



**Акустический метод диагностирования  
электрооборудования**

Акустические методы неразрушающего контроля подразделяют на две большие группы: активные и пассивные методы. Активные методы основаны на излучении и приеме упругих волн, пассивные — только на приеме волн, источником которых служит сам объект контроля, например образование трещин сопровождается возникновением акустических колебаний, выявляемых акустико-эмиссионным методом. Активные методы делят на методы отражения, прохождения, комбинированные (использующие как отражение, так и прохождение), собственных колебаний. Методы отражения основаны на анализе отражения импульсов упругих волн от неоднородностей или границ объекта контроля, методы прохождения — на влиянии параметров объекта контроля на характеристики прошедших через него волн. Комбинированные методы используют влияние параметров объекта контроля как на отражение, так и на прохождение упругих волн. В методах собственных колебаний о свойствах объекта контроля судят по параметрам его свободных или вынужденных колебаний (их частотам и величине потерь).

По характеру взаимодействия упругих колебаний с контролируемым материалом акустические методы подразделяют на следующие основные методы: 1) прошедшего излучения (теневого, зеркально-теневого); 2) отраженного излучения (эхо-импульсный); 3) резонансный; 4) импедансный; 5) свободных колебаний; 6) акустико-эмиссионный. По характеру регистрации первичного информативного параметра акустические методы подразделяются на амплитудный, частотный, спектральный.

Акустические методы неразрушающего контроля решают следующие контрольно-измерительные задачи: 1. Метод прошедшего излучения выявляет глубинные дефекты типа нарушения сплошности, расслоения, непроклепа, непропаев; 2. Метод отраженного излучения обнаруживает дефекты типа нарушения сплошности, определяет их координаты, размеры, ориентацию путем прозвучивания изделия и приема отраженного от дефекта эхо-сигнала; 3. Резонансный метод применяется в основном для измерения толщины изделия (иногда применяют для обнаружения зоны коррозионного поражения, непропаев, расслоений в тонких местах из металлов); 4. Акустико-эмиссионный метод обнаруживает и регистрирует только развивающиеся или способные к развитию под действием механической нагрузки трещины (квалифицирует дефекты не по размерам, а по степени их опасности во время эксплуатации). Метод имеет высокую чувствительность к росту дефектов — обнаруживает увеличение трещины на (1...10) мкм, причем измерения, как правило, проходят в рабочих условиях при наличии механических и электрических шумов; 5. Импедансный метод предназначен для контроля клеевых, сварных и паяных соединений, имеющих тонкую обшивку, приклеенную или припаянную к элементам жесткости. Дефекты клеевых и паяных соединений выявляются только со стороны ввода упругих колебаний; 6. Метод свободных колебаний применяется для обнаружения глубинных дефектов

Акустические сигналы в оборудовании, вызванные электрическими разрядами, можно обнаружить даже на фоне помех: вибростука, шума маслонасосов и вентиляторов и т. п.

Сущность акустического метода состоит в создании в месте повреждения разряда и прослушивании звуковых колебаний, возникающих над местом повреждения.

Акустические методы применяются не только к крупногабаритному оборудованию (к примеру, трансформаторам), но также и к такому оборудованию, как кабельная продукция.

Сущность акустического метода для кабельных линий состоит в создании в месте повреждения искрового разряда и прослушивании на трассе вызванных этим разрядом звуковых колебаний, возникающих над местом повреждения. Этот метод применяют для обнаружения на трассе всех видов повреждения с условием, что в месте повреждения может быть создан электрический разряд. Для возникновения устойчивого искрового разряда необходимо, чтобы величина переходного сопротивления в месте повреждения превышала 40 Ом.

Слышимость звука с поверхности земли зависит от глубины залегания кабеля, плотности грунта, вида повреждения кабеля и мощности разряд- 46 Диагностика электрооборудования электрических станций и подстанций ного импульса. Глубина прослушивания колеблется в пределах от 1 до 5 м. Применение этого метода на открыто проложенных кабелях, кабелях в каналах, туннелях не рекомендуется, так как из-за хорошего распространения звука по металлической оболочке кабеля можно допустить большую ошибку в определении места повреждения.

В качестве акустического датчика используют датчики пьеза- или электромагнитной системы, преобразующие механические колебания грунта в электрические сигналы, поступающие на вход усилителя звуковой частоты. Над местом повреждения сигнал наибольший.

Сущность ультразвуковой дефектоскопии заключается в явлении распространения в металле ультразвуковых колебаний с частотами, превышающими 20000 Гц, и отражения их от дефектов, нарушающих сплошность металла (трещин, раковин и пр.). Акустические сигналы в оборудовании, вызванные электрическими разрядами, можно обнаружить даже на фоне помех: вибростука, шума маслонасосов и вентиляторов и т. п. Сущность акустического метода состоит в создании в месте повреждения разряда и прослушивании звуковых колебаний, возникающих над местом повреждения. Этот метод применяют для обнаружения всех видов повреждения с условием, что вместе повреждения может быть создан электрический разряд.

