

*На правах рукописи*



ХОРСОВ ПЕТР НИКОЛАЕВИЧ

**РАЗРАБОТКА МУЛЬТИСЕНСОРНОЙ СИСТЕМЫ КОНТРОЛЯ  
ДЕФЕКТНОСТИ ГЕТЕРОГЕННЫХ СТРУКТУР НА ОСНОВЕ ЯВЛЕНИЯ  
МЕХАНОЭЛЕКТРИЧЕСКИХ ПРЕОБРАЗОВАНИЙ**

Специальность 05.11.13 – «Приборы и методы контроля природной среды,  
веществ, материалов и изделий».

**АВТОРЕФЕРАТ**  
**диссертации на соискание ученой степени**  
**кандидата технических наук**

ТОМСК - 2014

Работа выполнена в Федеральном государственном автономном образовательном учреждении высшего образования «Национальный исследовательский Томский политехнический университет»

Научный руководитель: Суржиков Анатолий Петрович  
доктор физико-математических наук, профессор

Официальные оппоненты: Люкшин Борис Александрович, доктор технических наук, профессор, Федеральное государственное бюджетное образовательное учреждение высшего профессионального образования «Томский государственный университет систем управления и радиоэлектроники», заведующий кафедрой механики и графики

Гордеев Василий Федорович, кандидат технических наук, Федеральное государственное бюджетное учреждение науки Институт мониторинга климатических и экологических систем Сибирского отделения Российской академии наук, старший научный сотрудник лаборатории геоинформационных технологий

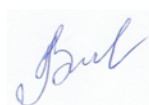
Ведущая организация: Федеральное государственное бюджетное учреждение науки Институт физики прочности и материаловедения Сибирского отделения Российской академии наук

Защита состоится «23» декабря 2014 г. в 15:00 на заседании диссертационного совета Д 212.269.09 при ФГАОУ ВО «Национальный исследовательский Томский политехнический университет» по адресу: 634028, г. Томск, ул. Савиных, дом 7, ауд. 215 (актовый зал).

С диссертацией можно ознакомиться в научно-технической библиотеке ФГАОУ ВО «Национальный исследовательский Томский политехнический университет» по адресу: 634034, г. Томск, ул. Белинского, дом 55 и на сайте <http://portal.tpu.ru/council/916/worklist>

Автореферат разослан «    » \_\_\_\_\_ 2014 г.

Ученый секретарь Совета по защите докторских и кандидатских диссертаций,  
к.т.н., доцент



А. Васендина

## ОБЩАЯ ХАРАКТЕРИСТИКА РАБОТЫ.

**Актуальность** темы. Композиционные материалы системы «диэлектрик-диэлектрик», «металл-диэлектрик» находят все большее применение в конструкциях, подвергающихся силовым статическим и динамическим нагрузкам.

Под действием нагрузок в материале конструкции происходят упругие деформации, в том числе и необратимые изменения в виде пластических деформаций и дефектов.

Контроль упругих деформаций, отражающих степень напряженно-деформированного состояния объекта исследования, а также дефектности являются исходными данными для оценки остаточного ресурса конструкции.

Такая оценка особенно важна для элементов конструкций, подвергающихся динамическим нагрузкам, для предотвращения внезапной потери несущей способности.

Аппаратура контроля при таких условиях эксплуатации должна быть чувствительной как к дефектности, так и к степени напряженно-деформированного состояния.

В последнее время получает все большее распространение метод контроля, основанный на явлении механоэлектрических преобразований в диэлектрических структурах, когда под действием акустической волны возбуждения часть ее энергии трансформируется в переменное электромагнитное поле на источниках механоэлектрических преобразований, в роли которых выступают двойные электрические слои или включения, обладающие пьезоэлектрическими свойствами.

Метод имеет большие потенциальные возможности, так как, являясь реверберационным по акустическому типу, позволяет накапливать полезную информацию за счет многократного прохождения отраженных от границ конструкции акустических волн возбуждения через неоднородные области, обусловленные напряженно-деформированным состоянием и дефектностью материала.

Исследования, проведенные с использованием метода механоэлектрических преобразований показали его потенциальные возможности для контроля дефектности, напряженно-деформированного состояния композитных диэлектрических материалов в условиях различных

воздействий: температуры, влажности, механических нагрузок. Недостатком существующей аппаратуры контроля, основанной на явлении механоэлектрических преобразований является относительно низкая чувствительность к степени напряженно-деформированного состояния и дефектности за счет невысокого отношения сигнал/шум.

Настоящая работа посвящена существенному повышению чувствительности метода механоэлектрических преобразований путем разработки мультисенсорной системы контроля, которая позволит исследовать малые изменения дефектности и напряженно-деформированного состояния композиционных диэлектрических материалов под действием нагрузки одноосного сжатия.

**Целью работы** является разработка мультисенсорной системы контроля дефектности и напряженно-деформированного состояния на основе явления механоэлектрических преобразований и проведения исследований для оценки ее возможностей.

