

УДК 534-16;53.087.92;53.087.45

**К ВОПРОСУ ОБ ОПТИМАЛЬНОМ СПЕКТРЕ
ИМПУЛЬСНОГО ВОЗБУЖДЕНИЯ В МЕТОДЕ
МЕХАНОЭЛЕКТРИЧЕСКИХ
ПРЕОБРАЗОВАНИЙ**

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

Томский политехнический университет
E-mail: horsov@tpu.ru

Произведена оценка чувствительности метода механоэлектрических преобразований к спектру импульса возбуждения. Показано, что существует оптимальный частотный спектр импульсного возбуждения, при котором разностный сигнал откликов при изменении напряженно-деформированного состояния образца достигает максимального уровня.

Ключевые слова:

Механоэлектрические преобразования, мультисенсорная система, временная реализация, амплитудно-частотные характеристики, импульсная характеристика.

Key words:

Mechanoelectrical transformations, multisensor system, series realization, amplitude-frequency characteristics, dielectric structure, pulse response.

В настоящее время все большее применение находят методы исследования механических свойств твердых тел из диэлектрических материалов с использованием явления механоэлектрического преобразования (МЭП) [1–4]. Явление МЭП заключается в изменении дипольного момента двойных электрических слоев на границах раздела разнородных материалов (диэлектрик-диэлектрик, металл-диэлектрик, жидкость-диэлектрик) акустической волной, возбуждаемой в образце в результате

импульсного механического воздействия, что приводит к появлению переменного электрического поля (отклика), параметры которого можно зарегистрировать. В качестве источника МЭП могут выступать также включения, обладающие пьезоэлектрическими свойствами.

Изменение дипольного момента обусловлено суперпозицией отраженных от границ образца и рассеянных на неоднородностях волн импульсного возбуждения в области источников МЭП. Источниками неоднородности в объекте исследования могут быть границы раздела разнородных материалов, дефекты разного рода в виде, например, пор, трещин, локальные градиенты плотности материала в условиях напряженно-деформированного состояния (НДС). Поэтому следует ожидать, что параметры отклика содержат в себе информацию о степени дефектности материала и его НДС, и задачей является найти такие

Суржиков Владимир Петрович, канд. физ.-мат. наук, ст. науч. сотр. проблемной научно-исследовательской лаборатории электроники, диэлектриков и полупроводников Института неразрушающего контроля ТПУ.

E-mail: iva1954@mail.ru

Область научных интересов: неразрушающий контроль материалов.

Хорсов Николай Николаевич, ст. науч. сотр. проблемной научно-исследовательской лаборатории электроники, диэлектриков и полупроводников Института неразрушающего контроля ТПУ.

E-mail: horsov@tpu.ru

Область научных интересов: неразрушающий контроль материалов.

Хорсов Петр Николаевич, аспирант проблемной научно-исследовательской лаборатории электроники, диэлектриков и полупроводников Института неразрушающего контроля ТПУ.

E-mail: horsov@tpu.ru.

Область научных интересов: неразрушающий контроль материалов.

параметры отклика, которые в наибольшей степени отражают как степень дефектности материала, так и НДС.

Предварительные результаты исследований, полученные с использованием мультисенсорной системы контроля [5], показали статистически надежное изменение параметров откликов при нанесении на поверхность образца дефектов в виде сколов, при создании объемных дефектов в виде отверстий разной глубины, а также при изменении напряженно-деформированного состояния путем одноосного сжатия образца. Актуальными являются выявление степени дефектности и НДС на как можно более ранней стадии разрушения материала. Для повышения достигнутой чувствительности упомянутого метода с использованием мультисенсорной системы контроля необходимо дать оценку информативности отклика в зависимости от спектра импульсного возбуждения. Для решения поставленной задачи были проведены расчеты по математической модели [6] и необходимые экспериментальные исследования.

Измерения проводились на образцах эпоксидной смолы ЭДП прямоугольной формы размером $10 \times 8 \times 6$ см с песчаным наполнителем. Образец располагался на неподвижном нижнем пуансоне прессы. Верхним подвижным пуансоном создавалось необходимое статическое одноосное сжатие.