## Методы отражения

В этой группе методов информацию получают по отражению акустических волн в ОК.

Эхометод основан на регистрации эхосигналов от дефектов — несплошностей. Он похож на радио- и гидролокацию. Другие методы отражения применяют для поиска дефектов, плохо выявляемых эхометодом, и для исследования параметров дефектов.

Эхозеркальный метод основан на анализе акустических импульсов, зеркально отраженных от донной поверхности ОК и дефекта. Вариант этого метода, рассчитанный на выявление вертикальных дефектов, называют методом тандем.

Дельта-метод основан на использовании дифракции волн на дефекте. Часть падающей на дефект поперечной волны от излучателя рассеивается во все стороны на краях дефекта, причем частично превращается в продольную волну. Часть этих волн принимается приемником продольных волн, расположенным над дефектом, а часть отражается от донной поверхности и также поступает на приемник. Варианты этого метода предполагают возможность перемещения приемника по поверхности, изменения типов излучаемых и принимаемых волн.

Дифракционно-временной метод (ДВМ) основан на приеме волн, рассеянных на концах дефекта, причем могут излучаться и приниматься как продольные, так и поперечные волны.

Акустическая микроскопия отличается от эхометода повышением на один-два порядка частоты УЗ, применением острой фокусировки и автоматическим или механизированным сканированием объектов небольшого размера. В результате удается зафиксировать небольшие изменения акустических свойств в ОК. Метод позволяет достичь разрешающей способности в сотые доли миллиметра.

Когерентные методы отличаются от других методов отражения тем, что в качестве информационного параметра помимо амплитуды и времени прихода импульсов используется также фаза сигнала. Благодаря этому повышается на порядок разрешающая способность методов отражения и появляется возможность наблюдать изображения дефектов, близкие к реальным.

## Методы прохождения

Методы начали применять для определения физико-механических свойств материалов, когда контролируемые параметры не связаны с образующими звуковую тень нарушениями сплошности.

Таким образом, теневой метод можно рассматривать как частный случай более общего понятия «метод прохождения».

При контроле методами прохождения излучающий и приемный преобразователи располагают по разные стороны от ОК или контролируемого участка. В некоторых методах прохождения преобразователи размещают с одной стороны от ОК на определенном расстоянии друг от друга. Информацию получают, измеряя параметры прошедшего от излучателя к приемнику сквозного сигнала.

Амплитудный метод прохождения (или амплитудный теневой метод) основан на регистрации уменьшения амплитуды сквозного сигнала под влиянием дефекта, затрудняющего прохождение сигнала и создающего звуковую тень.

Временной метод прохождения (временной теневой метод) основан на измерении запаздывания импульса, вызванного огибанием дефекта. При этом, в отличие от велосиметрического метода, тип упругой волны (обычно продольной) не меняется. В этом методе информационным параметром служит время прихода сквозного сигнала. Метод эффективен при контроле материалов с большим рассеянием УЗ, например бетона и т. п.

Метод многократной тени аналогичен амплитудному методу прохождения (теновому), но о наличии дефекта судят при этом по амплитуде сквозного сигнала (теневого импульса), многократно (обычно двукратно) прошедшего между параллельными поверхностями изделия. Метод более чувствителен, чем теневой или зеркально-теновой, так как волны проходят через дефектную зону несколько раз, но менее помехоустойчив. Рассмотренные выше разновидности метода прохождения используют для обнаружения дефектов типа нарушения сплошности. Фотоакустическая микроскопия. В фотоакустической микроскопии акустические колебания генерируются вследствие термоупругого эффекта при освещении ОК модулированным световым потоком (например, импульсным лазером), сфокусированным на поверхности ОК. Энергия светового потока, поглощаясь материалом, порождает тепловую волну, параметры которой зависят от теплофизических характеристик ОК. Тепловая волна приводит к появлению термоупругих колебаний, которые регистрируются, например, пьезоэлектрическим детектором.

Велосимметрический метод основан на регистрации изменения скорости упругих волн в зоне дефекта. Например, если в тонком изделии распространяется изгибная волна, то появление расслоения вызывает уменьшение ее фазовой и групповой скоростей. Это явление фиксируют по сдвигу фазы прошедшей волны или запаздыванию прихода импульса.

Ультразвуковая томография. Этот термин часто применяют в отношении различных систем визуализации дефектов. Между тем первоначально он применялся для УЗ-систем, в которых пытались реализовать подход, повторяющий рентгеновскую томографию, т. е. сквозное прозвучивание ОК по разным направлениям с выделением особенностей ОК, полученных при разных направлениях лучей.

