

## Лекция 28

### **ОБЗОР ПРИМЕНЕНИЯ ЭЛЕКТРИЧЕСКИХ, ТЕПЛОВЫХ, КАПИЛЛЯРНЫХ И ШУМОВЫХ МЕТОДОВ НЕРАЗРУШАЮЩЕГО КОНТРОЛЯ В ТОПЛИВНО-ЭНЕРГЕТИЧЕСКОМ КОМПЛЕКСЕ**

#### **ОПТИЧЕСКИЕ МЕТОДЫ КОНТРОЛЯ**

Оптические методы основаны на регистрации света, отраженного от поверхности контролируемого объекта. Различают визуальный осмотр (невооруженным глазом), визуаль-но-оптические методы (осмотр с помощью оптических приборов — луп, микроскопов, перископов и т. д.), оптические методы с автоматической регистрацией изображений.

Оптические методы широко применяются при оценке состояния технических объектов, начиная с визуального осмотра и кончая современными лазерно-интерферометрическими методами. Основное их преимущество — отсутствие механического контакта с контролируемым изделием, что позволяет проводить дистанционную диагностику, в частности высокотемпературных и движущихся объектов.

Визуальный контроль, по-видимому, был первым методом неразрушающего контроля и диагностики, что связано с огромным по сравнению с другими методами объемом информации, содержащейся в оптическом изображении. Визуальный осмотр ввиду его простоты и наглядности результатов до настоящего времени находит достаточно широкое применение во всех областях техники, в том числе и в энергетике. Например, он используется в ходе технологического процесса изготовления таблеток ядерного топлива из двуокиси урана, при сборке корпусов реакторов и многих других операциях. Возможно его применение и для контроля состояния упрочняющей поверхности поршневой пары. Для проведения контроля изготавливают сканирующие системы, являющиеся достаточно сложными устройствами, позволяющими регистрировать координату поверхности осмотра, освещать ее, передавать увеличенное телевизионное изображение поверхности на расстояние и т. д. Интенсивно разрабатываются системы эксплуатационного контроля с использованием передающих трубок (видиконов), преобразующих видимое изображение в электрические сигналы и пригодных для работы при воздействии повышенной температуры и ионизирующих излучений.

С помощью визуального осмотра выявляются поверхностные трещины, нарушение качества поверхности, искажения формы и другие видимые дефекты. Невооруженным глазом могут быть обнаружены дефекты с раскрытием 0,1 мм, с помощью оптических устройств, например лупы, — 0,01 мм.

Достоинством оптических методов является неподверженность сигналов электромагнитным помехам, эти сигналы безопасны в пожаро- и взрывоопасных средах. Ряд оптических испытаний основан на простых законах геометрической оптики. Оптические методы наиболее пригодны для контроля доступных поверхностей непрозрачных объектов и объема прозрачных деталей. При этом выявляются трещины, разрывы, зазоры, качество поверхности и т. д. Применяют телевизионные камеры, аэрофотосъемку, в частности с радиоуправляемых авиамodelей. В качестве диагностических признаков все больше используют такие выраженные в числах характеристики, как тон, насыщенность, яркость. Насчитываются миллионы цветовых оттенков. Оценка цвета и его изменений лежит в основе большинства методов визуальной проверки. Например, коррозия и износ поверхностей обычно сопровождаются изменением их цвета.

Оптическое излучение представляет собой электромагнитные волны с длиной волны  $10^{-9} \dots 10^{-3}$  м. Человеческий глаз обладает чувствительностью в области спектра электромагнитных излучений с длиной волны 0,4...0,8 мкм и обладает максимальной чувствительностью в области около 0,55 мкм, являясь селективным приемником света в отличие от неселективных, у которых чувствительность слабо зависит от длины волны в широком диапазоне. Чувствительность адаптированного к темноте человеческого глаза обеспечивает восприятие нескольких десятков фотонов в секунду.

Не выявляемые простым глазом изменения оттенков легко выявляются инструментальными методами с помощью, например, фотоэлектрических приборов — фотоэлементов, фоторезисторов, фотодиодов и фототранзисторов. Пороговую чувствительность — минимальный поток оптического излучения, который может быть обнаружен на фоне собственных шумов приемника оптического излучения, характеризует нижеследующая таблица.