Электромагнитный отклик инициировался со стороны узкой грани образца импульсом акустического излучения пьезоэлектрического преобразователя на основе ЦТС-19. Частота следования и длительность импульсов задавались высокоточным генератором. Параметры генератора и пьезоэлектрического преобразователя подбирались такими, чтобы обеспечить спектральную полосу импульса, охватывающую диапазон от 30 кГц до 115 кГц. Генератор вырабатывал 30 импульсов возбуждения с высокой точностью по амплитуде и форме через интервал в 2 мс, за который происходило полное затухание сигнала текущего отклика.

Электрический отклик регистрировался с двадцатью емкостными датчиками размером 1×1 см каждый, размещенных на площади размером $9,5 \times 8$ см, которые изготавливались травлением из фольгированного стеклотекстолита толщиной 1 мм. Во избежание помех от соседних датчиков каждый из них был окружен заземленным охранным кольцом. Вся последовательность откликов с каждого датчика усиливалась, оцифровывалась и поступала в базу данных. С использованием соответствующего программного обеспечения для каждого датчика находились средние значения откликов по всей совокупности импульсов возбуждения с привязкой к моменту удара, а также их среднеквадратичные отклонения. Эти данные необходимы для оценки статистической значимости различий при сравнении параметров откликов.

Было произведено математическое моделирование описанного эксперимента с использованием математической модели МЭП [6]. При расчете были внесены упрощения, не влияющие на выводы, полученные из анализа расчетных данных. В частности, источник механического воздействия, а также источники МЭП были заданы точечными; расчет велся для бездефектного образца при расположении приемников в точках, соответствующих положению приемников в реальном эксперименте. Математическое моделирование показало, что средний уровень сигнала отклика без учета потерь энергии не меняется, несмотря на то, что интенсивность сферической акустической волны убывает обратно пропорционально пройденному расстоянию и имеет место рассеяние волн на неоднородностях и дефектах. Это обусловлено тем, что отраженная от границ образца волна вновь участвует в формировании отклика. В действительности, как известно, в материале происходит поглощение энергии акустических волн за счет внутреннего трения, а также рассеивания энергии на дефектах, причем более высокочастотная составляющая энергии волны поглощается более эффективно. Кроме того, часть энергии волны уносится через границы образца.

В реальных условиях эксперимента сигнал отклика затухает для разных спектральных составляющих по разному, но в среднем для спектральной полосы (50...100) кГц постоянная времени экспоненциального затухания составляет примерно 400 мкс. На этом основании для

приближения расчетных данных к реальным условиям в модели предусмотрено экспоненциальное затухание сигнала.

По соответствующим алгоритмам математической модели рассчитывался отклик при воздействии на образец импульса, форма которого повторяла импульс реального эксперимента.

Формы расчетных и экспериментальных откликов оказались близки, что свидетельствует об удовлетворительном соответствии математической модели отклика реальному отклику. Отличия обусловлены главным образом тем, что в модели не учитывались зависимости степени пространственного затухания спектральных составляющих волны возбуждения от частоты.

Для решения поставленной задачи влияния спектральных составляющих отклика на разностный сигнал рассмотрим импульсную характеристику отклика в заданной точке расположения источника МЭП. Для получения импульсной характеристики необходимо подать на вход исследуемой системы импульс бесконечно малой длительности. В условиях математической модели при расчете отклика с заданным интервалом квантования сигнала длительность входного импульса была выбрана интервалу выборки. При расчете и в реальном эксперименте интервал квантования во времени составлял 0,8 мкс. Амплитудно-частотная характеристика (АЧХ) единичного импульса шириной в интервал времени оцифровки является равномерной во всей области частот отклика. Были рассчитаны две импульсные характеристики. Одна получена при некотором начальном положении приемника сигнала, а вторая – при смещении приемника на 1 мм.

На рис. 1 показана расчетная импульсная характеристика отклика (а) при заданном положении источника МЭП. На этом же рисунке показан разностный сигнал между указанными импульсными характеристиками (б). На импульсной характеристике видны временные суперпозиции пересечения с данным источником МЭП фронтов прямой и отраженных от границ волн возбуждения единичной длительности.

