



# ОСОБЕННОСТИ ПРИМЕНЕНИЯ ПРЕОБРАЗОВАНИЯ ФУРЬЕ ДЛЯ ДИАГНОСТИКИ КОМПОЗИЦИОННЫХ МАТЕРИАЛОВ МЕТОДОМ СВОБОДНЫХ КОЛЕБАНИЙ

Ю. В. ВИТРУК, В. С. ЕРЕМЕНКО

*Рассмотрены вопросы повышения информативности неразрушающего контроля композиционных материалов методом свободных колебаний. Для расчета диагностических параметров предложено использовать спектр метрик, который позволяет учитывать не только амплитуды, но и фазы спектральных составляющих свободных колебаний. На основе экспериментальных данных показаны преимущества полученных диагностических параметров.*

*Observed questions of increase informations non-destructive testing composition materials of free vibration method. For estimate diagnostics parameters in these article produced use spectrum of metrics, which allows to include amplitudes and phases of spectral components of free vibration. Showed advantages these diagnostics parameters on experimental dates.*

Метод свободных колебаний (МСК) основан на возбуждении в зоне контроля изделия свободно затухающих упругих колебаний широкого диапазона частот и сравнении спектров принятых сигналов на дефектных и бездефектных (эталонных) участках. В настоящее время все существующие МСК-дефектоскопы регистрируют и анализируют амплитудный спектр возбуждаемого сигнала. Однако амплитуда не является надежным информативным параметром вследствие влияния случайных и неконтролируемых факторов (степени прижатия преобразователя к поверхности изделия, изнашивания контактной поверхности бойка, состояния поверхности объекта контроля). Поэтому для повышения достоверности контроля возникает задача нахождения дополнительных информативных признаков, чувствительных к дефектности изделия. Одним из этих признаков может быть фазовый спектр свободных колебаний, который в меньшей степени зависит от названных выше факторов.

Исследованиям фазовых спектров свободных колебаний при дефектоскопии композиционных материалов посвящены работы [1, 2], в которых на основе экспериментальных данных показано, что для отдельных типов дефектов фазочастотная характеристика более информативная, чем амплитудно-частотная. Но в этих работах фазовый и амплитудный спектры оценивали отдельно, а не как совместные комплексные информативные признаки. Это, в первую очередь, может привести к появлению погрешностей при расчетах фазы гармоник, которые имеют малую энергию и в значительной мере подвержены влиянию шумов в электрическом и акустическом трактах МСК-дефектоскопов.

Кроме того, при измерении фазового спектра надо учитывать погрешность от нестабильности

времени синхронизации (т. е. от случайного изменения момента времени выборки информативного сигнала), которая в некоторых случаях может быть довольно существенной, в особенности на высших гармониках анализа (рис. 1).

В работах [3, 4] теоретически доказано, что в общем случае для виброакустической диагностики амплитудный спектр не является оптимальным диагностическим признаком, поэтому предложено строить диагностическое пространство признаков на основе соответствующих действительной и мнимой компонент преобразования Фурье информативного сигнала, и с помощью критерия Фишера доказано, что использование данных признаков дает возможность существенно повысить достоверность диагностики. Так как приведенные работы носят обобщающий теоретический характер, авторами была поставлена задача подтвердить экспериментальными исследованиями данные теоретические результаты.

Рассмотрим возможность применения диагностических признаков, полученных на основе компонент квадратурного спектра (соответствующих действительной и мнимой части преобразования Фурье) свободных колебаний для дефектоскопии многослойных композиционных материалов. Преобразование Фурье отображает информативный

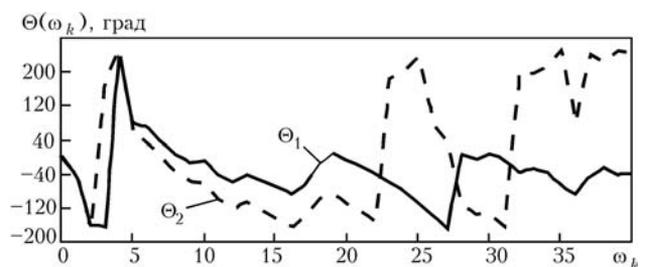


Рис. 1 Фазовый спектр свободных колебаний в дефектной зоне ( $\theta_1$ ) и спектр этого же сигнала, сдвинутого во времени ( $\theta_2$ )



сигнал, который представляет собой действительную функцию времени, в комплексную функцию частоты. Таким образом, квадратурный спектр нужно рассматривать как вектор в трехмерном пространстве, где каждой гармонике будут соответствовать три координаты  $S_R(\omega_k)$ ,  $S_J(\omega_k)$ ,  $\omega_k$ , где  $S_R$  — соответствующее действительное значение  $k$ -й гармоники;  $S_J$  — мнимое значение  $k$ -й гармоники;  $\omega_k$  — ее частота. Примеры таких спектров свободных колебаний, полученных в бездефектной и дефектной зоне сотовой панели толщиной 20 мм, приведены на рис. 2. Дефектом служит искусственное расслоение между сотовым наполнителем и углепластиком диаметром 20 мм.

