

ОСОБЕННОСТИ ОТКЛИКОВ МУЛЬТИСЕНСОРНОЙ СИСТЕМЫ КОНТРОЛЯ ПРИ ИЗМЕНЕНИИ НАПРЯЖЕННО-ДЕФОРМИРОВАННОГО СОСТОЯНИЯ ОБРАЗЦА

Суржиков В.П., Хорсов Н.Н., Хорсов П.Н.

Национальный исследовательский Томский политехнический университет, Томск, Россия (634050, г. Томск, пр. Ленина, 30), e-mail: iva1954@mail.ru, horsov@tpu.ru

Проведен анализ зависимости параметров откликов с двух пространственно-разнесенных приемников сигналов мультисенсорной системы контроля от степени напряженно-деформированного состояния образца. Для поиска информативных параметров отклика временные реализации отклика преобразованы в аналитические сигналы с использованием преобразования Гильберта, как отражающие пространственно-временные характеристики. Для анализа использованы амплитудно-временные характеристики аналитического сигнала отклика. Показано, что информативность повышается, если формировать аналитический сигнал из узкополосных сигналов, вырезанных из спектра отклика скользящим прямоугольным окном. Использование скользящего окна позволило обнаружить параметры откликов, однозначно связанные со степенью напряженно-деформированного состояния образца. При этом обнаружилось, что для разных спектральных окон проявляются свои зависимости. Выяснилось также, что полученные зависимости, зарегистрированные разными приемниками, ведут себя независимо друг от друга. В целом показана принципиальная возможность обнаруживать однозначные зависимости параметров откликов от величины давления на образец.

Ключевые слова: механоэлектрические преобразования, мультисенсорная система, временная реализация, амплитудно-частотные характеристики, преобразование Гильберта.

FEATURES OF THE RESPONSES OF THE CONTROL MULTISENSOR SYSTEM UNDER CHANGING DEFLECTED MODE OF THE SAMPLE

Surzhikov V.P., Khorsov N.N., Khorsov P.N.

National Research Tomsk Polytechnic University, Tomsk, Russia (634050, Tomsk, Lenin av., 30), email: iva1954@mail.ru, horsov@tpu.ru

It was conducted analysis of the responses parameters from two spatially separated receivers control multisensory system of the degree of stress-strain state of the sample. To search for informative response parameters implementing temporary response converted to analytic signals using the Hilbert transform, as reflecting the spatial and temporal characteristics. For the analysis it was used the amplitude-time characteristics of the analytical signal response. It was shown that the information content is increased if the analytical signal form of narrow-band signals cut from response spectrum sliding rectangular window. Using the sliding window has revealed response parameters, uniquely associated with the degree of stress-strain state of the sample. It is found that for different spectral windows found its dependencies. It was also found that the obtained dependence, registered by different receivers behave independently of each other. Overall shows the basic ability to detect unambiguous response parameters depending on the pressure on the sample.

Keywords: mechanoelectrical transformations, multisensor system, series realization, amplitude-frequency characteristics, Hilbert transform.

Введение

На протяжении ряда лет проводится изучение явления механоэлектрических преобразований (МЭП) в гетерогенных диэлектрических структурах с целью разработки методов неразрушающего контроля прочности и дефектности образцов и изделий из таких материалов [1; 4; 5].

Суть метода МЭП заключается в том, что при импульсном механическом воздействии на образец в нем возникает сферическая акустическая волна, которая при своем продвижении воздействует на дипольные моменты двойных электрических слоев на

границах раздела гетерогенных материалов либо на включения, обладающие пьезоэлектрическими свойствами. Вследствие этого возникает переменное электромагнитное поле, которое можно зарегистрировать как сигнал отклика на механическое возбуждение.

Полный сигнал отклика является суперпозицией откликов от каждого из источников МЭП, через который проходит волна возбуждения. Отклик из источников является, в свою очередь, суперпозицией откликов от волн, проходящих через них при многократных отражениях от граней образца. Интенсивность волны в районе источника МЭП обратно пропорциональна расстоянию, которое проходит волна от точки возбуждения до источника, и пропорциональна скалярному произведению вектора луча акустической волны и вектора дипольного момента источника.