Для достижения цели в работе были поставлены следующие **задачи**:

1. Разработка технического задания и изготовление макета мультисенсорной системы контроля.
2. Исследование возможности мультисенсорной системы контроля для контроля дефектности композитных диэлектрических материалов.
3. Изучение возможности мультисенсорной системы контроля для контроля напряженно-деформированного состояния объектов при одноосном сжатии.
4. Исследование возможности использования электромагнитной эмиссии, зарегистрированной мультисенсорной системы контроля, для контроля напряженно-деформированного состояния объектов.

**Научная новизна** работы заключается в следующем:

1. На основе явления механоэлектрических преобразований реализован новый подход к созданию высокочувствительной аппаратуры контроля дефектности и напряженно-деформированного состояния, заключающейся в накоплении полезного сигнала при многократных импульсных возбуждениях и возможности получения пространственно-временных характеристик откликов.

2. Установлена связь пространственно-временных характеристик электромагнитных откликов из композитных образцов с размерами локального дефекта.

3. Установлены закономерности, связывающие степень напряженно-деформированного состояния композитного диэлектрического материала при одноосном сжатии с амплитудно-временной характеристикой аналитического представления отклика на основе преобразования Гильберта.

4. Показано, что чувствительность метода контроля напряженно-деформированного состояния зависит от спектра возбуждающего импульса.

5. Показано, что мультисенсорная система контроля позволяет регистрировать как упругие деформации композитных материалов, так и необратимые процессы под действием одноосной нагрузки.

6. Показана возможность оценки абсолютных значений нагрузки на объект исследования методом оптимальной фильтрации. Определено, что при фильтрации сигналов откликов мультисенсорной системы, возникает принципиальная возможность определять абсолютное значение напряженно-деформированного состояния объекта обследования.

**Основные научные положения, защищаемые автором:**

1. Технические условия, позволяющие разработать и изготовить макет мультисенсорной системы для контроля дефектности и напряженно-деформированного состояния гетерогенных материалов.

2. Высокая чувствительность системы к объемной дефектности материала и к изменению его напряженно-деформированного состояния.

3. Возможность оценки соотношения обратимых и необратимых процессов в условиях напряженно-деформированного состояния.

4. Определение абсолютных значений нагрузок объекта с применением метода оптимальной фильтрации.

5. Возможность использования мультисенсорной системы контроля для исследования напряженно-деформированного состояния по параметрам электромагнитной эмиссии из диэлектрических материалов.

**Достоверность научных результатов** подтверждается корректностью постановки задач и их физической обоснованностью, применением современной элементной базы и современной аппаратуры при создании мультисенсорной системы контроля, комплексным характером подхода к решению поставленных задач, достаточным объемом экспериментальных

данных, полученных при проведении лабораторных исследований, обработкой экспериментальных данных с использованием методов статистики и специальных компьютерных программ, получением результатов, не противоречащих физике исследуемых процессов.

**Личный вклад автора.** Совместно с руководителем автор принимал участие в формулировании целей и задач исследований, принимал активное участие в разработке и изготовлении макета мультисенсорной системы, проводил эксперименты и обработку данных измерений, обобщал полученные результаты. Принимал участие в написании статей, и представлял результаты исследований на всероссийских и международных конференциях.

**Научно-практическая значимость** состоит в возможности использования мультисенсорной системы для исследования композиционных диэлектрических материалов в условиях внешних помех. Разработанная система позволяет осуществлять контроль прочности материала на ранних стадиях разрушения, а также производить оценку остаточного ресурса работы объекта исследования и абсолютных значений внешних нагрузок. Результаты диссертационной работы внедрены в научно-производственную деятельность ООО «Сибнуклон» и применяются для входного контроля дефектов комплектующих при производстве генераторов технеция-99м и контроле наружной поверхности транспортных упаковочных комплектов для перевозки радиоактивных веществ, а так же используются в ООО «ЮМХ» для контроля качества углеродсодержащих сенсоров в методе инверсионной вольтамперометрии.

**Апробация работы. Основные результаты** работы докладывались, обсуждались и получили одобрение на научных семинарах Проблемной научно-исследовательской лаборатории электроники, диэлектриков и полупроводников (ПНИЛ ЭДИП) Томского политехнического университета, на 7th International Forum on Strategic Technology (IFOST - 2012) (Томск, 2012), I Всероссийской конференции школьников, студентов, аспирантов, молодых ученых «Ресурсоэффективные системы в управлении и контроле: взгляд в будущее» (Томск, 2012), XIX Международной научно-практической конференции студентов, аспирантов и молодых ученых «Современные техника и технологии» (Томск, 2013), II Всероссийской с международным участием научно-практической конференции по инновациям в неразрушающем контроле «Инновации в неразрушающем контроле» (Томск, 2013), II Международной

конференции школьников, студентов, аспирантов, молодых ученых «Ресурсоэффективные системы в управлении и контроле: взгляд в будущее» (Томск, 2013), XX Международной научно-практической конференции студентов, аспирантов и молодых ученых «Современные техника и технологии (СТТ-2014)» (Томск, 2014), XI Международной конференции студентов и молодых ученых «Перспективы развития фундаментальных наук» (Томск, 2014). Результаты работы апробировались и использовались при выполнении фундаментальных работ по грантам РФФИ 06-08-00693-а, 06-08-02100-э\_к, 10 08-02100-э\_к, а также используются при выполнении действующих грантов РФФИ 11-07-00666-а и 11-07-98000р\_сибирь\_а.