Оптические сигналы, возникающие в результате взаимодействия первичного светового потока с контролируемой поверхностью, могут быть обнаружены и измерены с помощью фотоэлектрических преобразователей различного типа.

Типы приемников	Пороговая чувствительность, Вт/Гц <sup>1/2</sup>	Рабочий интервал длин волн, мкм	Постоянная времени, с
Тепловые	$10^{-11} \dots 10^{-10}$	0,2...50	$10^{-3} \dots 10^{-1}$
Фотоэлектрические	$10^{-15} \dots 10^{-12}$	0,6...30	$10^{-9}$
Фоторезисторы	$10^{-12} \dots 10^{-10}$	<0,7	$10^{-7} \dots 10^{-5}$
Фотодиоды	$10^{-14}$	0,3...15	$10^{-10} \dots 10^{-8}$

Фотоэлектрические преобразователи разделяют на две группы. К преобразователям с внешним фотоэффектом относят фотоэлементы и фотоэлектронные умножители. Фотокатод под влиянием фотонов эмитирует электроны, которые увлекаются напряжением, приложенным между анодом и катодом. Фотоэмиссия возникает только в случае, если энергия фотонов  $E = h\nu$  ( $h = 6,62 \cdot 10^{-34}$  Дж·с — постоянная Планка,  $\nu$  — частота излучения) превышает работу выхода катода  $A$ . Соответствующая граничная частота  $\nu_{гр} = A/h$  носит название красной границы фотоэффекта, а соответствующая ей длина волны  $\lambda_{гр} = c/\nu_{гр}$  — длинноволновым порогом фотоэффекта ( $c$  — скорость света). При  $\lambda > \lambda_{гр}$  фотоэффект не возникает.

Преобразователи с внутренним фотоэффектом (фоторезисторы) имеют красную границу в инфракрасной области.

Для контроля используют:

*фотометрический метод*, основанный на пространственной локализации светового потока и его регистрации приемником с заданной спектральной чувствительностью. Оптический блок фотометра (фотометрическая головка) содержит линзы, светорассеивающие пластинки, ослабители света, светофильтры, диафрагмы и приемник излучения, с помощью которого световой поток преобразуется в электрический сигнал;

*фотограмметрию* — обмер фотографических (телевизионных, компьютерных) изображений. В настоящее время обмер изображений производят непосредственно в памяти компьютера без получения промежуточного изображения с использованием принципов цифровой фотографии. При контроле состояния труб и сосудов давления определяют внешний диаметр, положение фланцев, тройников, вентилях и т. д. Подобные обследования проводят и под водой.

Источниками излучения являются лампы накаливания, газоразрядные и люминесцентные лампы, светодиоды, лазеры.

Достоинствами оптических преобразователей при измерении тех или иных не световых величин являются:

- дистанционность измерений без непосредственного контакта с объектом;
- отсутствие механических воздействий на объект;
- независимость результатов измерений от материала контролируемого объекта;
- высокая точность;
- быстрое действие.

Особый интерес представляют системы технического зрения, позволяющие осуществлять дистанционные измерения объектов с расстояний от нескольких сантиметров до десятков метров. В качестве первичного преобразователя таких систем широко применяются видеокамеры на приборах с зарядовой связью, основными преимуществами которых являются неограниченный срок службы, отсутствие геометрических искажений раstra, удобство сопряжения с вычислительной техникой.

Большое внимание уделяется новым средствам *видеоэндоскопии*, в том числе с записью изображения на портативный видеомэгнитофон и обработкой их на компьютере. Щупы подобных приборов имеют диаметры, начиная с немногих миллиметров, и комплектуются миниатюрными видеокамерами.