По результатам экспериментальных исследований и математического моделирования было установлено, что, при нормированном воздействии на образец, отклик, обусловленный МЭП, зависит от взаимного положения относительно образца источника импульсного возбуждения и приемника сигнала. Так как исследуемые характеристики образца, такие как концентрация дефектов, механические напряжения в образце связаны, как было показано во многих работах, с параметрами отклика, то особенности параметров отклика в разных точках поверхности образца могут дать дополнительную информацию о распределении характеристик по объему и тем самым повысить надежность контроля их изменений. Становится возможным устанавливать связи этих характеристик образца не только с временными, но и с пространственно-временными параметрами откликов.

Была разработана мультисенсорная система [2], которая показала свою высокую чувствительность к изменению напряженно-деформированного состояния (НДС) исследуемого образца при одноосном сжатии [3]. Высокая чувствительность мультисенсорной системы обусловлена тем, что в ней предусмотрено накопление полезного сигнала отклика от каждого приемника за счет многократного возбуждения образца импульсами заданной формы от высокоточного генератора.

Целью настоящей работы является поиск таких параметров системы «источник возбуждения – приемники сигнала», по которым можно было бы выявить закономерности, однозначно связанные со степенью НДС.

Экспериментальные исследования

В рамках решения поставленной задачи были проведены следующие эксперименты. С использованием мультисенсорной системы контроля были зарегистрированы электромагнитные отклики при импульсном акустическом возбуждении образца, подвергающегося одноосному сжатию. Образец был изготовлен из эпоксидной смолы с песчаным наполнителем, в котором присутствует кварцевая фракция. Размеры образца

составляли $(100 \times 180 \times 60)$ мм³. Образец помещался в пресс и подвергался ступенчатому одноосному сжатию с давлением в (0.5, 2.0, 3.5, 5.0, 6.5, 8.0, 9.5, 11) МПа. На каждой ступеньке производилась серия одинаковых импульсных акустических воздействий на образец; электромагнитные отклики регистрировались и затем усреднялись. Для проверки значимости полученных различий во временных реализациях откликов производилась ее статистическая оценка с использованием критерия Стьюдента.

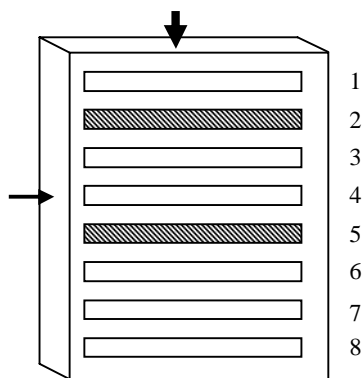


Рис. 1. Схема эксперимента.

Конфигурация эксперимента показана на рис. 1. На рисунке тонкой стрелкой показана область возбуждения в образце (отображен в виде параллелепипеда), жирной стрелкой показано направление сжатия образца. Приемники сигнала показаны в виде прямоугольных полосок (пронумерованы). Анализ производился по временным реализациям из приемников, соответствующих заштрихованным полоскам (приемники 2 и 5).

При выборе метода обработки сигнала авторы руководствовались следующими соображениями. Сигнал электромагнитного отклика является нестационарным во временной области из-за дискретности положения в пространстве источников МЭП. Поэтому использование только спектральных характеристик для получения необходимой полезной информации оказывается недостаточным. Был применен частотно-временной подход с использованием преобразования Гильберта, которое дает возможность преобразовывать временную реализацию в аналитический временной сигнал. Для этого производился сдвиг всех составляющих спектра временной реализации по фазе на 90° , обратным преобразованием Фурье восстанавливался временной сигнал $G(t)$, который служил мнимой составляющей аналитического сигнала. Действительной частью является сама временная реализация $s(t)$. Таким образом, аналитический сигнал $U(t)$ имеет вид:

$$U(t) = s(t) + i \cdot G(t)$$

В работе для анализа использовалась амплитудно-временная характеристика аналитического сигнала, т.е. его модуль от времени.

