

УДК 539.1

И.В. Кандрачук, канд. техн. наук

## Сопоставительный анализ методов определения технического состояния электроакустических преобразователей

В работе рассмотрены и сопоставлены возможности использования существующих методов неразрушающего контроля применительно к диагностике технического состояния электроакустических преобразователей.

In-process considered and confronted possibility of the use of existent methods of non-destructive control as it applies to diagnostics of the technical state of electro-acoustic transformers.

**Ключевые слова:** преобразователь пьезокерамический, дефектоскопия, виброметрия, методы неразрушающего контроля

### Введение

Теория электроакустических преобразователей в определенной мере, позволяет качественно и количественно определять основные акустические параметры преобразователей, но не может ответить на вопросы, связанные с механической и усталостной прочностью преобразователей. Поэтому необходимы методы и средства, которые позволили бы, как теоретически, так и экспериментально, решить эти вопросы и, в частности, определять техническое состояние преобразователей на любой стадии их лабораторных испытаний. Такие задачи можно решить лишь применением средств и методов технической диагностики. Задача технической диагностики применительно к пьезоэлектрическим преобразователям, с учетом современных требований, состоит в следующем.

На основе известных методов и средств неразрушающего контроля создать систему технической диагностики пьезокерамических преобразователей, позволяющей с достаточной надежностью и достоверностью оценивать их техническое состояние на различных стадиях испытаний. Такая диагностическая система должна базироваться на наиболее информативных и контролируемых методах и средствах, учитывать доступ и специфику работы пьезокерамических преобразователей, должна обладать алгоритмической гибкостью и возможностью автоматизации.

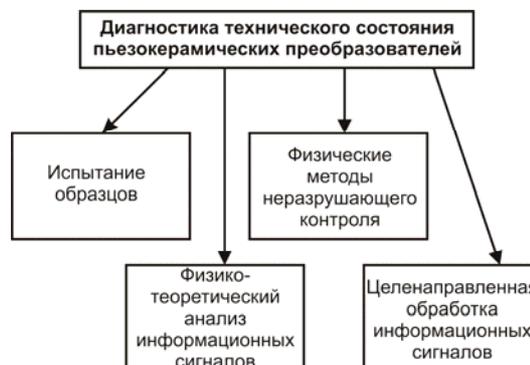


Рис. 1. Структурная схема диагностической системы пьезокерамических преобразователей

Обширный анализ научно-технической и патентной информации показывает, что в настоящее время еще не существует единого методологического подхода к диагностике пьезокерамических преобразователей.

В ряде отечественных и зарубежных работ [1-21], посвященных неразрушающему контролю пьезокерамических преобразователей, исследованы некоторые физические методы контроля, их метрологическое обеспечение и информационные характеристики. Однако каждый из методов исследовался отдельно и независимо друг от друга. Слабо освещены вопросы выбора информативных признаков и оценки их информативности. В основном все работы были посвящены дефектоскопии отдельных пьезоэлементов. Основным недостатком многих физических методов неразрушающего контроля пьезокерамических преобразователей является то, что информативные признаки в сигнале оказались без анализа его тонкой структуры, без предварительной целенаправленной обработки сигнала. Характерным является и тот факт, что информационные сигналы не подвергались и их физической расшифровке, дающей представления о конкретных изменениях в пьезокерамических преобразователях. Лишь в немногих работах [1,2,3] затронут вопрос взаимосвязи параметров дефекта и параметров информационного сигнала.

В сущности, задача технической диагностики пьезокерамических преобразователей, учитывающая многообразие и взаимосвязь их параметров, не формулировалась, не сформули-

рованы и классификационные критерии принятия решений о техническом состоянии. Не была построена модель пьезокерамического преобразователя как объекта контроля. Отсюда отсутствие фундаментальных предпосылок для их технического прогнозирования.

По своей технической сущности пьезокерамические преобразователи могут быть отнесены к линейным, непрерывным, многомерным резонансным динамическим системам. Серьезное отношение к диагностике таких сложных электромеханических колебательных систем предлагает использование системного подхода к выбору рациональной совокупности методов и средств контроля. Сущность такого подхода заключается в оптимальном сочетании разносторонних информативных признаков, определением меры их взаимосвязи, сочетанием методов локальной и интегральной диагностики, методов неразрушающего и разрушающего контроля, разрабатываемых на основе различных физических полей, присущих пьезокерамическим преобразователям, а также сочетанием инструментальных методов и физико-теоретическим обоснованием исследуемых признаков.