На видеодиагностику в значительной мере опирается эксплуатационный мониторинг сложных объектов. При этом в последнее время наряду с традиционными системами промышленного телевидения значительное внимание уделяется средствам видеоэндоскопии на основе микротелевизионных систем передачи и воспроизведения изображения. Сочетание таких систем с волоконно-оптическими и линзовыми эндоскопами (бороскопами), а также использование ПЭВМ для архивирования и обработки изображения существенно расширяет возможности видеодиагностики и обеспечивает документирование состояния объектов на различных стадиях их жизненного цикла, снижает уровень световых нагрузок на зрение оператора, существенно повышает качество изображения за счет применения программно-аппаратных средств обработки изображений. Микроминиатюризация телевизионных систем и применение ПЭВМ делает возможным создание автономных мобильных средств видеодиагностики в полевых условиях.

## **ЭЛЕКТРИЧЕСКИЕ МЕТОДЫ**

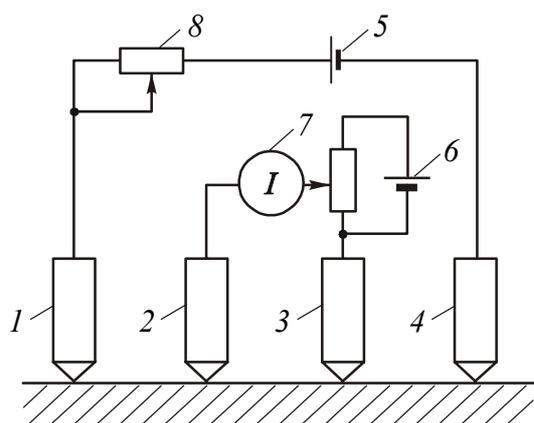
На преобразовании различных физических величин в электрические сигналы основано большинство методов измерения, контроля и диагностики. Поэтому рассмотрим только методы, где электрический сигнал генерируется самим объектом контроля при тестовых или эксплуатационных воздействиях. Электрические методы основаны на измерении:

- тока или вызванной его протеканием разности потенциалов в разных точках объекта;
- диэлектрической проницаемости и тангенса угла диэлектрических потерь диэлектриков;
- термоэдс, возникающей при неравномерном нагреве объекта.

Общая схема измерений по первому варианту показана на рис. 2.7. К крайним электродам прикладывается разность потенциалов, приводящая к протеканию через объект тока величиной  $I$ , то между внутренними электродами возникает напряжение  $V = KI\rho$ , где  $K$  — постоянная с размерностью длины, зависящая от расположения электродов и формы объекта,  $\rho$  — удельное сопротивление материала объекта. Поэтому для определенного расположения электродов и заданного материала изменение отношения  $V/I$  определяется геометрией объекта контроля, что может быть использовано для определения толщины стенки, выявления и определения глубины трещин. Электроды прижимаются к поверхности объекта с помощью пружин, для обеспечения долговечности электродов их изготавливают из стали, подвергаемой закалке. Поверхность объекта не требует обработки непосредственно после механической обработки, при наличии окислов на поверхности необходима обработка наждачной бумагой или другим методом. Большие расстояния между внутренними электродами (более 15 мм) используют для измерения толщин, меньшие расстояния — при измерении глубины трещин.

Результаты испытаний зависят от однородности и изотропности материала. Краевые эффекты, сложность градуировки, трудность компенсации возникающей термоэдс ограничивают применение метода.

Для определения коррозионного состояния подземных трубопроводов применяют так называемый электрометрический метод диагностики, основанный на измерении электрического поля, возникающего вокруг трубопровода



Общая схема контроля свойств электрическим методом:

1, 4 — токовые электроды; 2, 3 — электроды для измерения разности потенциалов; 5, 6 — батареи; 7 — микроамперметр; 8 — регулятор тока

вследствие протекания токов коррозионной электрохимической защиты. Основным направлением развития электрометрических обследований является диагностика состояния изоляционного покрытия через короткие интервалы расстояния с точным определением характера дефектов и коррозионно-опасных мест. К настоящему времени в различных подразделениях газовой отрасли накопился необходимый для некоторых обобщений опыт практического применения электрометрических обследований газопроводов с использованием различных технологий в трассовых условиях.

В некоторой начальной точке проводится ба-

зовый замер параметров противокоррозионной защиты: потенциалы включения и выключения, их градиенты, разность потенциалов между используемыми медно-сульфатными электродами. Эти параметры вводятся в память измерительного прибора и затем подвергаются компьютерной обработке.