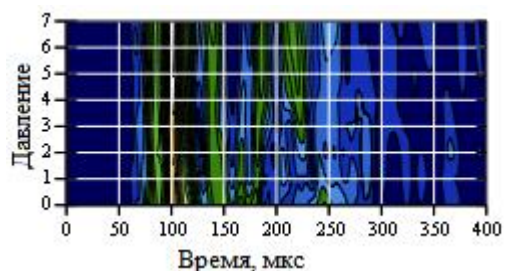
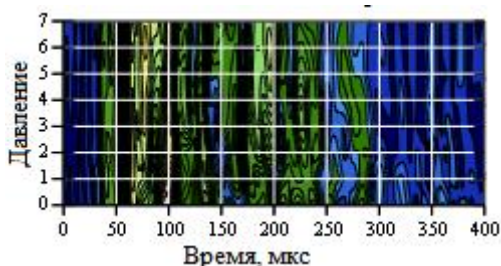


Рис. 2. Контурные графики огибающих аналитических сигналов откликов из датчика 2 (слева) и датчика 5 (справа) от давления.

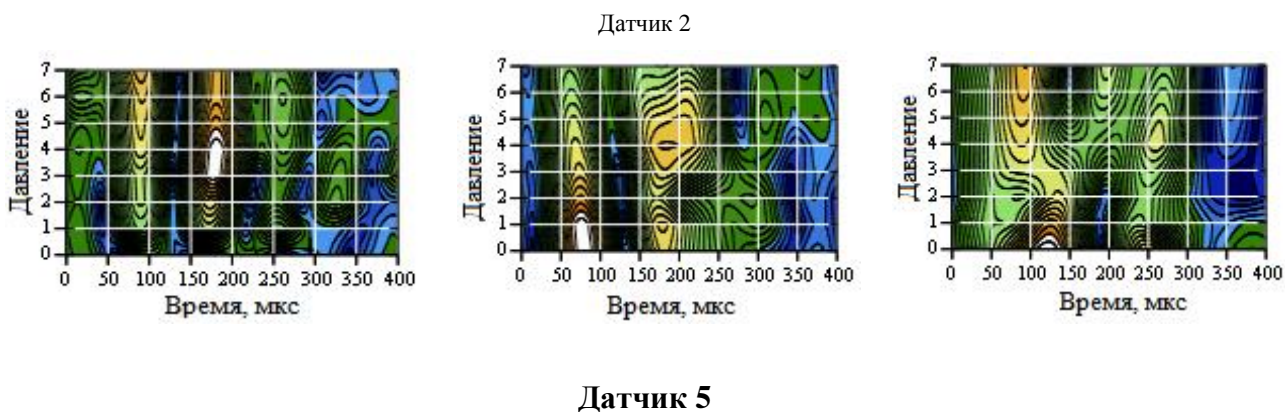
На рис. 2 показаны контурные графики амплитудно-временных характеристик аналитических сигналов откликов от давления, зарегистрированные на датчиках 2 и 5.

По горизонтальной оси на каждом графике отложены значения времени, а по вертикальной – номера давлений от меньшего к большему. Номера i по вертикали графиков соответствуют одноосному давлению P на образец в МПа согласно формуле:

$$P_i = (i \cdot 1.5 + 0.05)$$

Как видно из рисунка, во всем интервале частот спектра отклика по амплитудно-временным характеристикам аналитического сигнала сложно выявить параметры, однозначно связанные с уровнем НДС образца. По нашему мнению, это обусловлено тем, что фазы и амплитуды спектральных составляющих отклика в относительно широкой полосе частот имеют разнонаправленные изменения от нагрузки и поэтому аналитический сигнал ими «зашумляется».

В связи с этим для поиска информативных параметров из спектров временных реализаций вырезалась с использованием скользящего прямоугольного окна спектральная полоса шириной 10 кГц, которая преобразовывалась во временной сигнал. Затем на ее основе формировался аналитический сигнал по указанной выше процедуре. С использованием специальной программы были проанализированы контурные графики амплитудно-временных характеристик от удара в скользящем окне по всей частотной реализации. Выявилось ограниченное число случаев, когда можно было наблюдать однозначные зависимости параметров амплитудно-временных характеристик со степенью НДС. В качестве параметров рассматривались изменения от нагрузки максимумов локальных пиков и их смещения во времени.