С точки зрения информации [4] работу пьезокерамического преобразователя можно описать следующим выражением:

$$y(t)=A(t,U)z(t) \quad (1)$$

$y(t)$  - выходной сигнал;

$z(t)$  – входное воздействие.

Оператор  $A(t,U)$  зависит от времени  $t$  и вектора случайных параметров  $U$  пьезокерамического преобразователя. Особенностью пьезокерамического преобразователя, как объекта контроля, является определенная случайность вектора параметров  $U$ , связанная с процессом их производства и эксплуатации. При изготовлении преобразователей наблюдается технологический разброс параметров относительно своих номиналов. Для пьезокерамических преобразователей с номинальными параметрами, в процессе эксплуатации, такие возмущающие факторы как температура, давление, влажность, механические возмущения, процессы старения и усталости, электрические и магнитные воздействия вызывают медленное изменение параметров, т. е. время этого изменения намного превышает время переходного процесса в преобразователе. В этом определенная трудность диагностики пьезокерамических преобразователей, поскольку накладываются большие требования к чувствительности и точности диагностической аппаратуры.

Так как явления, вызывающие разброс параметров преобразователя, действуют случайно и, часто, независимо друг от друга, то и параметры являются случайными величинами. Такой подход в дальнейшем позволит применить для анализа технического состояния преобразователей хорошо разработанные статические методы.

Для пьезокерамических преобразователей целесообразно использовать следующие методы диагностирования: функциональные, тестовые, параметрические и комплексные.

При параметрическом методе контроля работоспособность преобразователя оценивается измерением параметров и сравнением их с допусками или с эталонами. Параметрический контроль прост в технической реализации, позволяет диагностировать преобразователи до сравнительно глубокого уровня. Однако, при таком контроле возможны ошибочные принятия решений. Например, при выходе параметра за допуск преобразователь должен браковаться, хотя это не означает, что показатель качества вышел за установленные пределы и преобразователь является неработоспособным. Выход параметра за допуск может компенсироваться отклонениями других параметров. Поэтому, параметрический контроль затрудняет решение задачи прогнозирования технического состояния преобразователей, проведение интегральной сравнительной оценки конкретных преобразователей. Кроме этого, много параметров пьезокерамических преобразователей являются расчетными. Это накладывает существенные ограничения на автоматизированность проведения параметрического контроля.

При тестовом диагностировании на пьезокерамический преобразователь подаются специально сформированные, изменяющиеся во времени стимулирующие сигналы. По измеренным характеристикам отклика преобразователя на тестовые сигналы, по сравнению с допусками или эталонами, принимается решение о техническом состоянии преобразователя. В работах [5,6] показана возможность сочетания параметрического и тестового методов контроля, когда по характеру отклика преобразователя на тестовый сигнал имеется возможность судить о некоторых параметрах преобразователя. Характеристики отклика преобразователя могут быть в общем случае временные (переходной процесс, корреляционная функция) и частотные (амплитудно-частотные характеристики, спектр и т. д.). тестовое диагностирование пьезокерамических преобразователей в основном определяет их интегральные характеристики. Если в

качестве объекта диагностирования выбирается пьезокерамический преобразователь в целом, то можно рекомендовать тестовый метод диагностирования. Техническая реализация метода наиболее сложна по сравнению с другими методами диагностирования, характеризуется высокими требованиями, предъявляемыми к точностным характеристикам аппаратуры контроля.

Функциональное диагностирование пьезокерамических преобразователей используется для качественной оценки его функциональных свойств (нахождение параметров или характеристик выходных сигналов в пределах при которых сохраняются функциональные свойства преобразователей). Для этого вида контроля характерны простые методики проверки параметров, относительно малое время контроля. Однако в этом случае, как правило, нельзя получить количественные оценки, характеризующие техническое состояние преобразователя.