Результаты электрометрических обследований в будущем, по-видимому, будут активно использоваться в прогнозных моделях и технических решениях по обеспечению стабильной по времени и протяженности катодной поляризации магистральных газопроводов и поддержанию защитных потенциалов в узком диапазоне, наиболее благоприятном для избежания стресс-коррозии.

Проблема электрометрических методов обследования состоит в экранирующем действии отслоившейся изоляции, затрудняющим поиск участков трубопровода с неадгезированным покрытием и измерение самого потенциала. Однако имеются сообщения о принципиальной возможности такого поиска с помощью измерения других электрометрических характеристик. Информация о риске коррозионного растрескивания может быть получена по результатам измерений градиентов потенциалов постоянного тока и эквивалентной площади повреждения изоляции.

Проходят испытания стационарные устройства контроля над зарождением трещин и измерения поляризационного потенциала под изоляцией.

К числу электрических методов диагностики относится и метод, основанный на определении характеристик тока, питающего электрические машины, например, входящие в состав электрооборудования АЭС. При функционировании электрической машины любого типа в ее цепях генерируются пульсации тока (напряжения). Среди источников указанных пульсаций можно выделить две группы: внутренние и внешние. Последние в свою очередь разделяются на электрические (со стороны сети — для электродвигателей и со стороны приемника электроэнергии — для генератора) и механические (со стороны привода — для генератора и со стороны приводного органа — для электродвигателя).

Информативные составляющие спектра пульсаций тока и напряжения в электрических машинах находятся в интервалах частот вблизи следующих центральных частот:

– при наличии дисбаланса ротора —  $f_d = f_p$ , где  $f_p$  — частота вращения ротора;

– овальности ротора (статора) —  $f_o = 2f_p$ ;

– при неровностях в сепараторах подшипников —

$$f_c = (f_p/2) [1 - (d_{mk}/d_c) \cos \alpha],$$

где  $d_{\text{тк}}$  — диаметр тел качения,  $d_{\text{с}}$  — диаметр сепаратора;  $\alpha$  — угол контакта тел и дорожек качения;

— при отклонении формы тел качения (шариков) от допустимой —

$$f_{\text{ш}} = z_{\text{тк}} f_{\text{с}},$$

где  $z_{\text{тк}}$  — число тел качения;

— при наличии трещины или раковины внутреннего кольца —

$$f_{\text{в}} = (f_{\text{р}} - f_{\text{с}}) z_{\text{тк}},$$

— от электрической и магнитной несимметрии цепей машин —

$$f_{\text{эм}} = 2f_{\text{пс}}; 2pf_{\text{р}}; 2pkf_{\text{р}}; k_1 f_{\text{р}} \pm 2k_2 s f_{\text{пс}},$$

где  $s = (f_{\text{пс}} - f_{\text{р}}) / f_{\text{пс}}$  — скольжение;  $f_{\text{пс}}$  — частота питающей сети;  $p$  — число пар полюсов.

В неустановившихся режимах нелинейные изменения индуктивностей цепей машины обуславливают появление дополнительных спектральных составляющих. Например, включение и отключение электромагнитной муфты электрической машины за счет резкого изменения индуктивности обмотки муфты также вызывает в цепи питания машины импульсы тока и напряжения.

В качестве примеров применения электрических методов диагностирования можно привести обнаружение нестабильности переходных сопротивлений в цепи электрической машины из-за механических дефектов щеток и коллектора; контроль параметров пульсаций напряжения и тока в цепи; определение параметров амплитудного распределения и частотного спектра, корреляционных и кепстральных характеристик; обнаружение искажений тестовых воздействий в цепи электрической машины. Характерным примером последнего метода является контроль нелинейных искажений синусоидального сигнала в цепи машины.