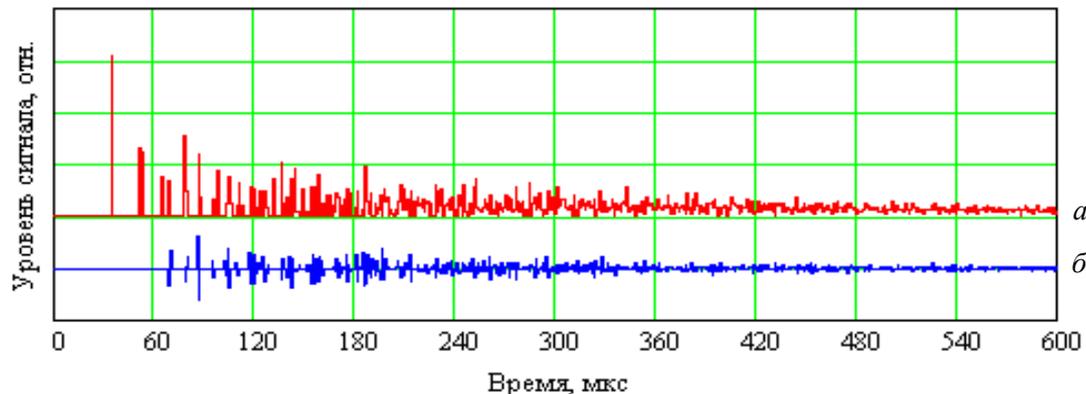


Рис. 1. Расчетные: а) импульсная характеристика отклика и б) разностный сигнал

В упругом приближении форма волны возбуждения не меняется при распространении по образцу (выполняется принцип Гюйгенса), а испытывает только рассеяние на неоднородностях структуры, обусловленных дефектами и локальными изменениями плотности под действием напряженно-деформированного состояния, а также отражения от границ образца.

Поэтому отклик представляет собой суперпозицию сдвинутых во времени различных по уровню волн одной и той же формы.

Для оценки вклада в разностный сигнал спектральных составляющих импульса воздействия необходимо рассмотреть отдельные гармонические составляющие воздействия. Выражение для гармонической составляющей спектра отклика имеет вид

$$g(t) = \sum_i a_i \cdot \sin(\omega \cdot (t - \frac{r_i}{v})),$$

где $g(t)$ – временная функция суммы гармоник круговой частоты ω , амплитуды a_i с фазами, определяемыми расстояниями r_i , которые акустические волны (прямая, отраженная от границ образца, рассеянная на неоднородностях) проходят от точки удара до источника МЭП; v – продольная скорость звука образца.

Рассмотрим гармонику $g(t)$, у которой на небольшую величину меняются амплитуда a и расстояние r . Для оценки небольших отклонений аргументов в разностном анализе можно воспользоваться уравнением полных дифференциалов

$$\Delta g(t) = \Delta a \frac{\partial g(t)}{\partial a} + \Delta r \frac{\partial g(t)}{\partial r},$$

где $g(t) = a \cdot \sin(\omega \cdot (t - \frac{r}{v}))$, $\Delta g(t)$, Δa , Δr – приращение $g(t)$, a , r , соответственно.

Результатом дифференцирования будет

$$\Delta g(t) = \Delta a \cdot \sin(\omega \cdot (t - \frac{r}{v})) - \Delta r \frac{\omega}{v} \cdot \cos(\omega \cdot (t - \frac{r}{v})). \quad (1)$$

Как видно из (1), изменение амплитуды сигнала от приращения расстояния пропорционально частоте спектральной составляющей.

Отсюда можно сделать вывод, что при прочих равных условиях эффективнее использовать импульсное воздействия со спектром, лежащим в области возможно более высоких частот.