При диагностировании пьезокерамических преобразователей до глубокого уровня (уровень механического и электрофизического состояния каждого пьезоэлемента активной части и каждого элемента его конструкции) необходимо использовать комбинированный, комплексный метод диагностики, т.к. диагностика на таком уровне предполагает использование всех доступных методов и средств контроля. Следует отметить, что выбор наиболее рациональной совокупности параметров и методов в каждом конкретном случае представляет собой весьма сложную задачу. Не существует единой точки зрения для решения этого вопроса. Целью статьи является физико-техническое обоснование построения оптимальной совокупности параметров и методов диагностирования с точки зрения теории информации.

### **Физические методы неразрушающего контроля пьезокерамических преобразователей**

В введении были сформулированы общие задачи диагностики пьезокерамических преобразователей, выбрана соответствующая модель преобразователя как объекта контроля.

Техническое решение указанных задач предполагает привлечение для этого различных методов неразрушающего контроля, локальных и интегральных средств диагностики. В настоящее время проведено много исследовательских работ, по разработке и внедрению методов неразрушающего контроля применительно к пьезокерамическим преобразователям [7]. Если подвести краткий итог полученных результатов, то можно отметить, что дефектоскопия в пьезо-

технике, как наука и технические средства неразрушающего контроля, не могут удовлетворить в настоящее время все возрастающие требования к разработке, производству и эксплуатации пьезокерамических преобразователей. Как уже отмечалось, в пьезотехнике намечается тенденция органического сочетания теории электроакустических преобразователей с методами их технического анализа [3,8,9,10,11]. И действительно, стремление решить вопросы физики надежности обуславливает направление развития методов диагностики преобразователей по пути физико-теоретического анализа преобразователей. Практика показывает, что такой подход, совместно с традиционными эталонными методами, является очень плодотворным, поскольку позволяет расширить возможности применяемых методов диагностики и применить принципиально новые.

### **Метод свободных колебаний**

Свободные колебания — это в общем случае колебания любой системы, которые возникают в системе после кратковременного возмущающего внешнего воздействия. Параметры свободного колебания определяются только характеристиками самой системы и первоначально зависят от внешнего воздействия. С точки зрения контролепригодности свободные колебания пьезокерамических преобразователей являются очень удобным инструментальным средством, так как для регистрации самих свободных колебаний используется сам эффект преобразователя, без промежуточных преобразований.

Свободные колебания в пьезокерамическом преобразователе можно возбудить двумя путями: механическим или электрическим импульсом.

Механическое импульсное возбуждение преобразователей дает качественную сквозную характеристику отклика преобразователя. Однако практическая реализация механического импульсного возбуждения очень затруднительна. Это связано с трудностями получения стабильных механических импульсов длительностями не более 10 мксек, а также трудностями синхронизации.

Практическая реализация электрического импульсного возбуждения очень проста, легко поддается автоматизации. Поэтому в дальнейшем мы остановимся на свободных колебаниях преобразователей, возбуждаемых электрическими импульсами. Возбуждая диагностируемый преобразователь электрическим импульсом определенной формы и длительности и

анализируя колебания преобразователя, как системы с распределенными параметрами, можно получить информацию о качестве самого преобразователя. Действительно, в момент подачи электрического импульса на электроды преобразователя его поверхности начинают колебаться, излучая в тело преобразователя и в окружающее пространство упругие колебания, спектр которых зависит от электрических параметров импульса возбуждения и характеристик преобразователя. Прошедшие через преобразователь и несущие информацию о его качестве многократно отраженные от поверхностей упругие колебания регистрируются. При этом в работах [5,12] в качестве информативных параметров используются амплитуда и форма собственных механических колебаний преобразователя. В случае возбуждения качественного преобразователя на экране осциллографа наблюдается экспоненциально затухающий синусоидальный процесс. Если же механическая целостность преобразователя нарушена, то колебательная система преобразователя получает как бы дополнительные степени свободы, в результате чего весь процесс собственных колебаний меняется: основная частота расщепляется, появляются изгибные и другие формы колебания. Картина на экране осциллографа в этом случае резко искажается — на осциллограмме свободных колебаний появляются непериодические выбросы, биения и другие нерегулярности, по которым и определяют качество контролируемого преобразователя. В работе [1] теоретически исследовано возникновение переходного процесса в преобразователе при импульсном возбуждении.