## ТЕПЛОВЫЕ МЕТОДЫ

Тепловые методы используют закономерности распространения тепла в средах и теплотеплопередачи на границах раздела сред. Наличие несплошностей в объекте контроля изменяет картину поля температуры, характерного для бездефектного объекта, что и используется для выявления дефектов. Основными достоинствами тепловых методов контроля являются:

- дистанционность (при использовании систем, основанных на регистрации инфракрасного (ИК-) излучения);
- высокая скорость обработки информации;
- высокая производительность, ограниченная только скоростью нагрева объекта при использовании активного режима и скоростью развертки при пассивной регистрации температурного поля объекта;
- высокое разрешение (в ИК-микроскопии — до ...10 мкм);
- возможность пассивного контроля при одностороннем доступе к объекту.

Диагностика может осуществляться пассивным и активным методами.

*Пассивный метод* предусматривает дистанционное исследование температурных полей по собственному тепловому излучению объектов в ИК-диапазоне и является самым распространенным методом теплового контроля и диагностики. Его **достоинствами** являются:

- высокая чувствительность к температурным сигналам (от десятых до тысячных долей градуса, в зависимости от параметров оптической системы и фотоприемника);
- хорошее разрешение (1...10 мрад для телескопических систем) или площади обзора (5 — 50 мкм для ИК-микроскопов);
- высокое быстродействие, ограниченное инерционностью оптико-механического сканнатора и фотоприемника.
- возможность контроля практически любых материалов, если теплофизические свойства и дефекта и изделия различаются;
- меньшая зависимость от неровностей поверхности по сравнению с рядом других методов контроля.

**Недостатком** пассивного метода является зависимость выходного сигнала от свойств контролируемой поверхности и канала передачи ИК-излучения.

*Активный* тепловой метод подразумевает нагрев объекта контроля, для чего применяют как стационарные, так и переносные источники. Интенсивный кратковременный нагрев с целью диагностики можно осуществить:

1. Плазменной струей;
2. Сфокусированным ИК- или видимым излучением;
3. Электромагнитным полем;
4. Лазерным лучом.

Для стационарного нагрева применяют пропускание через объект электрического тока или внешние нагреватели.

Первичные измерительные преобразователи (датчики) обычно преобразуют изменения теплового потока в электрический сигнал. В качестве датчиков применяют термодпары, терморезисторы, пироэлектрические преобразователи, полупроводниковые и электронно-вакуумные приборы.

Постоянная времени фотодиодов меньше, чем у фоторезисторов, и достигает  $10^{-8}$  с.

Электронно-оптические преобразователи используют в тех случаях, когда необходимо оперативно получить видимое изображение в реальном масштабе времени непосредственно из зоны инфракрасного излучения, обычно без облучения контролируемого объекта, однако полученное изображение не может быть передано на значительное расстояние.

Передающие электронно-лучевые трубки, подобные применяемым в телевизионных системах, при использовании специальных материалов и элементов могут применяться для преобразования распределения плотности потока инфракрасного излучения в видеосигналы, а затем — в видимое изображение на экране электронно-лучевой трубки (видикона).

Получили распространение пироэлектрические приемники, изготавливаемые обычно из керамики титаната бария или триглицинсульфата. Они не нуждаются в источнике питания, однако требуют модуляции сигнала. Предельная чувствительность пироэлектрических преобразователей при частоте модуляции 10 Гц достигает  $5 \cdot 10^8 \text{ Вт}^{-1} \cdot \text{см} \cdot \text{Гц}^{1/2}$ . Постоянная времени относительно велика — 0,1...0,01 с.

Тепловые методы контроля могут осуществляться также с помощью устройств преобразования теплового изображения в видимое — тепловизоров, обеспечивающих контроль большой площади поверхности объекта. В тепловизорах применяют приемники излучения с  $p-n$ -переходом, которые могут работать в вентильном режиме без внешнего источника питания или в фотодиодном режиме при использовании такого источника. Сканирующие тепловизоры используют многоэлементные приемники — линейки из фоторезисторов или фотодиодов. Фотодиодные линейки более однородны, имеют меньшую частоту сопряжения по фликер-шуму и обеспечивают меньшее тепловыделение.

