

УДК 534.232

А.Ю. Бауков, А.Е. Родионова, М.Е. Родионова

ОЦЕНКА НАДЕЖНОСТИ ВИБРОАКУСТИЧЕСКОГО МЕТОДА В УСЛОВИЯХ КОНТРОЛЯ МНОГОСЛОЙНЫХ КОНСТРУКЦИЙ ПОДЗЕМНЫХ СООРУЖЕНИЙ

Представлены экспериментальные данные, полученные при исследованиях статистических характеристик колебаний многослойных строительных конструкций, а также результаты теоретических расчетов надежности выявления дефектов в таких конструкциях виброакустическим методом.

Ключевые слова: виброакустическая диагностика, железобетонные конструкции, подземные сооружения.

Семинар № 19

Эффективная технология ремонта многослойных железобетонных конструкций подземных сооружений должна выполняться на основе оптимизированной виброакустической диагностики внутренних нарушений сплошности в них [1].

При технической реализации данного метода производят спектральный анализ виброакустического отклика исследуемого объекта на ударное воздействие. Причем вследствие значительной неоднородности как самих упругих покрытий, так и основания для увеличения надежности выявления спектральных выбросов в местах расположения дефектов основания, связанных с изгибными колебаниями покрытия над дефектом, а также в связи с возможной различной формой и размерами дефекта, используется статистический метод обработки полученной спектральной информации, связанный с осреднением спектра виброакустических импульсов по ряду отдельных реализаций.

Практическая реализация ударного виброакустического метода (ВАМ) в общем случае заключается в периодическом возбуждении ударных им-

пульсов в покрытии, их приеме с помощью вибродатчика, усилии, параллельном спектральном анализе виброотклика плиты, усреднении каждой спектральной составляющей и сравнении средних амплитуд спектральной плотности в каждой полосе анализа с аналогичными величинами, полученными на бездефектном участке объекта.

Для проведения виброакустического контроля состояния железобетонных конструкций подземных сооружений городского строительства в ЗАО «Триада-Холдинг» была разработана компьютеризированная цифровая виброакустическая аппаратура «Vibroset».

В состав аппаратуры входит малогабаритный автономный переносной измерительный прибор, позволяющий регистрировать виброакустические импульсы, переводить их с помощью встроенного аналого-цифрового преобразователя в цифровой вид, а также, используя процедуру быстрого преобразования Фурье, вычислять их амплитудный спектр. При проведении измерений на встроенный дисплей прибора выводится упрощенный вид



Рис. 1. Внешний вид цифровой аппаратуры виброакустического контроля «Vibroset»

амплитудного спектра и осциллограмма импульса. В комплект аппаратуры «Vibroset» также входит пьезоэлектрический акселерометр в защитном корпусе. Собственная частота датчика – 20 кГц. Внешний вид прибора представлен на рис. 1.

Для повышения надежности выявления дефектов в многослойных железобетонных конструкциях с помощью виброакустического метода в разработанной аппаратуре «Vibroset» предусмотрен режим обработки виброакустических импульсов с использованием принципа накопления и оценки среднего статистического значения спектральной плотности регистрируемого сигнала в пределах каждой частотной полосы его спектра в диапазоне возможных резонансов изгибных колебаний отслоения, которое слабо зависит от изменения свойств объекта и условий возбуждения и приема колебаний.

Одним из основных вопросов в проблеме надежного определения дефекта с помощью виброакустиче-

ского метода является вопрос о выборе критерия для амплитуды регистрируемого спектра. Данная проблема заключается в том, что при выборе недостаточного значения отклонения уровня каждой спектральной составляющей измеряемого сигнала относительно граничного уровня, полученного на бездефектном участке объекта, возможны ситуации получения необоснованного вывода о наличии дефекта в какой-либо точке измерительного профиля, то есть получения так называемой «ложной тревоги». С другой стороны, при необоснованном завышении уровня критерия отбраковки возможна противоположная ситуация пропуска дефекта, так называемый «пропуск цели».

Вследствие этого критерий отбраковки должен выбираться оптимальным образом, когда имеет место получение максимума вероятности выявления дефекта при заданной весьма малой вероятности ложной тревоги [2]. На основании этого была проведена оценка степени надежности выявления дефектов многослойных конструкций ВАМ методом с использованием теории статистической проверки гипотез, когда в качестве нулевой гипотезы H_0 принимался случай отсутствия дефекта. В качестве альтернативной гипотезы H_1 принимается ситуация наличия дефекта, т.е. когда амплитуда спектра A_d обусловлена главным образом изгибными колебаниями отслоения.