**Публикации. Основные положения** диссертации опубликованы в 17 печатных работах, в том числе 10 работ в изданиях, рекомендованных перечнем ВАК Минобразования России.

**Объем и структура диссертации.** Диссертация изложена на 115 страниц и состоит из введения, пяти глав, основных выводов по работе и списка используемой при написании диссертации литературы из 89 наименований.

## **ОСНОВНОЕ СОДЕРЖАНИЕ РАБОТЫ.**

**Во введении** обоснована актуальность темы диссертационной работы, сформулированы цели и задачи проводимых исследований, перечислены основные положения, выносимые на защиту, их достоверность и практическая значимость, представлены структура и объем работы.

**В первой главе** сделан аналитический обзор литературных данных по моделям разрушений и их связи с дефектообразованием. Рассмотрены некоторые методы неразрушающего контроля: акустической эмиссии, ультразвуковой дефектоскопии, электромагнитной эмиссии и механоэлектрических преобразований. Обоснована предпочтительность использования метода механоэлектрических преобразований.

**Во второй главе** даны предпосылки к разработке мультисенсорной системы контроля, в основе которых лежат: детерминированность отклика, позволяющая использовать принципа накопления полезного сигнала путем многократного возбуждения объекта исследования при неизменности его структуры и зависимость формы отклика от положения приемника сигнала относительно поверхности объекта контроля. Реализация принципа накопления

сигнала потребовала высокостабильной системы возбуждения объекта исследования.

Показано, что отклик формируется как суперпозиция сигналов на источниках механоэлектрических преобразований, через которые проходят фронты акустической волны возбуждения. Определенную роль играет размер приемника. С увеличением его размера для высокочастотных составляющих сигнала отклика приемник может играть роль дифракционной решетки. Для возможно более широкополосного приема сигналов откликов желательно иметь размеры приемника как можно меньшими. Проблема снимается при использовании мультисенсорной системы с небольшими линейными размерами пластин емкостного приемника при условии многократного импульсного возбуждения объекта контроля.

Высокое отношение сигнал/шум откликов дают возможность надежно оценивать изменение тех или иных параметров за счет изменения дефектности и напряженно-деформированного состояния. Указанные выше предпосылки легли в основу разработки лабораторного макета мультисенсорной системы контроля дефектности и напряженно-деформированного состояния на основе явления механоэлектрических преобразований. Блок-схема мультисенсорной системы контроля приведена на рис. 1.

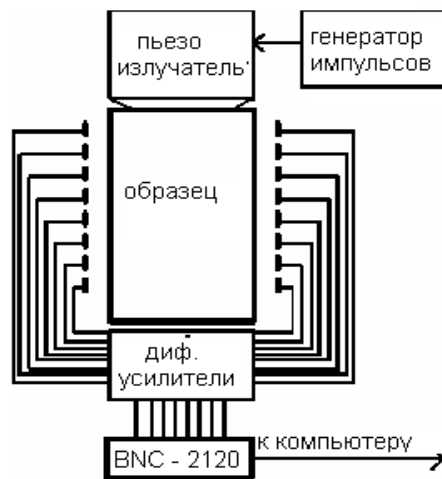


Рисунок 1. Блок-схема измерений.

Образец возбуждается заданным числом коротких акустических импульсов (ударов) определенной формы и амплитуды с помощью пьезоэлектрического преобразователя, на который подается сигнал с электрического высокоточного генератора с регулируемой формой выходного сигнала. Отклик воспринимается системой емкостных дифференциальных



датчиков. Каждый дифференциальный емкостный датчик состоит из 2-х приемных пластин, измерительного тракта, с которого сигнал через блок коммутации BNC - 2120 поступает на многофункциональную плату сбора данных PCI – 6251 компьютера, в котором формируется база данных для дальнейшей обработки. При этом система предусматривает производить оцифровку сигнала с заданным шагом дискретизации, оптимальным для решения различных задач при сравнительном анализе. Форма и количество приемников определяется задачами эксперимента.