С помощью термоиндикаторов можно производить контроль достижения определенной температуры на поверхности объекта. Если необходимо индцировать несколько значений температур, используют термоиндикаторы нескольких марок, нанося их в виде чередующихся полос или точек с частотой, обеспечивающей необходимую линейную разрешающую способность. В качестве термоиндикаторов используют также жидкие кристаллы, которые могут быть нанесены на контролируемый объект или на специальную темную подложку, поглощающую тепло.

Внедрение приборов инфракрасной техники является одним из перспективных направлений создания эффективных систем технической диагностики, обеспечивающих возможность контроля теплового состояния оборудования и сооружений без нарушения нормального режима их эксплуатации.

## **КАПИЛЛЯРНЫЕ МЕТОДЫ**

Капиллярные методы основаны на капиллярном проникновении индикаторных жидкостей (пенетрантов) в полости поверхностных дефектов и регистрации индикаторного рисунка. Из-за капиллярного эффекта жидкость проникает в поверхностные трещины. После удаления пенетранта изделие просушивают и «проявляют» дефекты одним из следующих способов:

— посыпают поверхность тонкодисперсным сухим порошком или смазывают мокрым порошком; проникшая в трещины жидкость диффундирует в порошок и окрашивает его (цветной капиллярный метод);

— облучают поверхность изделия (покрытую порошком или без него) в затемненном помещении ультрафиолетовой лампой; при этом жидкость, оставшаяся в трещинах, люминесцирует, давая картину дефектов (люминесцентный капиллярный метод).

В первом случае проникающая жидкость должна быть окрашенной, с тем чтобы ярко обозначить место дефекта, во втором — выбираться из группы жидкостей, светящихся в ультрафиолетовом излучении.

Капиллярные методы являются традиционными методами контроля в различных отраслях техники. С их помощью выявляют поверхностные дефекты с раскрытием 0,01 мм.

## **ШУМОВЫЕ МЕТОДЫ**

Особого внимания заслуживает рассмотрение шумовых методов, то есть методов, основанных на регистрации случайных компонент сигналов различной физической природы (шумов), возникающих в объектах при внешних воздействиях различного рода.

К числу таких шумов следует отнести:

- электрический шум;
- электрохимический шум;
- электромагнитный шум;
- магнитный шум (шум Баркагаузена);

— термоэлектрический шум.

Параметры каждого из этих видов шумов несут информацию о развитии процессов в материале конструкции, по характеру своего проявления близки к акустической эмиссии и в ряде случаев могут заменить АЭ-метод или существенно дополнить информацию, получаемую с его помощью. В результате могут быть созданы основы контроля и диагностики шумовыми методами на единой методической и аппаратурной основе. Это позволяет существенно снизить стоимость реализации методов в натуральных условиях и осуществить документирование данных контроля и диагностики. При этом существенное значение имеет степень коррелированности сигналов, так как при сильной корреляции регистрация обоих процессов нецелесообразна, и наоборот. Поскольку как акустические, так и электрические сигналы могут быть зарегистрированы в широком интервале частот, сочетание двух физически различных эффектов способно обеспечить достаточно надежную диагностику. Многомерный статистический анализ накопленной информации позволяет также повысить степень обоснованности выбора диагностических параметров и признаков.

Шумы указанной природы могут быть эффективно использованы как при контроле механизмов, так и определении состояния подземных и наземных трубопроводов. При контроле работы механизмов предпочтение следует отдать электромагнитным, акустическим и электрическим шумовым методам, при контроле трубопроводов — электрическим и электрохимическим шумовым.

**Электрический шум** может быть порожден различными причинами. Уже упоминалось о возможности диагностики состояния электрических двигателей посредством измерения пульсаций напряжения и тока в цепи их питания. Поскольку напряжение питания и механическая нагрузка двигателя подвержены случайным воздействиям, дополнительно к пульсациям, могут быть измерены и электрические шумовые компоненты тока и напряжения, что позволяет расширить рамки метода.

Анализ структуры электрических полей в непосредственной близости от трубопровода является одним из перспективных направлений в диагностике состояния противокоррозионной защиты. При этом необходим учет коррозионной активности почвы, в которой находится трубопровод. Последняя зависит от химического состава и степени увлажненности почвы, проникновения в нее химических, биологических и иных стоков. Указанные факторы влияют на электропроводность почвы и конечном счете на ее коррозионную активность.