Для возможности использования данной теории в конкретном случае предварительно было необходимо оценить в натурных условиях статистические характеристики амплитуд спектральных выбросов A_{Si} на различных частотах, а также степень приближения их распределения к нормальному.

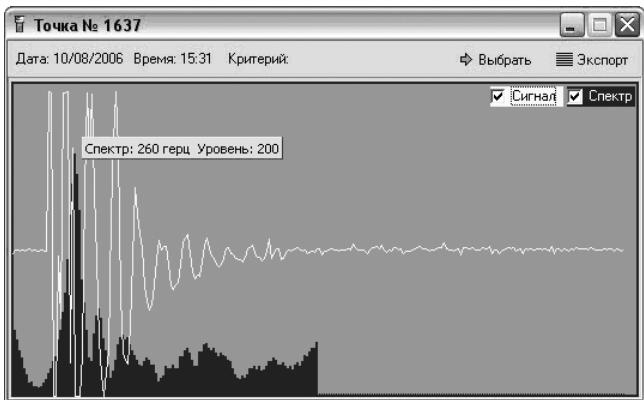


Рис. 2. Осциллограмма и спектограмма виброакустического импульса

С этой целью были выполнены серии виброакустических измерений на реальных производственных объектах. Измерения осциллограмм и спектrogramм виброакустических импульсов в процессе данного эксперимента выполнялись с использованием указанной виброакустической аппаратуры «Vibroset». Методика проведения измерений на каждом экспериментальном участке заключалась в следующих операциях. Предположительно в центре дефектного участка располагался приемник изгибных колебаний плиты над заранее выявленном расслоением. В качестве приемника применялся виброакустический зонд из комплекта используемой измерительной аппаратуры, выполненный на основе пьезоакселерометра. Точки возбуждения изгибных колебаний в исследуемом объекте располагались на расстояниях $l_1 = 0,5$ м и $l_2 = 1,0$ м от точки приема.

В каждой из точек возбуждения выполнялось по 10 – 60 одинаковых ударов возбуждающим устройством с целью проверки степени идентичности получаемых виброакустических откликов объекта на ударное воздействие. В качестве возбуждающего

устройства использовались молотки с различной массой и радиусом кривизны контактной поверхности. Пример экспериментально полученных спектrogramм представлен на рис. 2.

Далее проводилась статистическая обработка таких спектrogramм. Статистическая обработка выполнялась по массиву из 60 реализаций виброоткликов согласно стандартной методике с использованием пакета программ «Статистика». Результаты такой обработки представлены в табл. 1.

Анализ идентичности спектrogramм в пределах каждой серии однотипных измерений показал хорошую степень повторяемости эксперимента, а также достаточное приближение распределения случайных амплитуд спектральных выбросов к нормальному распределению.

В связи с этим предполагаем, что случайные величины $A_{БД}$ и A_d , имеющие статистические характеристики

$$A_{БД} \rightarrow \begin{cases} A_{БД} = \alpha_0 \\ \sigma_{БД} = \sigma \end{cases}, \quad A_d \rightarrow \begin{cases} A_d = \alpha_1 \\ \sigma_d = \sigma \end{cases}, \quad (1)$$

характеризуются гауссовым распределением плотности вероятности

$$P(x) = (2\pi\sigma^2)^{-1/2} \exp\left[-(x - \bar{x})^2 / (2\sigma^2)\right],$$

где $\sigma^2 = (x - \bar{x})^2$.