Для апробации мультисенсорной системы были проведены эксперименты по регистрации электрических откликов из образца, изготовленного из эпоксидной смолы с наполнителем из песка, содержащего кварц. Использовалась система приемников в количестве 20 шт., каждый в виде квадрата со стороной в 1 см. Форма импульса выбиралась таким образом, чтобы его спектр был в диапазоне (5 – 100) кГц. Частота оцифровки составляла 800 кГц. Количество повторных ударов – 60. Было показано, что на низких частотах (до 18 кГц) формы их практически совпадают. На всех АЧХ присутствует острый пик на частоте около 12 кГц, который является частотой собственных колебаний образца. Спектральные характеристики в высокочастотной области образца индивидуальны для каждого датчика. Существенные различия в АЧХ спектров наблюдаются в диапазоне (40 – 80) кГц.

Эксперименты показали, что измерения приемником сигнала с размерами, соизмеримыми с размерами грани образца, не дают преимуществ по чувствительности, а АЧХ имеют менее выраженные особенности на высоких частотах, что говорит в пользу использования емкостных датчиков малых размеров.

**В третьей главе** приведены результаты исследований чувствительности мультисенсорной системы контроля к дефектности объектов контроля из композитных материалов. Была осуществлена проверка чувствительности аппаратуры к изменению искусственно созданной дефектности, а также к накопленным дефектам в условиях одноосного сжатия образца.

Для проведения испытаний с искусственной дефектностью были проведены следующие эксперименты. В образце размером 100x80x60 мм<sup>3</sup> из смеси эпоксидной смолы и кварцевого песка создавался дефект в виде отверстия диаметром 2.4 мм, глубина которого последовательно увеличивалась

сверлением до значений 2, 5, 10 мм. Образец с заданной глубиной отверстий возбуждался серией из 33 калиброванных импульсов. Рассчитывались средние значения откликов, а также среднеквадратичные отклонения для каждого значения временной выборки откликов по ансамблю ударов для каждого приемника. Для каждого приемника были рассчитаны разности откликов при разной глубине отверстий с откликом из образца без отверстий. Было показано, что соотношение сигналов разности для одного и того же датчика по уровню и форме различаются, что свидетельствует о разном влиянии глубины отверстия на перераспределение акустических волн. Наибольшее соотношение разностей от глубины отверстия наблюдается для датчиков, находящихся вблизи отверстий.

Для оценки достоверности полученных результатов был использован метод статистической проверки гипотез, основанный на распределении Стьюдента. Показано, что даже при самом слабом отличии сигнала отклика при глубине отверстия в 2 мм от исходного сигнала имеются временные области, где разницы в откликах не являются случайными.

Для проверки возможности аппаратуры по исследованию дефектности, обусловленной напряженно-деформированным состоянием, использовалось одноосное сжатие образца на прессе. Форма импульса возбуждения выбиралась в диапазоне (5 – 100) кГц. Периодичность оцифровки составляла 1 мкс. Количество повторных ударов – 80. Определялись средние значения по совокупности откликов с одного из приемников при каждом значении нагрузки, а также их среднеквадратичные отклонения. Сначала на образец подавалось начальное давление 1.3 МПа. Затем давление последовательно повышалось. Для оценки степени дефектности осуществлялись сбросы давлений с уровней 12.8 МПа и 25.6 МПа до начального 1.3 МПа. Рассчитывались разности средних значений откликов относительно среднего значения отклика при начальном давлении.

На рис. 2 показан отклик при начальном давлении (а), разностные отклики: при нагружении до 12.8 МПа (b); при нагружении до 25.6 МПа (c); после разгрузки с уровней 12.8 МПа (d) и 25.6 МПа (e).

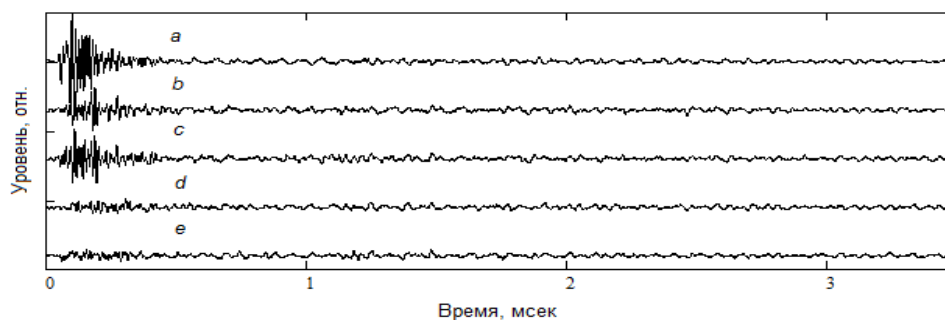


Рисунок 2. Отклики сигналов. *a* - отклик при начальном давлении; *b, c, d, e* - разностные отклики.

Естественно предполагать, что разностные отклики содержат в себе информацию как об обратимых процессах в образце, связанных с его упругими свойствами, так и о необратимых, в число которых могут входить вновь образованные под действием нагрузки на образец дефекты, искажающие фронты акустических волн. Из кривых (*d*) и (*e*) рис. 2 видно, что имеет место заметные различия между откликами при начальном давлении и откликами после сброса давлений. Эти различия характеризуют необратимые процессы, происходящие в образце, подвергнутом механическим нагрузкам.