При контроле только постоянной составляющей электрического поля значительная часть информации ускользает от внимания контролера, поскольку, как известно, процессы

коррозии подвержены значительным флуктуациям, обусловленных случайным характером процессов рождения и гибели (залечивания) образующихся дефектов.

Электрические деформационные шумы в металлах и сплавах порождены хаотическим изменением электросопротивления металла при деформации. Наиболее значительны флуктуации сопротивления на конечных этапах деформирования перед разрушением. Между акустической эмиссией и флуктуациями электросопротивления может существовать заметная корреляция, что позволяет говорить о некоторой ограниченной взаимозаменяемости двух методов. Но в отличие от АЭ-метода, электрический метод основан на создании падения разности потенциалов на определенном участке поверхности объекта, границами которого определяется зона контроля. Последняя весьма размыта, поскольку линии электрического тока не являются прямыми линиями, и сила тока плавно убывает по мере удаления от прямой линии, соединяющей точки задания разности потенциалов. Поэтому точная локализация дефектов в общем случае затруднена. Метод электрических деформационных шумов существенно уступает по чувствительности АЭ-методу и в настоящее время его применение для диагностики состояния металла представляется проблематичным, за исключением, может быть, экзотических случаев испытаний.

**Электрохимический шум** возникает при протекании электрохимических процессов, в частности коррозии. Известно, что протекание электрохимических процессов сопровождается заметными хаотическими составляющими — электрохимическими шумами, причем в зависимости от вида измерительной схемы могут быть зарегистрированы как электрохимический шумовой ток, так и шумовое напряжение.

Электрохимическая реакция отличается от обычной химической реакции тем, что она фактически представляет совокупность двух «полуреакций», в определенной степени независимых, протекающих на поверхности двух электродов, между которыми существует разность электрических потенциалов. Простейший пример — два электрода из разных металлов, опущенные в раствор электролита. В этом случае образуется электрическая батарея, от которой можно получить электрический ток при замыкании внешней цепи. Ток возникает за счет уноса ионов более электроположительного металла с одного электрода (растворение металла) и осаждения его на отрицательном электроде. Процессы переноса сопровождаются присоединением ионов растворителя, возможно образование комплексов ионов с участием ионов электролита.

Указанные процессы протекают в естественных условиях на металле конструкций, причем разность потенциалов в металле может возникнуть между зерном металла и границей между двумя кристаллами, напряженным и разгруженным кристаллами, между металлом и

примесью в металле, практически между любыми в чем-то различающимися зонами металла. Если к зоне неоднородности получит доступ электролит, например почвенная влага, начинает работать «электрическая батарейка», замкнутая через окружающий металл, возникает коррозия металла, обусловленная переходом ионов металла в электролит и окисления этих ионов ионами кислорода, присутствующими в электролите. В случае железа и сталей образуется всем известная ржавчина, на меди — рыхлый налет и т. п. Для ослабления этих эффектов доступ влаги стремятся устранить с помощью различных методов гидроизоляции поверхности. Но поскольку такая изоляция не является идеальной, возможна коррозия участков с поврежденной изоляцией.

Снижения скорости коррозии на этих участках добиваются применением катодной защиты. Принцип ее действия заключается в задании отрицательного (катодного) электрического потенциала защищаемого объекта относительно земли или другого опорного объекта. Дело в том, что в определенной области потенциалов скорость растворения металла минимальна. Оптимальная разность потенциалов зависит от многих факторов — характера и степени засоленности почвы, вида металла, наличия возмущений электрического поля со стороны окружающих объектов (электрифицированных транспортных линий, коммунальных объектов и др.).

Катодная защита осуществляется с помощью станций катодной защиты, питаемых от линий электропередачи и содержащих понижающий трансформатор и выпрямитель. Один из выходных электродов (положительный) закапывают в землю, второй (отрицательный) подключают к защищаемому объекту.