Функция их совместного распределения плотности вероятности следующая:

$$P(x) = (2\pi\sigma^2)^{-n/2} \exp\left[-\sum_{i=1}^n (x_i - \alpha_k)^2 / (2\sigma^2)\right],$$

где $k = 0,1$ (2)

Таблица 1
**Результаты статистической обработки спектрограмм
 виброакустических импульсов**

Характеристика	Амплитуда спектрального выброса на различных частотах			
	100	200	400	800
Частота, Гц				
Число измерений, n		60	реализаций	
Среднее значение амплитуды, у.е.	93,33	125,8	28,41	181,57
Дисперсия σ^2	89,16	2142,7	91,01	4883,2
Уровень значимости α		0,05		
Число степеней свободы, k		9		
Критическая точка распределения $\chi^2_{\text{кр}}$		16,9		
Критерий χ^2	13,63	5,8	6,48	6,67
Оценка нормальности распределения	распределение близко к нормальному			

В связи с тем, что в данном случае неизвестны априорные вероятности наличия отслоения и цепы, применяется критерий Неймана-Пирсона, когда задается вероятность ложной тревоги (ошибки первого рода) Q_0 и на основании этого определяется коэффициент правдоподобия

$$\Lambda(x) = P_1(x)/P_2(x), \quad (3)$$

где $P_i(x)$ – плотности вероятности соответствующего i -го процесса.

Критерий $\Lambda(x)$ позволяет минимизировать возможную вероятность Q_1 ошибки второго рода (пропуск сигнала), что соответствует максимизации вероятности обнаружения отслоения при заданной вероятности ложной тревоги.

В связи с тем, что информативным параметром метода контроля является не сама случайная величина $x = A$, а ее среднее \bar{A} , коэффициент правдоподобия выбирается для статистики, равной среднему значению спектральной плотности виброакустического сигнала, т.е.

$$G = \bar{X} = \sum_{i=1}^n x_i n^{-1}, \quad (4)$$

где n – число виброакустических импульсов, составляющих выборку.

В этом случае коэффициент правдоподобия для данной величины x следующий:

$$\begin{aligned} \Lambda(x) &= P_1(x)/P_2(x) = \\ &= -\exp \left[\left(a_1 - a_0 \right) \sigma^{-2} \times \right. \\ &\quad \left. \times \sum_{i=1}^n x_i - n \left(a_1^2 - a_0^2 \right) \left(2\sigma^2 \right)^{-1} \right]. \end{aligned}$$

Пороговой величиной статистики является

$$\begin{aligned} G_0 &= M = (a_0 + a_1)/2 + \\ &+ \sigma^2 \ln \Lambda \cdot n^{-1} (a_1 - a_0)^{-1}. \end{aligned} \quad (5)$$

Так как выборочное среднее \bar{X} есть также гауссова величина с теми же средними значениями a_0 и a_1 при гипотезах соответственно H_0 и H_1 и дисперсией $\sigma^2 n^{-1}$, выражения для вероятности ошибок первого и второго рода имеют вид:

$$\begin{aligned} Q_0 &= \operatorname{erfc} \left[\left(M - a_0 \right) \left(\sigma / n^{1/2} \right)^{-1} \right]; \\ Q_1 &= 1 - \operatorname{erfc} \left[\left(M - a_0 \right) \left(\sigma / n^{1/2} \right)^{-1} \right], \end{aligned} \quad (6)$$

где $\operatorname{erfc} x$ – интеграл функции ошибок,

$$\operatorname{erfc} x = (2\pi)^{-1/2} \int_x^\infty \exp(-t^2/2) dt.$$

Гипотеза H_0 (отсутствие дефекта) выбирается, когда $\bar{X} < M$; гипотеза

Таблица 2
Результаты расчета порога срабатывания M

№	f_0	Характеристики распределения спектральной плотности			M	$\Delta M = \frac{M - a_0}{a_0} \cdot 100\%$
		a_0	σ_i	n		
1	100	93,33	39,16	5	125,19	34,18
2	200	125,80	46,29	5	163,50	29,97
3	400	28,41	9,54	5	36,18	27,36
4	800	181,57	69,98	5	238,57	29,74

H_1 (наличие дефекта) выбирается, когда $\bar{X} > M$, так как a_1 всегда больше a_0 , с учетом физической основы метода.

Стратегия принятия решения в данном случае следующая. По заданной вероятности ошибки первого рода Q_0 и экспериментально полученных на бездефектном объекте значений величин a_0 и σ при известной величине выборки n по формуле (6), определяется «порог срабатывания» M – величина критерия отбраковки. В дальнейшем необходимо при обработке результатов контроля на исследуемом объекте с использованием программы «Vibrovision» уровень критерия отбраковки выбирать соответствующим величине M . Данное положение справедливо и при предварительной «оценочной» обработке экспериментальных спектрограмм или при использовании других программ. В каждом случае если соответствующее амплитудное значение спектральной плотности в определенном диапазоне частот превышает рассчитанный пороговый уровень M , то можно делать вывод о возможности наличия дефекта в пределах данной точки контроля.