Как видно из рисунка 2, отклики, обусловленные обратимыми структурными изменениями при указанных нагрузках, значительно выше необратимых.

Проведенные эксперименты показали, что аппаратура мультисенсорного контроля позволяет надежно контролировать объемные дефекты, а также может быть использована для исследования дефектности диэлектрических материалов в условиях напряженно-деформированного состояния.

**Четвертая глава** посвящена рассмотрению возможности использования мультисенсорной системы для контроля напряженно-деформированного состояния. Была поставлена задача по выбору полос частот, в которых возможно однозначное определение относительной степени напряженно-деформированного состояния или абсолютного его значения по экспериментальным данным. С использованием мультисенсорной системы контроля были зарегистрированы электромагнитные отклики при импульсном акустическом возбуждении образца, подвергающегося ступенчатому одноосному сжатию.

Был применен частотно-временной подход. В основе его было положено использование характеристик аналитического сигнала, полученного из

временной реализации электромагнитного отклика с использованием преобразования Гильберта в заданной полосе частот. Из спектра временной реализации отклика вырезалась, с использованием скользящего окна, спектральная полоса заданной ширины, а затем обратным преобразованием Фурье восстанавливается временной отклик.

На рис. 3 показаны выборочные контурные графики огибающих аналитических сигналов электромагнитных откликов от давления на образец в диапазонах скользящего окна.

Как видно из рисунка, в низкочастотном диапазоне частот нет выраженных особенностей, которые можно было бы однозначно связать с давлением на образец (рис. 3 а, б). В частотном диапазоне (33 – 43) кГц и (41 – 51) кГц наблюдаются монотонные убывание локальных максимумов огибающих от нагрузки, при этом их значения монотонно смещаются во времени (рис. 3 в, г). В диапазоне частот (55 – 60) кГц также видны размытые из-за более узкой полосы частот временные смещения пиков (рис. 3 д). В области более высоких частот не наблюдаются явные, однозначно связанные со степенью нагрузки, изменения огибающих аналитического сигнала (рис. 3 е).

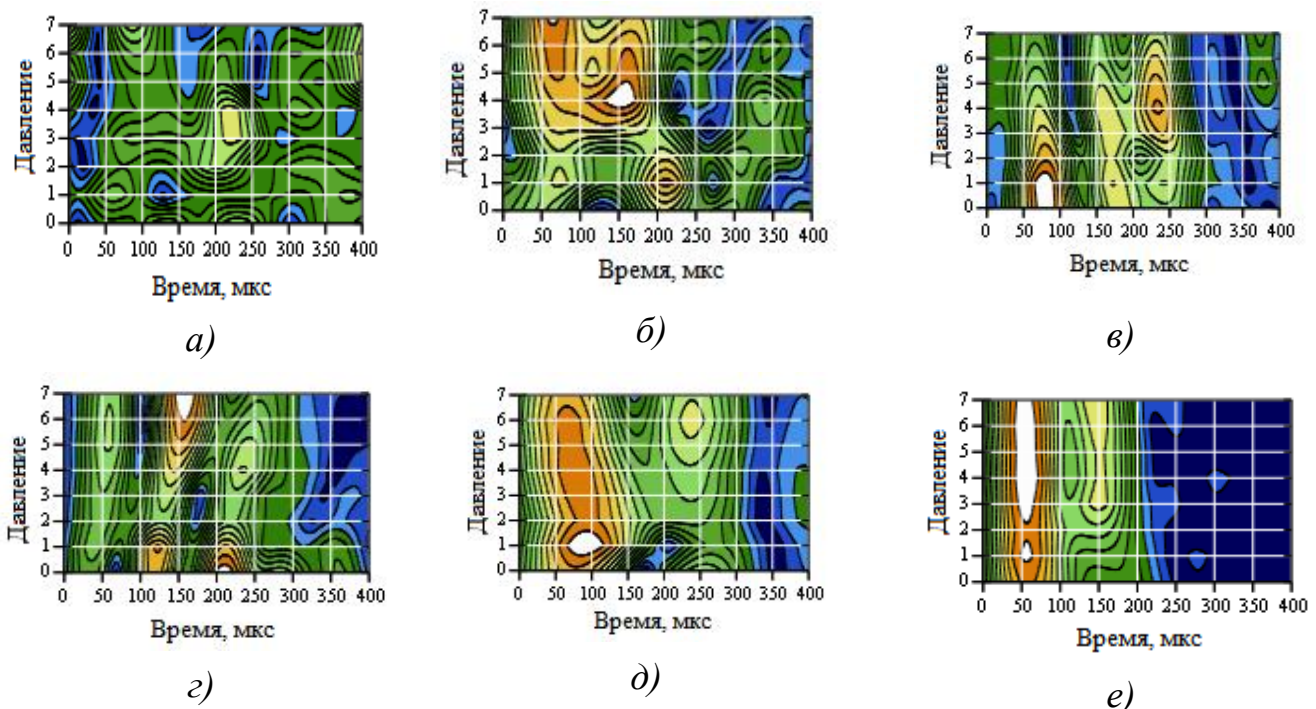


Рисунок 3. Контурные графики огибающих аналитических сигналов временных электромагнитных откликов от давления сжатия в различных диапазонах частот.