На практике для характеристики свободных колебаний удобно пользоваться общим временем затухания  $T_{обш}$ , определяемых как время, в течение которого амплитуда свободного колебания уменьшается настолько, что становится соизмеримой с шумами электронной регистрирующей аппаратуры, характеризует свободный процесс и количество периодов колебаний  $n$ , вмещающихся в  $T_{обш}$ . Информативным является и поведение самой огибающей свободного процесса. В [13] для анализа свободных колебаний еще вводится энергетическая характеристика затухания свободного процесса, которая представляется как отношение начальной энергии, сообщенной преобразователю, к энергии потерь за один период.

При возбуждении преобразователей прямоугольными видео- или радиоимпульсами информативными являются уровни первоначальных положительных и отрицательных выбросов.

Вопрос применения метода свободных колебаний был бы не раскрыт без рассмотрения случая, когда на эквивалентную электрическую схему действует одиночный электрический импульс. Если такой импульс действует на преобразователь, имеющий массу  $m$ , упругость  $C$  и внутреннее трение  $\gamma$  (индуктивность  $L_m$ , емкость  $C_m$  и сопротивление механических потерь  $R_m$ ), то каждая из его спектральных составляющих будет возбуждать преобразователь так, как если бы на его входе действовало внешнее синусоидальное напряжение переменной частоты. Из этого следует, что чем больше гибкость преобразователя, тем больше амплитуда первоначального отклика преобразователя. Кроме этого при увеличении коэффициента трения  $\gamma$  амплитуда первоначального отклика будет резко уменьшаться. Этот вывод важен для диагностики, поскольку позволяет по уровню первоначального выброса судить о механических потерях в преобразователе  $t. e.$  о состоянии его активной части (перегрев, растрескивание и т. д.).

Свободные колебания были исследованы на основной частоте резонанса. Практически, и это очень важно, в реализации амплитудно-временной характеристики свободных колебаний принимают участие все гармоники, присутствующие исследуемому преобразователю, если только их охватывает спектр возбуждающего импульса. Энергетически вклад каждой такой гармоники можно определить, выполнив Фурье-преобразование свободного процесса. Подводя итог приведенным рассуждениям по анализу свободных колебаний пьезокерамических преобразователей, можно сделать вывод, что метод свободных колебаний весьма удобный для интегральной диагностики преобразователей. При корректном обращении метод позволяет судить о качестве диагностируемого преобразователя по совокупности перечисленных информативных признаках. Метод позволяет по характеристикам свободных колебаний определить некоторые параметры преобразователя, как, например, в работах [6,14].

При этом очевидно, что определение информационных признаков или параметров преобразователя по реализации свободного колебания очень трудоемко и требует много времени. Здесь мы сталкиваемся с проблемой качественной и быстрой обработки свободных колебаний. Для интегральной диагностики эту задачу можно решить, применяя аппаратный корреляционный анализ. На этой задаче мы остановимся подробнее при анализе корреляционного метода диагностики. Актуальной является

и задача описания свободных колебаний в зависимости от наличия определенных дефектов. Решение этой задачи принципиально возможно методами теории упругости и методами анализа эквивалентных электрических схем.

### Метод спектрального анализа

Пьезокерамические преобразователи, представляющие собой электромеханическую колебательную систему, помимо основной частоты резонанса характеризуются определенным спектром частот, зависящим от параметров активной части преобразователя и параметров присоединенного механического крепления. Совершенно очевидно, что сравнение спектров исследуемого и эталонного преобразователей позволит судить о механическом состоянии исследуемого преобразователя.

Измерять спектр преобразователя можно было бы через его амплитудно-частотную характеристику (АЧХ) (частотную зависимость полной входной проводимости). При этом необходимо было бы каждую гармонику на АЧХ пронормировать. Пронормированная АЧХ дает представление о частотно-энергетическом распределении в спектре преобразователя и является огибающей спектра. Такой способ измерения и исследования спектров преобразователей очень трудоемкий и имеет большие погрешности.

Спектры пьезокерамических преобразователей можно измерять автоматически и с малыми погрешностями, используя для этого свободные колебания преобразователей.

Методика спектрального анализа пьезокерамических преобразователей заключается в следующем: вначале необходимо провести анализ в широкой полосе, например от 0 до 100 кГц, возбуждая преобразователь видеоимпульсами длительностями не более 10 мксек. В результате такого анализа выявить наиболее чувствительные участки спектра к изменению конкретного технического состояния или возникновению определенного дефекта. Далее для увеличения информативности предлагается на выделенный узкий участок спектра сосредоточить всю энергию возбуждения. При этом преобразователь возбуждается коротким радиоимпульсом с частотой заполнения, равной центральной частоте выделенного участка спектра.