Метод лазерного детектирования. Известны методы визуального представления акустических полей в прозрачных жидкостях и твердых средах, основанные на дифракции света на упругих волнах. Термоакустический метод контроля называют также УЗ-локальной термографией. Метод состоит в том, что в ОК вводятся мощные низкочастотные ( $\sim 20$  кГц) УЗ-колебания. На дефекте они превращаются в теплоту. Чем больше влияние дефекта на упругие свойства материала, тем больше величина упругого гистерезиса и тем больше выделение теплоты. Повышение температуры фиксируется термовизором.



## Комбинированные методы

Эти методы содержат признаки как методов отражения, так и методов прохождения.

Зеркально-теневой (ЗТ) метод основан на измерении амплитуды донного сигнала. По технике выполнения (фиксируется эхосигнал) — это метод отражения, а по физической сущности (измеряют ослабление дефектом сигнала, дважды прошедшего ОК) он близок к теневому методу, поэтому его относят не к методам прохождения, а к комбинированным методам.

Эхотеневой метод основан на анализе как прошедших, так и отраженных волн.

Реверберационно-сквозной (акустико-ультразвуковой) метод сочетает признаки метода многократной тени и УЗ-реверберационного метода. На ОК небольшой толщины на некотором расстоянии друг от друга устанавливают прямые излучающий и приемный преобразователи. Излученные импульсы продольных волн после многократных отражений от стенок ОК достигают приемника. Наличие в ОК неоднородностей меняет условия прохождения импульсов. Дефекты регистрируют по изменению амплитуды и спектра принятых сигналов. Метод применяют для контроля изделий из ПКМ и соединений в многослойных конструкциях.

## Методы собственных колебаний

Эти методы основаны на возбуждении в ОК вынужденных или свободных колебаний и измерении их параметров: собственных частот и величины потерь.

Свободные колебания возбуждают путем кратковременного воздействия на ОК (например, механическим ударом), после чего он колеблется в отсутствие внешних воздействий.

Вынужденные колебания создают воздействием внешней силы с плавно изменяемой частотой (иногда применяют длинные импульсы с переменной несущей частотой). Регистрируют резонансные частоты по увеличению амплитуды колебаний при совпадениях собственных частот ОК с частотами возмущающей силы. Под влиянием возбуждающей системы в некоторых случаях собственные частоты ОК немного изменяются, поэтому резонансные частоты несколько отличаются от собственных. Параметры колебаний измеряют, не прекращая действия возбуждающей силы.

Различают интегральные и локальные методы. В интегральных методах анализируют собственные частоты ОК как единого целого, в локальных — отдельных его участков. Информативными параметрами служат значения частот, спектры собственных и вынужденных колебаний, а также характеризующие потери добротность и логарифмический декремент затухания.

Интегральные методы свободных и вынужденных колебаний предусматривают возбуждение колебаний во всем изделии или на значительном его участке. Методы применяют для контроля физико-механических свойств изделий из бетона, керамики, металлического литья и других материалов. Эти методы не требуют сканирования и отличаются высокой производительностью, но не дают информации о месте расположения и характере дефектов.

Локальный метод свободных колебаний основан на возбуждении свободных колебаний на небольшом участке ОК. Метод применяют для контроля слоистых конструкций по изменению спектра частот в части изделия, возбуждаемой путем удара; для измерения толщин (особенно малых) труб и других ОК посредством воздействия кратковременным акустическим импульсом.

Локальный метод вынужденных колебаний (УЗ-резонансный метод) основан на возбуждении колебаний, частоту которых плавно изменяют. Для возбуждения и приема УЗ-колебаний используют совмещенный или отдельные преобразователи. При совпадении частот возбуждения с собственными частотами ОК (нагруженного приемопередающим преобразователем) в системе возникают резонансы. Изменение толщины вызовет смещение резонансных частот, появление дефектов — исчезновение резонансов.

Акустико-топографический метод имеет признаки как интегрального, так и локального методов. Он основан на возбуждении в ОК интенсивных изгибных колебаний непрерывно меняющейся частоты и регистрации распределения амплитуд упругих колебаний на поверхности контролируемого объекта с помощью наносимого на поверхность мелкодисперсионного порошка. На дефектном участке оседает меньшее количество порошка, что объясняется увеличением амплитуды его колебаний в результате резонансных явлений. Метод применяют для контроля соединений в многослойных конструкциях: биметаллических листах, сотовых панелях и т. п.