Приведенные спектры составляют множество признаков, которые являются более информативными по сравнению с амплитудным спектром, но визуальное сравнение квадратурных спектров между собой является довольно сложной задачей.

Числовым выражением сравнения спектров Фурье двух сигналов из бездефектной и дефектной зоны в трехмерном пространстве может служить массив метрик (евклидовых расстояний) [5], рассчитанных между соответствующими точками спектров.

Рассмотрим векторное изображение гармоник двух сигналов, полученных в дефектной и бездефектной зонах, которые отвечают некоторой частоте  $\omega_i$ . Вектор  $OA$  соответствует гармонике в бездефектной зоне, а вектор  $OB$  — в дефектной (рис. 3).

Разностью между амплитудами двух гармоник является расстояние  $DB$ . При изменении фазового угла  $\Delta\phi$  между гармониками величина  $DB$  не изменится, а при одинаковой амплитуде обеих гармоник будет равна нулю. В отличие от вектора  $DB$  отрезок  $AB$  — метрическое расстояние между этими гармониками в евклидовом пространстве — будет учитывать фазовый угол  $\Delta\phi$  и иметь отличные от нуля значения даже при одинаковых амплитудах этих гармоник. Метрический спектр двух сигналов может быть рассчитан по следующей формуле:

$$M(\omega_k) = \sqrt{(S_{2R}(\omega_k) - S_{1R}(\omega_k))^2 + (S_{2J}(\omega_k) - S_{1J}(\omega_k))^2},$$

где  $S_{1R}(\omega_k)$ ,  $S_{2R}(\omega_k)$  — действительные спектры колебаний соответственно в эталонной (бездефектной) и дефектной зонах;  $S_{1J}(\omega_k)$ ,  $S_{2J}(\omega_k)$  — мнимые спектры колебаний соответственно в эталонной и дефектной зонах.

Принятие решения о наличии дефекта на основе вычисления метрического спектра двух сигналов может быть более эффективным, поскольку таким образом учитывается фазовая и амплитудная информация, кроме того, в отличие от квад-

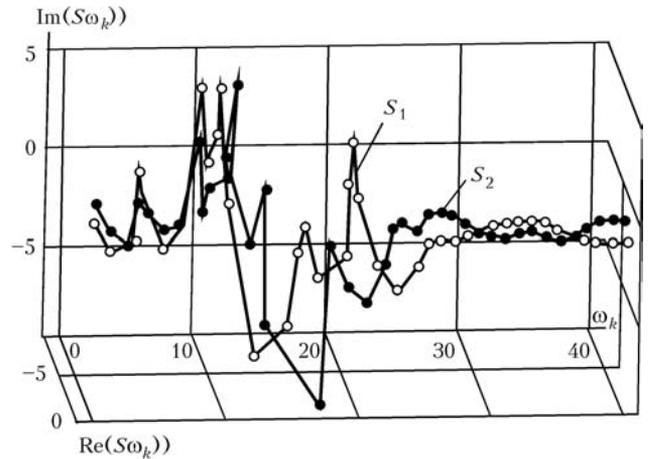


Рис. 2. Изображение квадратурных спектров сигналов в бездефектной  $S_1$  и дефектной зонах  $S_2$

ратурного этот спектр не является двумерным массивом.

Учитывая то, что влияние дефектов на спектральные компоненты не одинаковое, в современных методиках, применяющихся при контроле изделий методом свободных колебаний, для повышения чувствительности используют только составляющие спектра, которые наиболее сильно изменяются. Эти гармоники вычисляют на основе расчетов разностного амплитудного спектра и сравнения его составляющих с заданными пороговыми уровнями. Кроме того, используют также и обобщенные параметры, которые характеризуют отличия исследуемых спектров [6].

Рассмотрим разностный амплитудный спектр и спектр метрик (рис. 4) для полученных выше спектров свободных колебаний в дефектной и бездефектной зонах сотовой панели.

Как видно из приведенного рисунка, разностный спектр дает только две информативных гармоники, а спектр метрик с учетом фазовой информации увеличивает их количество до 12. Информативны в этих спектрах те гармоники, которые превышают определенный пороговый уровень (0,35), т. е. имеют наибольшие изменения по абсолютному значению в дефектной области сравнительно с бездефектной (эталонной).