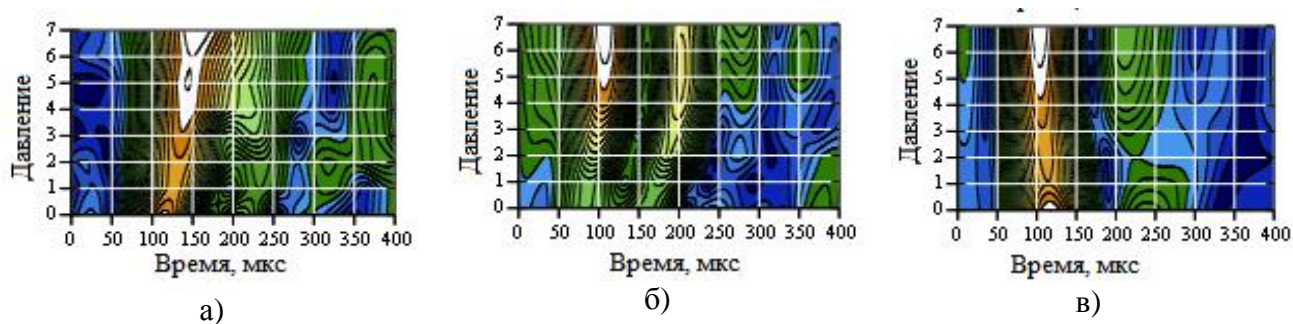


Рис. 3. Контурные графики огибающих аналитических сигналов откликов из датчика 2 (вверху) и датчика 5 (внизу) от давления в частотных окнах: а) (24 – 34) кГц; б) (34 – 44) кГц; в) (45 – 55) кГц.

На рис. 3. показаны выборочные контурные графики амплитудно-временных характеристик аналитических сигналов откликов на датчиках 2 и 5 от давления в диапазонах скользящих спектральных окон.

Как видно из рисунка, в диапазоне частот скользящего окна (24–34) кГц на отклике со 2-го датчика происходит нарастание максимума пика от давления в области около 100 мкс без смещения во времени. Для 5-го датчика в том же диапазоне наблюдается монотонное смещение локального максимума по времени от 110 до 150 мкс при возрастании давления. В диапазоне частот (34–44) кГц для 2-го датчика с ростом давления наблюдается уменьшение амплитуды одного из пиков со смещением последнего во времени от 70 мкс до 50 мкс. Для 5-го датчика в том же диапазоне частот при росте давления наблюдается возрастание амплитуды максимума первого из пиков с его смещением до нагрузки 6.5 МПа, затем рост амплитуды и смещения практически прекращаются. Характерные изменения подобного же рода можно наблюдать в частотном окне (45–55) кГц. Как следует из приведенных рисунков, наблюдается многообразный характер однозначной зависимости между пиками амплитудно-временной характеристики и уровнем давления на образец для разных спектральных окон и разных приемников сигнала.

Выводы

Показано, что обработка сигналов откликов с использованием преобразования Гильберта в узких спектральных окнах дает принципиальную возможность установления однозначной зависимости параметров амплитудно-временных характеристик аналитического сигнала с уровнем НДС образцов.

Характер указанных зависимостей различается как для разных спектральных полос одного и того же приемника, так и для откликов из пространственно разнесенных приемников сигнала.

Список литературы

1. Малышков Ю.П. и др. Дефектоскопия и оценка напряженно-деформированного состояния бетона по параметрам электромагнитной эмиссии // Изв. вузов. Сер. Строительство. – 1997. – № 12. – С. 114-117.
2. Суржиков В.П., Хорсов Н.Н., Хорсов П.Н. Мультисенсорная система для исследования дефектности диэлектрических материалов // Контроль. Диагностика. – 2011. – № 11. – С. 17-20.
3. Суржиков В.П., Хорсов Н.Н. Влияние одноосной нагрузки на пространственно-временные характеристики электромагнитного отклика при акустоэлектрических преобразованиях в диэлектрических образцах // Дефектоскопия. – 2011. – № 10. – С. 50-54.
4. Фурса Т.В. О механизме механоэлектрических преобразований при ударном возбуждении композиционных материалов на основе цементного вяжущего // ЖТФ. – 2001. – Т. 71. – В. 7. – С. 53-56.
5. Фурса Т.В., Хорсов Н.Н., Батулин Е.А. Источники механоэлектрических преобразований в бетонах // ЖТФ. – 1999. – Т. 26. – В. 6. – С. 36-40.

Работа выполнена в рамках государственного задания «Наука».

Рецензенты

Суржиков Анатолий Петрович, д.ф.-м.н., профессор, зам. директора, Институт неразрушающего контроля Томского политехнического университета, г. Томск.

Фурса Татьяна Викторовна, д.т.н., старший научный сотрудник, Институт неразрушающего контроля Томского политехнического университета, г. Томск.