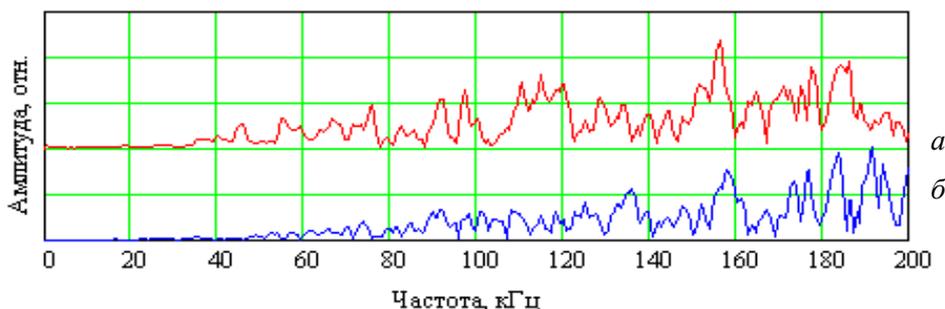


Рис. 2. Амплитудно-частотные характеристики а) импульсной характеристики отклика и б) разностного сигнала

На рис. 2 приведена АЧХ расчетной импульсной характеристики (а) и разностей спектров упомянутых выше импульсных характеристик (б), нормированные по уровню.

Как видно из рисунка, импульс с равномерным спектром преобразуется в образце в спектр, имеющий минимумы и максимумы, т. е. образец для волны является частотным фильтром.

Следует отметить, что разностная АЧХ для любой из гармоник находится как амплитуда разности радиус-векторов соответствующих гармоник на фазовой плоскости. Поэтому в разностной АЧХ учитываются как амплитуды соответствующих гармоник, так и их фазы.

Кроме того, имеет место тенденция смещение величины разностной АЧХ расчетных откликов в область более высоких частот. Так, АЧХ импульсной характеристики достигает

уровня 0,5 от максимальной амплитуды на частоте 75 кГц, тогда как АЧХ разности – на частоте 135 кГц.

Получение отклика $s(t)$ при заданной временной функции воздействия $f(t)$ рассчитывается путем свертки импульсной характеристикой отклика $h(t)$ с указанной функцией, либо в дискретном случае (с точностью до множителя) по формуле

$$s_i = \sum_{j=0}^i h_j \cdot f_{i-j},$$

где i – номер выборки.

Для численной оценки относительного уровня отклика при различных полосах спектра воздействия были проведены расчеты при воздействии на вход математической модели прямоугольных радиоимпульсов длительностью 100 мкс с заполнением гармоническими колебаниями разных частот от 5 до 100 кГц.

При таких условиях ширина спектрального скользящего окна составляет примерно 9 кГц.

На рис. 4 показаны максимальные значения разности откликов от частот заполнения при смещении источника МЭП на 1 мм.

Видно, что, в среднем наблюдается линейный рост уровня разностного сигнала отклика от частоты заполнения радиоимпульса с некоторыми отклонениями, обусловленными спектральными свойствами импульсной характеристики.

На основании проведенных расчетов была подобрана форма импульса возбуждения и получены отклики при одноосном сжатии образца давлением 5 и 50 атм.

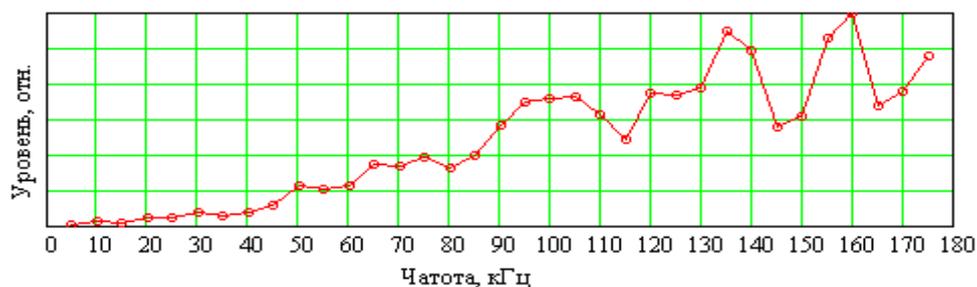


Рис. 3. Максимальные значения разности расчетных откликов при воздействии на вход радиоимпульсов с гармоническим заполнением

На рис. 4 показаны приведенные к максимуму отклики с 1-го приемника при одноосном сжатии давлением в 5 атм. (а), и разностный сигнал откликов при изменении давления (б). Как видно из рисунка, максимум разностного сигнала лежит во временной области, в которой отклик формируется отраженными волнами. Если вернуться к расчетным данным (рис. 1), то мы можем видеть, что и здесь имеет место временное смещение разностного сигнала.