Для проверки эффективности использования метрического спектра были проведены эксперименты на образцах панелей композитов с сотовым

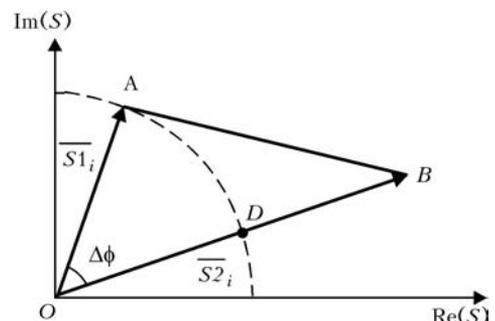


Рис. 3. Векторное изображение гармоник

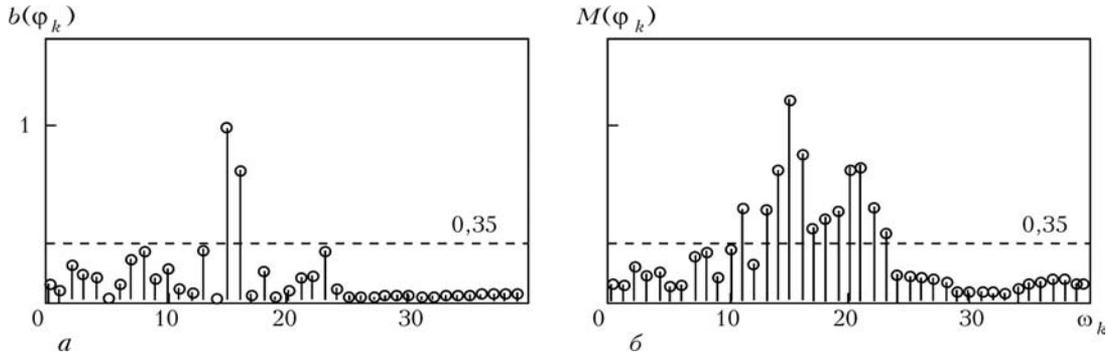


Рис. 4. Спектры разностей амплитудный (а) и метрик (б)

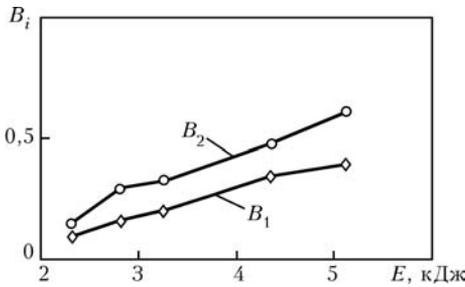


Рис. 5. Зависимость обобщенных параметров  $B_i$  от энергии удара

наполнением ПСП-1 и обшивкой на основе стеклоткани Т42/1-76. Моделями дефектов служили зоны с повреждениями, нанесенными точечным ударом с нормированной энергией в диапазоне от 2,0 до 5,1 кДж. По спектрам свободных колебаний в этих зонах, а также в неповрежденной зоне панелей рассчитывали разностный и метрический спектры.

В качестве параметра, по которому проводили оценку повреждения композитной панели, использовали обобщенные параметры  $B_i$  [5]:

$$B_1 = \sum_k b(\omega_k), \quad B_2 = \sum_k M(\omega_k),$$

где  $b(\omega_k)$  — значение модулей разностей гармоник амплитудных спектров, которые превышают заданный порог;  $M(\omega_k)$  — значение гармоник метрического спектра, которые превышают этот же порог.

На рис. 5 приведена зависимость этих обобщенных параметров от энергии, с которой наносился удар на исследуемую панель.

Нац. авиац. ун-т,  
Киев

Зависимость параметра  $B_2$  имеет характеристику с более высокой крутизной по сравнению с параметром  $B_1$ , т. е. параметры, полученные на основе метрического спектра, более чувствительны к дефектности контролируемого изделия.

### Выводы

Применение спектра метрик в методиках контроля методом свободных колебаний позволяет учитывать фазы гармонических составляющих, что существенно повышает информативность неразрушающего контроля.

Обобщенные параметры, рассчитанные на основе метрического спектра, имеют более высокую чувствительность к дефектности изделия, по сравнению с параметрами, используемыми в современных методиках МСК-контроля.

1. Методика выбора информативных параметров сигналов при разработке акустического метода свободных колебаний / В. П. Афанасьев, А. В. Мозговой, Д. А. Рапопорт, Н. А. Столярова // Дефектоскопия. — 1990. — № 4. — С. 19–24.
2. Мозговой А. В., Ахметшин А. М., Рапопорт Д. А. Фазочастотный акустический метод дефектоскопии слоистых изделий из полимерных материалов // Там же. — 1988. — № 4. — С. 50–55.
3. Гельман Л. М., Удовенко Л. Н. Оптимальное использование преобразования Фурье для технической диагностики // Техн. диагностика и неразруш. контроль. — 2000. — № 4. — С. 13–16.
4. Гельман Л. М. Диагностика сигналов: сравнение обеих компонент преобразования Фурье и спектральной плотности мощности // Там же. — 2006. — № 2. — С. 26–29.
5. Трахтман А. М. Введение в обобщенную спектральную теорию сигналов. — М.: Сов. радио, 1972. — 352 с.
6. Применение спектрального анализа в низкочастотных акустических дефектоскопах / Ю. В. Ланге, С. И. Воропаев, В. Ф. Мужичкий и др. // Там же. — 1995. — № 10. — С. 74–83.

Поступила в редакцию  
08.02.06