Для корректного использования достоинств спектрального метода анализа пьезокерамических преобразователей в каждом конкретном случае весьма актуально стоит задача физической расшифровки спектра. Это позволит делать выводы о конкретных изменениях техниче-

ского состояния преобразователей. Например, при исследовании спектра пьезокерамического преобразователя ИЗ-2 в диапазоне от 0 до 40 кГц (выше спектр не информативен). Первый 4 кГц всплеск соответствует основному высотному резонансу преобразователя. Всплески 9-10 кГц соответствуют первому изгибному резонансу рабочей накладки. Это подтверждает модовый анализ. Всплеск в районе 14 кГц соответствует радиальному резонансу активной части преобразователя, на что указывают аналитические расчеты. Всплеск в районе 19-21 кГц соответствует второму изгибному резонансу рабочей накладки, что также подтверждается модовым анализом. Группа всплесков в районе 27-33 кГц присуща несомненно активной части преобразователя, хотя сам механизм этих колебаний еще не раскрыт. Таким образом имеется реальный физический спектр исследуемого преобразователя, который можно взять в качестве эталона. При наличии в исследуемом спектре изменений, по сравнению с эталонным, можно сделать вывод о конкретном изменении технического состояния преобразователя.

Особо заслуживает внимания и энергетическое соотношение между перечисленными гармониками. Очевидно, что в качестве информативных признаков в спектральном анализе может быть огибающая спектра, состав спектра, соотношения между конкретными составляющими спектра и т.д.

### Метод корреляционного анализа

Задача метода заключается в дополнительном повышении информативности свободных колебаний за счет учета тонких изменений и различных нерегулярностей в сигнале. Решение такой задачи возможно лишь с применением корреляционного или регрессионного анализа.

Сущность корреляционного метода диагностики заключается в отыскании функции или нормированных коэффициентов взаимокорреляции свободных колебаний эталонного и исследуемого преобразователей. По величине этих коэффициентов, с учетом допустимой дисперсии рассеивания, можно судить о техническом состоянии преобразователя.

На практике можно ограничиться рассмотрением и анализом первой группы всплесков, поскольку она является наиболее информативной. По относительному или абсолютному (нормированная функция или коэффициент взаимокорреляции) уровню основных всплесков и можно принимать решение о техническом состоянии исследуемого преобразователя. Ис-

следования показывают высокую чувствительность корреляционных функций к изменениям параметров возбуждающих импульсов и параметров свободных колебаний. Что позволяет предположить, что метод корреляционного анализа будет одним из основных для технической диагностики пьезокерамических преобразователей.

### **Метод анализа электрофизических параметров**

Существует множество пьезоэлектрических, диэлектрических и упругих параметров, характеризующих техническое состояние пьезокерамических преобразователей. В использовании комплексных измерений этих параметров на электрической стороне преобразователя и заключается диагностический метод анализа электрофизических параметров преобразователей. Главное достоинство метода состоит в том, что его применение в ряде случаев позволяет проводить технический анализ пьезокерамических преобразователей до глубокого уровня (уровня электрофизического состояния активной части преобразователей). Аппаратурная реализация метода предъявляет высокие требования к точностным характеристикам измерительной аппаратуры. Кроме этого, многообразие и сложность взаимосвязей пьезоэлектрических, диэлектрических и упругих параметров предъявляет своеобразные требования к их измерению и в методическом плане. Особенностью диагностических измерений пьезокерамических преобразователей является и их комплексность. Это значит, что для точного определения корреляционных зависимостей различных параметров необходимо эксперимент так планировать, чтобы интересующие зависимости определялись одновременно за один измерительный цикл.

### **Метод анализа механического состояния. Виброметрия**

Особый интерес представляют совмещенные сквозные измерения с электрической и механической стороны преобразователя. Хотя такие измерения и трудоемки, но дают качественно новую информацию о техническом состоянии исследуемого преобразователя. Действительно, при номинальных режимах работы пьезокерамических преобразователей, вся присоединенная механическая часть, рабочая накладка преобразователя колеблется с определенными амплитудами. Распределение и уровень амплитуд вибросмещения в конечном итоге зависит от

упругих, пьезоэлектрических параметров преобразователя, состояния и прочности узла армирования, состояния акустической развязки и т. д.