Таким образом, варьирование частотным диапазоном помогает обнаруживать однозначные изменения параметров огибающей аналитического

электромагнитного сигнала от сжимающей нагрузки. Имея заранее полученные зависимости, можно по данным откликов определить абсолютные значения напряженно-деформированного состояния одного и того же объекта исследования.

Для оценки абсолютных значений напряженно-деформированного состояния объекта контроля по предварительно полученному семейству импульсных характеристик объекта исследования для заданных уровней напряженно-деформированного состояния был использован также метод оптимальной фильтрации. Согласованный входной сигнал является зеркальной копией импульсной характеристики системы.

Имея набор импульсных характеристик при разных уровнях напряженно-деформированного состояния исследуемого образца и при подаче на вход зеркальных копий этих импульсных характеристик можно оценивать по откликам, при какой из импульсных характеристик будут наилучшим образом выполняться условия оптимальности.

С использованием мультисенсорной системы для каждого пространственно разнесенного приемника была получена своя импульсная характеристика. Ее инвертированное значение преобразовывалось в аналоговый электрический сигнал, который подавался на вход возбуждающего устройства мультисенсорной системы. Образец подвергался заданному одноосному сжатию в прессе.

На рис. 4 снизу вверх показаны отклики с одного из датчиков при одноосном сжатии образца давлением (0.05, 2.5, 5, 8) МПа соответственно.

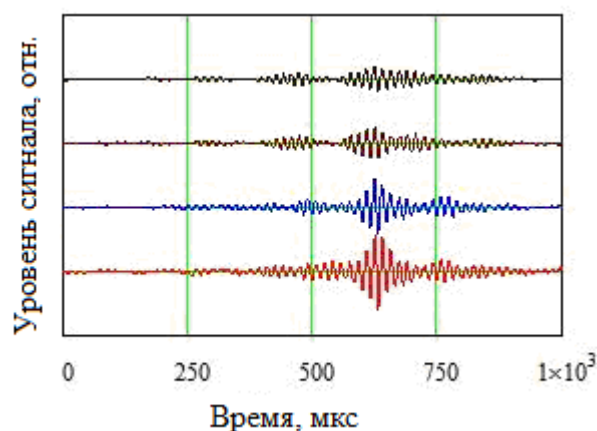


Рисунок 4. Отклики (снизу вверх) при сжатии образца давлением (0.05, 2.5, 5, 8) МПа соответственно от инверсной импульсной характеристики, снятой при нагрузке 0.05 МПа.

Как видно из рисунка, формы откликов при разных давлениях на образец отличаются. Наибольшая крутизна пика огибающей отклика имеет место при таком давлении на образец, при котором была получена импульсная характеристика. На основании полученных данных был сделан вывод о том, что использование принципа оптимальной фильтрации создает предпосылки для разработки метода определения абсолютных значений напряженно-деформированного состояния однотипных объектов.

**В пятой главе** дана оценка возможности мультисенсорной системы по контролю дефектности диэлектрических структур по параметрам электромагнитной эмиссии (ЭМЭ). С использованием мультисенсорной системы произведена регистрация электромагнитных откликов (ЭМО) и ЭМЭ из образца при одноосном ступенчатом сжатии вплоть до разрушения. Образец для эксперимента был изготовлен из эпоксидной смолы с наполнением в виде песка, содержащего кварц.

Спектры сигналов ЭМЭ и ЭМО имеют существенные различия. Если верхняя граница спектра ЭМО лежит в области 90 кГц, то основная энергия спектров ЭМЭ лежит в диапазоне (100 – 320) кГц.

При принятии гипотезы о механизме возникновения ЭМЭ как механоэлектрических преобразованиях акустических волн, генерируемых развивающимися трещинами, различия объясняются более высоким частотным диапазоном импульсов акустической эмиссии. Наблюдаемая верхняя спектральная граница импульсов ЭМЭ определяется полосой пропускания усилителя мультисенсорной системы контроля. Более быстрое затухание импульсов ЭМЭ по сравнению с импульсами ЭМО связано с тем, что высокочастотные волны затухают в образце быстрее низкочастотных.

Проведены исследования составляющей сигнала ЭМЭ в шуме отклика при импульсном возбуждении для дальнейшей выработки критерия оценки структурных изменений материала в условиях напряженно-деформированного состояния.

В условиях стационарного шума, не связанного с исследуемым процессом, можно получить оценку ЭМЭ по изменению среднеквадратичных отклонений (СКО) временных реализаций для каждого отклика при соответствующей нагрузке. Анализ СКО откликов показал, что визуально видимые выбросы оказывают большое влияние на их величину. Поэтому был

сделан расчет по указанной выше процедуре, но при этом визуально видимые выбросы программным способом были заменены средними значениями СКО.