## Импедансные методы

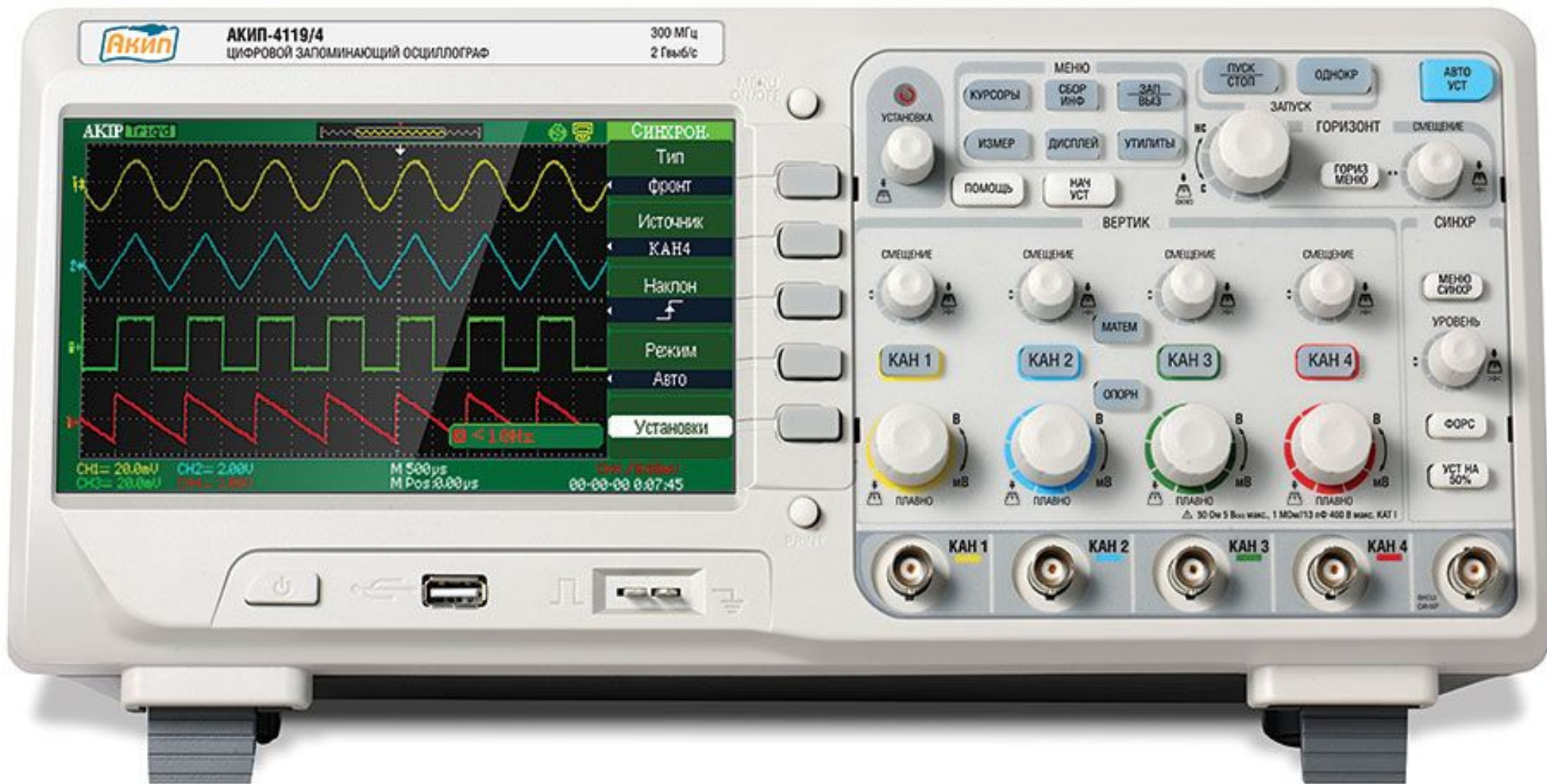
Эти методы основаны на анализе изменения механического импеданса или входного акустического импеданса участка поверхности ОК, с которым взаимодействует преобразователь. Внутри группы методы разделяют по типам возбуждаемых в ОК волн и по характеру взаимодействия преобразователя с ОК.

Метод применяют для контроля дефектов соединений в многослойных конструкциях. Его используют также для измерения твердости и других физико-механических свойств материалов.

Отдельным методом хотелось бы рассмотреть метод ультразвуковой дефектоскопии.

Ультразвуковая дефектоскопия применяется не только к крупногабаритному оборудованию (к примеру, трансформаторы), но также и к кабельной продукции.

Основные типы оборудования для ультразвуковой дефектоскопии: 1. Осциллограф, позволяющий регистрировать осциллограмму сигнала и его спектр;



2. Ультразвуковой зонд, в котором используются гетеродинирование сигнала и прослушивание преобразованного спектра сигнала через наушники;



3. Ультразвуковой модератор, который позволяет записать, замедлить и услышать ультразвуковой сигнал.