При этом актуальной является и задача внедрения в практику исследований бесконтактных методов измерений смещений, например с использованием достоинств лазерной интерферометрии или доплеровского эффекта. Эти методы позволяют в основном определять интегральную картину распределения вибросмещений с разрешающей способностью от единиц до десятков ангстрем. Не менее важным является проведение измерений локальных, точечных вибросмещений. При этом, как правило, используют акселерометры с резьбовым креплением. Возможны и другие методы измерения локальных вибросмещений, например с использованием эффекта Мессербауэра, основанном на частотной расстройке резонансного взаимодействия радиоизотопов [9,11] в специальном датчике, в зависимости от механического смещения одной из мембран, связанной игольчатым штоком с вибрирующей точкой преобразователя.

Помимо относительных исследований вибропараметров для диагностики по эталонному принципу, очень важными являются абсолютные сквозные диагностические измерения с электрической и механической сторон.

Практика показывает, что для диагностирования механических дефектов, связанных с понижением механической прочности, целесообразно применять виброметрию. Это позволит повысить точность и чувствительность контроля. Действительно, в работе [7], описан способ неразрушающего контроля целостности пьезоэлементов в закрытых преобразователях путем выделения области первого антирезонанса на кривой полной электрической проводимости эталонного и контролируемого преобразователя и определения отношения проводимости на антирезонансе и проводимости в фиксированной точке вне области основного антирезонанса. По величине этого соотношения, в сравнении с подобным отношением для эталонного преобразователя, судят о целостности контролируемого пьезоэлемента.

Известен также способ [7] проверки механической целостности и прочности пьезокерамических преобразователей, заключающийся в их возбуждении электрическим напряжением на различных частотах и анализе его АЧХ. В работе [15] частоту этого электрического напряжения возбуждения преобразователя предлагает непрерывно изменять в пределах полосы про-

пускания в течение короткого времени (1 сек). Причем амплитуда испытательного возбуждающего напряжения в 1,3 раза превышает номинальную амплитуду напряжений.

По внешнему виду амплитудно-частотных характеристик эталонного и контролируемого преобразователя судят о механической целостности и прочности преобразователя.

Основным общим недостатком перечисленных способов является то, что нарушение механической прочности преобразователя ищется на электрической стороне преобразователя, по сути, по изменению параметров измерительной электрической цепи, к которой подключается контролируемый преобразователь.

Если же при изменении подаваемого на преобразователь напряжения на резонансе контролировать прямолинейность нарастания амплитуды колебательной скорости на рабочей накладке преобразователя, то по выявленной нелинейности можно с большей точностью диагностировать понижение механической прочности преобразователя.

Поскольку большинство виброизмерительной аппаратуры работает в диапазоне до 100 д, то виброизмерения пир номинальных режимах работы преобразователей (до 700 д) можно проводить на откалиброванном вольтметре.

### **Анализ тепловых режимов и распределение тепловых режимов**

В пьезокерамических преобразователях даже с большим коэффициентом связи (до 0,5) только половина подведенной электрической энергии преобразуется в возбуждение полезных механических колебаний, а остальная энергия преобразуется в необратимые тепловые потери. Тепловые потери в пьезокерамических преобразователях распределяются по сложным закономерностям и, конечно же, в зависимости от наличия дефектов в исследуемом преобразователе. Если бы удалось построить или измерить всю тепловую модель эталонного пьезокерамического преобразователя, то любые температурные аномалии в исследуемом преобразователе, любые отступления от заданных температурных режимов, какими бы причинами они ни вызывались, представляют собой свидетельство потенциальной ненадежности преобразователя.

Эталонное тепловое поле может быть определено как методами математического моделирования, так и экспериментальным путем. Математическое моделирование теплового поля — задача трудная и недостаточно разработанная. По-видимому, целесообразным является

экспериментальное построение тепловой модели пьезокерамического преобразователя. Для экспериментального определения эталонного теплового поля преобразователя применимы контактные и бесконтактные методы. Современные методы термографии представляют широкие возможности для совершенствования средств теплового контроля. Методы теплового контроля пьезокерамических преобразователей могут быть основаны только на излучении преобразователями электромагнитной энергии в инфракрасной области спектра.