На рис. 5 показаны зависимости среднеквадратичных отклонений от нагрузки с учетом влияния видимых выбросов (2) и без их учета (1).

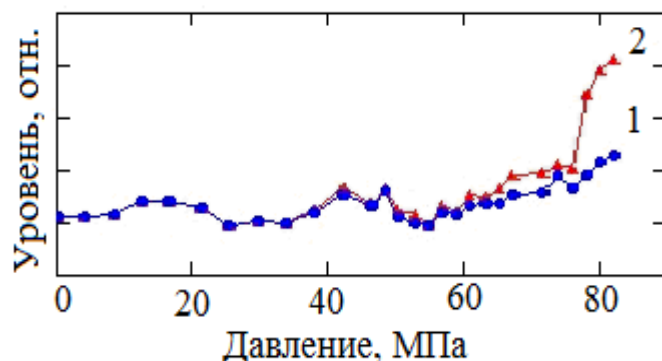


Рисунок 5. Зависимость СКО от уровня нагрузки. 1 – с учетом выбросов, 2 – без их учета

Как видно из рисунка, видимые выбросы вносят существенный вклад в среднеквадратичное отклонение случайной составляющей отклика, начиная с нагрузки 77 МПа. ЭМЭ малого уровня также вносит свой вклад в шумовую составляющую, СКО которой устойчиво растет от нагрузки, начиная с уровня 55 МПа. Можно сделать вывод, что СКО случайной составляющей отклика, связанные через ЭМЭ с дефектностью и являются информативными для контроля последней в условиях напряженно-деформированного состояния материала.

Для возможности оценивания параметров ЭМЭ возникающей непосредственно при дефектообразовании с использованием мультисенсорной системы контроля был проведен следующий эксперимент. Образец из эпоксидной смолы с песчаным наполнителем нагружался ступенчатой нагрузкой вплоть до разрушения. Для улучшения чувствительности аппаратуры к импульсам ЭМЭ был использован один емкостный приемник с поверхностью пластины размером близким к площади боковой поверхности образца. На каждой ступеньке давления образец возбуждали серией из 141 импульса заданной формы. Из временных реализаций отклика при каждой нагрузке вычитались детерминированные составляющие отклика. Оказалось, что импульсы ЭМЭ близки по форме, хотя имели большой разброс по уровню. Сходство формы импульсов ЭМЭ делает возможным использование метода оптимальной фильтрации для их выделения из шумовой составляющей.

Для этого была произведена свертка зеркального отображения сигнала ЭМЭ с фрагментами временной реализации, последовательно вырезаемыми



скользящим окном шириной импульса ЭМЭ, что позволило переформатировать стохастическую составляющую сигнала отклика в новый сигнал, в котором уровень импульсов ЭМЭ указанной формы относительно шума становится выше. Такая процедура была проделана для всех реализаций при каждой нагрузке. Затем были рассчитаны распределения импульсного потока для каждой нагрузки.

На рис. 6 показаны огибающие гистограмм распределений в двойных логарифмических координатах при четырех нагрузках: 8, 55, 74, 82 МПа. Для наглядности распределение при нагрузке 8 МПа смещено вниз. Из формы распределения при нагрузке 8 МПа видно, что степенной составляющей в ней нет. Подобный же характер носят распределения при нагрузках ниже уровня 0.4 от разрушающей. Распределения при нагрузках 55, 74, 82 МПа имеют сложный вид.

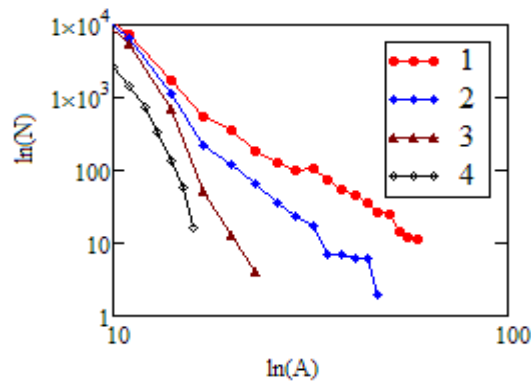


Рисунок 6. Гистограммы распределения количества  $N$  импульсов от амплитуд  $A$  при нагрузках: 82 МПа – (1); 74 МПа – (2); 55 МПа – (3); 8 МПа – (4).

До 10 уровня все распределения сливаются, не имеют выраженной степенной составляющей и обусловлены, вероятно, смесью шума и импульсами ЭМЭ, хаотично распределенными по образцу. На более высоком уровне в распределениях проявляется степенная составляющая (распределения «выпрямляются»). При этом наклон прямых распределений с ростом нагрузки закономерно уменьшается относительно оси абсцисс, что свидетельствует об увеличении абсолютного значения показателя степени функции распределения, что, вероятно, можно связать с долговечностью образца при данной нагрузке.

