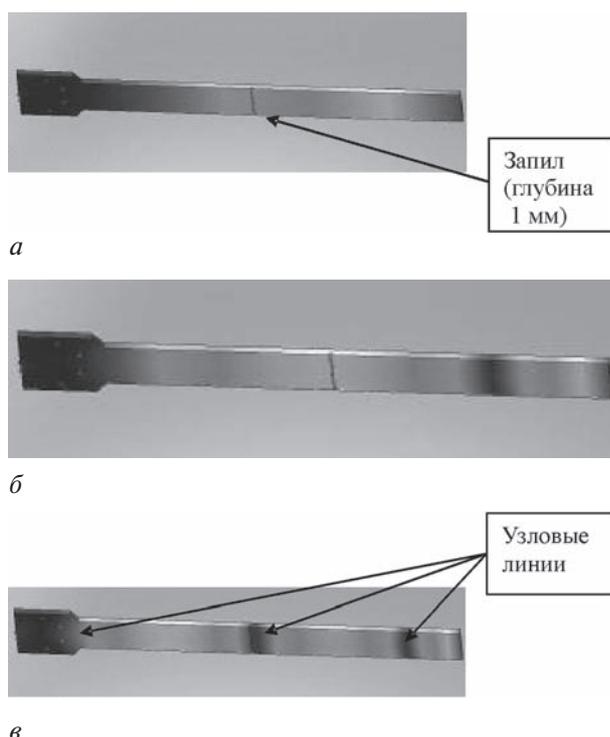


Рисунок 3 — Модель образца с дефектом: (а), (б), (в) — 1, 2, 3 формы собственных колебаний соответственно

Стоит отметить две характерные особенности метода, от которых зависит его эффективность:

- 1) одна из точек наблюдения должна лежать вблизи узловой линии формы колебаний детали или вблизи дефекта;
- 2) величина изменения амплитудных функций  $\Delta\bar{X}_k(B_{ji})$  зависит от выбора точки приведения, по отношению к которой определяются все остальные точки.

**Заключение.** По результатам экспериментальных исследований изменений собственных частот и форм собственных колебаний упругого тела при возникновении дефекта можно предположить:

- собственные формы колебаний являются наиболее информативным модальным параметром, так как с возникновением дефекта они изменяются значительно быстрее, чем собственные частоты колебаний;
- предложенный метод вибродиагностики позволит фиксировать не только факт появления дефекта, но также его местонахождение.

С учетом имеющегося в наличии виброизмерительного оборудования и ограниченным количеством датчиков можно определять различные параметры наблюдения, а наиболее информативные точки выбирать численно, с использованием вычислительных комплексов [4].

#### Список литературы

1. Методы акустического контроля металлов / Н.П. Алешин [и др.] // М.: Машиностроение, 1989. — 455 с.
2. Способ обнаружения дефектов в материале упругой конструкции: пат. 2190207 Россия, 7G 01 № 19/08, 29/00 / А.Л. Михайлов, В.Н. Вернигор // Изобретения. Полезные модели: офиц. бюл. Рос. агентства по патентам и товарным знакам. — 2002. — № 27, Ч. 2. — С. 319.
3. Косицын, А.В. Вибродиагностика лопаток турбомашин методом эквивалентных масс / А.В. Косицын, И.И. Кислый // Механика машин, механизмов и материалов. — 2011. — № 1(14). — С. 47–50.
4. Косицын, А.В. Диагностика возникновения усталостной трещины в лопатке газотурбинного двигателя / А.В. Косицын, И.И. Кислый, Ю.А. Грибков // Сб. науч. ст. Воен. акад. Респ. Беларусь. — 2011. — № 20. — С. 98–104.
5. Косицын, А.В. Вибродиагностика диска ротора ГТД на основе исследования собственных форм колебаний / А.В. Косицын, И.И. Кислый // MILEX: сб. тез. докл. Междунар. конф. — Минск, 2011. — С. 194–196.

Kasitsyn A.V., Kisly I.I., Brancevich P.D.

#### Experimental definition of defects in the material of the elastic body

In given article it is offered to use own forms of fluctuations as a diagnostic sign for detection of defects in a material of an elastic body. At realization of a way choose some own forms, define supervision parameters in various points of reference and investigated details. Values of own forms of fluctuations are as the relation of the chosen parameters to parameters in a base point, and defect occurrence judge on a difference of values of own forms in the chosen points of reference and investigated details.

Поступила в редакцию 04.07.2011.