Для анализа тепловых полей в пьезокерамических преобразователях с целью дефектоскопии характерен тот недостаток, что контроль необходимо производить в очень короткие промежутки времени, так как из-за собственной теплопроводности пьезокерамики полученная тепловая картина быстро «расплывается».

Для пьезокерамических преобразователей можно применит еще один метод теплового контроля — контроль температурного режима при работе преобразователя.

Метод заключается в том, что контролируемый преобразователь возбуждается на основной резонансной частоте в непрерывном режиме при номинальном уровне напряжения. При этом контролируется нарастание температуры с течением времени в узловой плоскости преобразователя. При наличии трещин в активной части, перегрева, расстояний и т.д. скорость нарастания температуры резко повышается. Изменение скорости нарастания температуры также происходит при изменении армирующих усилий преобразователя.

Хорошо коррелируется скорость нарастания температуры с сопротивлением механических потерь преобразователя на резонансе и с величиной угла диэлектрических потерь.

### **Модовый анализ**

При диагностике технического состояния пьезокерамических преобразователей, как сложных электромеханических систем, существенную роль играет исследование собственных форм колебаний преобразователей. Эту задачу успешно можно решить применением модового анализа. Разумеется, что сам по себе модовый анализ не может дать исчерпывающего ответа о техническом состоянии преобразователя, однако он цене своей возможностью исследовать сложные формы колебаний простых и связанных колебательных систем. Большую помощь модовый анализ оказывает и в физической расшифровке спектров преобразователей.

### Метод акустической эмиссии

При решении задач, связанных с механической и циклической прочностью пьезокерамических преобразователей очевидна заинтересованность в разработке новых и улучшенных методов оценки целостности структур. В этом плане обнаружение и анализ сигналов акустической эмиссии в преобразователях является новым методом с многообещающими возможностями.

Акустическая эмиссия — это явление, возникающее вследствие освобождения энергии в твердых телах, подвергнутых пластической деформации или излому. Часть этой энергии преобразуется в упругие волны, которые распространяются в материале и могут быть обнаружены на его поверхности с помощью высокочувствительных преобразователей. Акустические эмиссионные контрольно-измерительные приборы обладают двумя особыми качествами: способностью обнаруживать образование или развитие трещины в реальном масштабе времени и возможностью бесконтактного дистанционного контроля. Кроме того анализ сигналов многочисленных преобразователей (трех или более) дает информацию, достаточную для определения местоположения источника сигнала методом триангуляции.

Перечислим некоторые из наиболее важных возможностей метода акустической эмиссии:

- обнаружение и определение местоположения трещин, их размеров;
- выявление нарождающихся усталостных разрушений;
- обнаружение появления трещин от коррозионных напряжений в структурах, а также появления трещин от технологических структурных неоднородностей;
- исследование механизмов развития трещины, излома и поведение материала.

В вопросах аппаратной реализации в основном стоят проблемы создания высокочувствительных приемников и проблемы обработки сигналов.

В качестве информативных признаков могут быть использованы количество импульсов в сигнале акустической эмиссии, спектральный состав, среднее значение сигнала, форма, длительность и т. д.

В применении метода акустической эмиссии для пьезокерамических преобразователей должен быть учтен импульсный характер разрушения пьезокерамики как хрупкого материала, а также наличие большего уровня помех, создаваемых электрически активным материалом.

Сигналы акустической эмиссии для пьезокерамических материалов лежат в частотном диапазоне от 200-500 кГц.

Применительно к пьезокерамическим преобразователям метод акустической эмиссии является весьма перспективным, поскольку со своими возможностями вполне может служить физической основой для прогнозирования прочности и ресурса преобразователей, а также окажет существенную помощь в изучении механизмов разрушения.

### Анализ нелинейных эффектов

При разработке пьезокерамических преобразователей исходят из концепции их линейности в определенном диапазоне электрических и механических напряжений. На практике, как правило, это предположение выполняется для качественных преобразователей начинает вести себя нелинейно, то это является неоспоримым доказательством его потенциальной ненадежности.