Характер распределений ЭМЭ под нагрузкой дает основание для разработки методов оценки долговечности испытуемого объекта при заданной нагрузке. Исследование ЭМЭ может служить полезным дополнением при



анализе дефектности и напряженно-деформированного состояния в совокупности с данными детерминированной составляющей мультисенсорной системы контроля.

#### **Основные выводы по работе.**

1. Разработан и изготовлен макет мультисенсорной системы для контроля дефектности и напряженно-деформированного состояния гетерогенных материалов.

2. Установлено, что мультисенсорная система контроля имеет высокую чувствительность к объемной дефектности материала и к изменению его напряженно-деформированного состояния.

3. Показана возможность мультисенсорной системы контроля оценивать соотношения обратимых и необратимых процессов в условиях напряженно-деформированного состояния.

4. Благодаря высокой чувствительности системы к изменению напряженно-деформированного состояния обеспечивается возможность определения абсолютных значений нагрузок, под которым находится обследуемая конструкция с применением метода оптимальной фильтрации.

5. Продемонстрирована возможность использования мультисенсорной системы контроля для исследования напряженно-деформированного состояния по параметрам электромагнитных откликов.

6. Показана возможность использование мультисенсорной системы для неразрушающего контроля по параметрам электромагнитной эмиссии.

**Основные научные результаты диссертации опубликованы в следующих работах:**

1. Суржиков В.П., Хорсов Н.Н., Хорсов П.Н. К вопросу об оптимальном спектре импульсного возбуждения в методе механоэлектрических преобразований [Электронный ресурс] // Вестник науки Сибири. - 2011 - №. 1 (1). - С. 187-192. - Режим доступа: <http://sjs.tpu.ru/journal/article/view/43/72>

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., Хорсов П.Н., Васендина Е.А., Наманжуев Э.Д. К вопросу о спектральной чувствительности метода механоэлектрического преобразования при контроле напряженно-

деформированного состояния // Контроль. Диагностика. - 2012 - №. 13 - С. 73-77

4. Суржиков В.П., Хорсов П.Н., Хорсов Н.Н. Особенности откликов мультисенсорной системы контроля при изменении напряженно-деформированного состояния образца [Электронный ресурс] // Современные проблемы науки и образования. - 2012 - №. 5. - С. 140. - Режим доступа: <http://www.science-education.ru/105-7286>

5. Суржиков В.П., Хорсов Н.Н., Хорсов П.Н. Влияние объемной дефектности на пространственно-временные характеристики электромагнитного отклика при акустоэлектрических преобразованиях в диэлектрических образцах // Дефектоскопия. - 2012 - №. 2 - С. 15-20

6. Хорсов П.Н. Использование преобразование Гильберта для контроля напряженно-деформированного состояния диэлектрических материалов при механоэлектрических преобразованиях // Ресурсоэффективные системы в управлении и контроле: взгляд в будущее: сборник научных трудов II Международной конференции школьников, студентов, аспирантов, молодых ученых: в 4 т., Томск, 8-12 Октября 2013. - Томск: ТПУ, 2013 - Т. 1 - С. 227-230

7. Суржиков В.П., Хорсов Н.Н., Хорсов П.Н. О возможности использования мультисенсорной системы контроля для исследования электромагнитной эмиссии из образца под нагрузкой // Дефектоскопия. - 2013 - №. 11. - С. 67-71

8. Суржиков В.П., Хорсов Н.Н., Хорсов П.Н. О возможности использования мультисенсорной системы контроля для исследования дефектности диэлектрических материалов при одноосном сжатии // Известия вузов. Физика. - 2013 - Т. 56 - №. 1/2. - С. 261-264

9. Суржиков В.П., Хорсов Н.Н., Хорсов П.Н. О возможности использования фазовых характеристик аналитического сигнала отклика при механоэлектрических преобразованиях для контроля напряженно-деформированного состояния // Контроль. Диагностика. - 2013 - №. 9. - С. 17-21

10. Surzhikov V.P., Khorsov N.N., Khorsov P.N. The Effect of Local Heterogeneities on the Space- time Characteristics of Electromagnetic Responses at Mechanoelectrical Transformations in Dielectric Samples // 7th International Forum on Strategic Technology (IFOST - 2012): Proceedings: in 2 vol., Tomsk, September 18-21, 2012. - Tomsk: TPU Press, 2012 - Vol. 2 - p. 314-317

11. Surzhikov V.P., Khorsov N.N., Khorsov P.N. The Effect of Volumetric Defectiveness on the Spatiotemporal characteristics of an Electromagnetic Response during Acoustoelectric Transformations in Dielectric Specimens // Russian Journal of Nondestructive Testing . - 2012 - Vol. 48 - №. 2 - p. 85-89

12. Surzhikov V.P., Khorsov N.N., Khorsov P.N. On the Possible Use of a Multisensor Test System for the Study of Electromagnetic Emissions from a Sample under Load // Russian Journal of Nondestructive Testing . - 2013 - Vol. 49 - №. 11. - p. 664-667