В табл. 2 представлены результаты расчета величин «порога срабатывания» M для различных частотных составляющих спектра вибрационного импульса f_{0i} . Расчет произво-

дился на основании экспериментально полученных на объекте контроля средних значений величин a_{0i} и среднего квадратического отклонения σ_i для случайных величин амплитуды спектральных плотностей A_{Si} вибраимпульса в указанных частотных полосах согласно табл. 1. По заданным вероятностям ошибки первого рода $Q_0 = 10^{-2}$ определялись порог срабатывания M_i и относительная разность между M_i и величиной a_0 .

Из таблицы видно, что величина порога срабатывания при указанном объеме выборки превышает среднее значение амплитуды спектральной плотности приблизительно на 30%, тогда как обычно при проведении контроля вибраакустическим методом без статистической оценки порога срабатывания его величина выбирается эмпирически равной удвоенному среднему значению амплитуды сигнала на бездефектном объекте, что значительно увеличивает вероятность пропуска дефекта.

Результаты оценки величины «порога срабатывания» M , представленные в табл. 2, получены при значительном числе реализаций ударного возбуждения объекта исследований n . Такой уровень накопления сигнала возможен лишь при использовании специальной системы возбуждения объекта и может значительно повлиять на оперативность проведения

контроля. В реальности, когда контроль выполняется с использованием одиночных ударных импульсов, число таких импульсов n , при котором погрешность измерения «среднего» спектра в каждой частотной полосе $\bar{S}(\omega_i)$, обусловленная случайным характером возбуждения и приема, может быть определено, если известны статистические характеристики вибраакустического отклика объекта на ударное воздействие (табл. 1).

Так если распределение случайного спектра близко к нормальному, то минимальное число ударных импульсов n может быть определено из следующего соотношения:

$$\varepsilon = (a - \bar{x}) < t(P, k) \cdot s \cdot \sqrt{n}, \quad (7)$$

где ε – ошибка; $k = n - 1$; t – критерий Стьюдента; a – математическое ожидание; \bar{x} – среднее значение спектральной составляющей в каждой частотной полосе спектрального анализа; s – эмпирический стандарт

$$s = \sqrt{\frac{1}{n-1} \sum_{i=1}^n (x_i - \bar{x})^2};$$

P – доверительная вероятность (надежность оценки).

Оценка величины n для условий определения дефектов на реальном объекте при $P = 0,90$ (90%-ой надежности) и $\varepsilon \leq 0,3$ дает результат, равный пяти. Другими словами, для по-

лучения достаточной точности оценки истинного значения измеряемой величины a – спектральной составляющей вибраакустического импульса, в каждой точке контроля необходимо сделать по пять отдельных ударов возбуждения.

Результаты расчетов величины «порога срабатывания» M , выполненных для числа реализаций $n = 5$, представлены в табл. 2. Из данной таблицы видно, что требуемый в данном случае критерий отбраковки составляет в среднем до 30%, что вполне соответствует основным понятиям математической статистики.

Таким образом, при контроле многослойных объектов, если в процессе предварительной отбраковки полученных спектрограмм на некоторых участках исследуемого объекта выявляются места с возможными дефектами, в пределах этих участков необходимо провести детальные измерения. Такие детальные измерения необходимо проводить в режиме накопления с выполнением возбуждения объекта в каждой точке сетки контроля соответствующим ударными устройствами с минимальным числом ударов $n = 5$.

После получения дополнительной информации на данных участках, обработку спектрограмм повторяют с применением критерия отбраковки согласно результатам, представленным в табл. 2. **ГИАБ**

СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ

1. Бауков А.Ю. Практический опыт применения вибраакустического метода при неизрушающем контроле слоистых конструкций подземного городского строительства. // Городской информационно-аналитический бюллетень, МГГУ, 2004, №6.
2. Бензат Д.Ж., Пирсол А. Измерения и анализ случайных процессов. – М.: Мир, 1974.

Коротко об авторах

Бауков А.Ю. – ведущий инженер ЗАО «Триада-Холдинг», 8-499-192-02-53,
Родионова А.Е., Родионова М.Е. – студенты ФТ-факультета, Московский государственный горный университет, Moscow State Mining University, Russia, ud@msmu.ru