Это может быть связано с тем, что изменения в отклике нарастают по мере многократного прохождения волны возбуждения через неоднородности при отражениях от границ образца.

На рис. 5 показаны АЧХ отклика при одноосном сжатии давлением 5 атм. и разностного сигнала. Из рисунка следует, что высокочастотная граница разностного сигнала смещается в область более низких частот по сравнению со спектром самого отклика. Это можно объяснить тем, что высокочастотная составляющая отклика затухает быстрее, чем низкочастотная. А так как разностный сигнал отклика проявляется во времени позже, чем сам отклик, поэтому в разностном сигнале доля высокочастотных составляющих уменьшается.

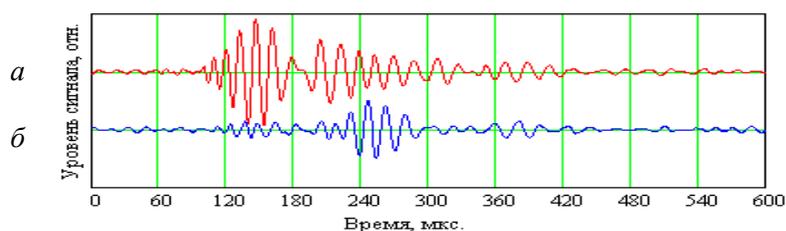


Рис. 4. Отклик с 1-го приемника сигнала от образца, подвергнутого давлению в 5 атм, и разностный сигнал откликов при давлении 5 и 50 атм

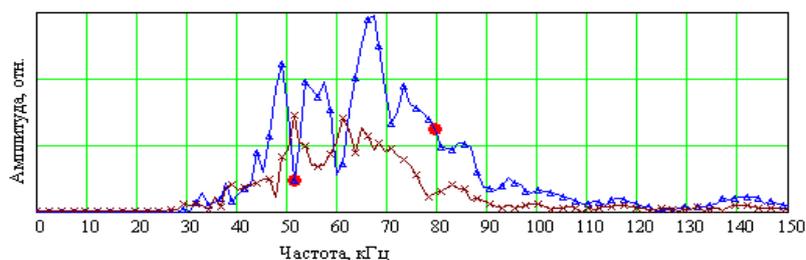


Рис. 5. АЧХ отклика при сжатии образца давлением 5 атм (обозначена треугольниками) и разностного отклика (обозначена крестиками)

Из полученных результатов можно сделать следующие выводы.

Чувствительность разностного метода неразрушающего контроля с использованием явления МЭП зависит от спектра акустического воздействия на образец. При этом, с одной стороны, эффективность разностного метода растет с увеличением частоты, а с другой – более быстрое затухание высокочастотных составляющих волны вносит ограничение в их использовании для сравнительного анализа степени напряженно-деформированного состояния образца.

СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ

1. Чахлов В.Л., Малышков Ю.П., Гордеев В.Ф. и др. Электромагнитная эмиссия бетонов при ударном нагружении // Известия вузов. Строительство. – 1995. – № 5. – С. 54–58.
2. Фурса Т.В., Гордеев В.Ф. и др. Электромагнитная эмиссия асфальтобетонов при динамическом нагружении // Наука и техника в дорожной отрасли. – 1997. – № 2. – С. 6–7.
3. Sclarzik S., Alppeter I. The electric emission from mortar and concrete subjected to mechanical impact // Scripta Materialia. – 2001. – V. 44. – P. 2537–2541.
4. Фурса Т.В., Хорсов Н.Н., Батурин Е.А. Источники акустоэлектрических преобразований в бетонах // Журнал технической физики. – 1999. – Т. 99. – Вып. 10. – С. 51–55.
5. Суржиков В.П., Хорсов Н.Н., Хорсов П.Н. Мультисенсорная система для исследования дефектности диэлектрических материалов // Контроль. Диагностика. – 2011. – № 11 (161). – С. 17–20.
6. Хорсов Н.Н. Математическая модель регистрации отклика при акустоэлектрическом преобразовании в образце с включением в виде двойного электрического слоя при точечном ударном возбуждении // Известия вузов. Физика. – 2007. – Т. 50. – № 2. – С. 69–77.

Поступила 31.10.2011 г.