При больших значениях электрических полей, возбуждающих преобразователь, зависимости между деформацией и механическим напряжением, и между индукцией и электрическим полем, становятся нелинейными. Это приводит к появлению искажений на механической стороне преобразователя. Рост диэлектрических потерь, обусловленный нелинейностью такого вида, приводит к уменьшению электромеханического коэффициента полезного действия и выделению тепла [2,8].

Особый интерес представляют случаи нелинейного поведения пьезокерамических преобразователей в заведомо линейной области, т. е. при номинальных значениях электрических и механических напряжений.

Все возможные дефекты пьезокерамических преобразователей в определенной мере проявляются в виде нелинейностей различного рода [14], приводят к существенному изменению физики явлений не только на механической стороне, но и перераспределению электрических полей в самом преобразователе.

### Выводы

Рассмотренные методы диагностики являются наиболее предпочтительными для дефектоскопии пьезокерамических преобразователей. Они могут служить основой для построения конкретной диагностической системы пьезокерамических преобразователей.

**Литература**

1. *Богомольный В.М.* Анализ потерь, температурного поведения и выбор оптимальной частоты возбуждения пьезоэлектрических преобразователей // Измерительная техника. – 1997. – № 3. – С. 53-58.
2. *Грановский В.А.* Динамические измерения: Основы метрологического обеспечения. – Л.: Энергоатомиздат, 1984. – 224 с.
3. *Домаркас В.И., Пилецкас Э.А.* Ультразвуковая дефектоскопия. – Л.: Машиностроение, 1988. – 276 с.
4. *Трофимов А.И.* Пьезоэлектрические измерительные преобразователи. – Томск: Изд-во ТГУ, 1983 – 271 с.
5. *Балакирев М.К., Глинский И.А.* Волны в пьезокристаллах. – М.: Наука, 1982. – 236 с.
6. *Кербель Б.М., Удут Д.Л., Артюхина Л.В.* Автоматизированный комплекс для контроля электрофизических параметров пьезокерамики / Приборы и техника эксперимента. – 2002. – № 2. – С. 164.
7. *Ланге Ю.В.* Акустические низкочастотные методы и средства неразрушающего контроля многослойных конструкций. – М.: Машиностроение, 1991. – 270 с.
8. *Грановский В.А., Сирая Т.Н.* Методы обработки экспериментальных данных при измерениях. - Л.: Энергоатомиздат, 1990. – 287 с.
9. *Кунце Х.-И.* Методы физических измерений. – М.: Мир, 1989. – 214 с.
10. *Ермолов И.Н.* Теория и практика ультразвукового контроля. – М.: Машиностроение, 1981. – 240 с.
11. *Колесников А.Е.* Ультразвуковые измерения. – М.: Изд-во стандартов, 1982. – 248 с.
12. *Пиппард А.* Физика колебаний. – М.: Высш. школа, 1985. – 456 с.
13. *Каплун С.М., Рубен Е.А., Штерн А.М.* Измерительно-вычислительный комплекс для исследования электромеханически активных материалов и преобразователей // ПТЭ. – 1991. – №3. – С. 158-164.
14. *Физическая акустика.* Под ред. У. Мэсона. Т.1. Ч.А. Методы и приборы ультразвуковых исследований. – М.: Мир, 1966. – 592 с.
15. *Харкевич А.А.* Теория электроакустических преобразователей. Волновые процессы. – М.: Изд. Наука, 1973. – 400 с.
16. *Мэзон У.* Пьезоэлектрические кристаллы и их применение в ультразвуке. – М.: Мир, 1952.
17. *Кузьмичев Д.А., Радкевич И.А., Смирнов А.Д.* Автоматизация экспериментальных исследований. – М.: Наука, 1983. – 392 с.
18. *Черепанов В.Г., Вейсов Е.А.* Основы автоматизации экспериментальных исследований. – Красноярск: КрПИ, 1991. – 116 с.
19. *Певчев Ю.Ф., Финогенов И.Г.* Автоматизация физического эксперимента. – М.: Энергоатомиздат, 1986. – 368 с.
20. *В.Б. Коркин, Т.В. Григорьянц, Э.Ф.Макаров и др.* Основы автоматизации измерений – М.: Издательство стандартов, 1991. – 256 с.
21. *Вычислительные методы и программно-аппаратное обеспечение в научных исследованиях.* Сборник пд ред. Басиладзе С.Г., Репина В.М. – М.: МГУ, 1992. – 195 с.