Одной из главных проблем катодной защиты является обеспечение постоянства защитного потенциала. К суточным колебаниям питающего напряжения добавляются пульсации выпрямленного напряжения. Защитные токи для протяженных объектов могут достигать многих ампер даже при незначительной поврежденности изоляции. Как следствие, на удаленных от станции участках трубопроводов из-за падения напряжения на трубопроводе потенциал может оказаться недостаточным для эффективной защиты. Повышение напряжения, создаваемого станцией защиты, приводит к так называемой «перезащите» участка трубопровода, примыкающего к станции защиты. Дело в том, что при чрезмерно отрицательных потенциалах на поверхности защищаемого объекта восстанавливаются до нейтральных атомов ионы водорода, содержащиеся в частично диссоциированной почвенной влаге. Ионы объединяются в молекулы газообразного водорода, давление которого способствует дальнейшему повреждению изоляции. Кроме того, часть ионов проникает через поверхностные дефекты металла в его приповерхностную зону, где опять-таки восстанавливается до молекул во-

дорода. Последнее приводит к разрыву металла в местах накопления водорода. Возможно также наводороживание объема металла, приводящее к его охрупчиванию, способствующему развитию процессов разрушения.

Существуют три точки зрения на механизм локализации и интенсификации коррозионных процессов в вершине коррозионно-механической трещины.

1. Согласно первой рост трещины является химически активируемым процессом, энергия активации которого зависит от механических напряжений;

2. Вторая концепция рассматривает рост трещины как результат деформационного разрыва пассивной пленки в вершине трещины как результат ползучести материала;

3. Наконец, наиболее простой подход заключается в представлении трещины как гальванической пары.

Предложена концепция комбинированных гальванических элементов. Согласно этой концепции в трещине из-за образующегося гальванического элемента происходит локальная коррозия и наводороживание. Электродвижущая сила элемента возникает из-за деформирования решетки при выделении водорода, сопровождающегося уменьшением энтропии и ростом энтальпии в вершине трещины, а также образованием в ней свежесформированных поверхностей. Элементы работают за счет преобразования механической энергии в химическую.

Возможен контроль ингибирования низкоуглеродистой стали по флуктуациям потенциала коррозии.

Существует стохастический подход к моделированию питтинговой коррозии. Предложена модель, согласно которой центры зарождения питтингов (например включения) идентичны, а их количество, как и число самих питтингов, описывается распределением Пуассона. Характер зарождения питтингов определяется их средним числом, в момент времени  $t$  равным

$$\langle n(t) \rangle = n_0 [1 - \exp(-\lambda_0 t)],$$

где  $n_0$  — число центров,  $\lambda_0$  — скорость протекания процесса.

Гибель (репассивация) питтингов наблюдается только на промежутке времени  $\tau < \tau_c$ , где  $\tau_c$  — время достижения питтингом критической величины, настолько превышающей толщину пограничного слоя, что ее флуктуации уже не могут ограничить повышение кислотности в полости питтинга. Процесс гибели характеризуется некоторой скоростью  $\mu$ . Из опыта находят величины  $n_0$ ,  $\lambda_0$  и  $\mu$ . Флуктуации анодного тока и его зависимости от вре-

мени при измерениях на поверхностях площадью около  $0,2 \text{ см}^2$  трактуются как единичные события зарождения, гибели и скачкообразного роста питтингов.

Изучали флуктуации анодного тока железа и нержавеющей сталей в пассивном состоянии. Во всех измерениях нарастание тока при его всплесках происходило линейно со временем. На низких частотах спектральная плотность мощности процесса  $G(f)$  не зависела от частоты  $f$ . При высоких частотах  $G \sim f^{-n}$ , причем  $n \approx 2..4$ . Граница между двумя областями находится в области 20 Гц. Значение  $n$  зависит от химического состава и природы металла, линейно растет с повышением потенциала и не зависит от концентрации коррозионных компонент среды. Концентрация влияет только на частоту зарождения питтингов, но не на скорость их развития.

Анализ шумовой компоненты потенциала коррозии нержавеющей стали в растворе хлорида магния также показал постоянство спектральной плотности флуктуаций потенциала в сверхнизкочастотной области (на частотах ниже 0,1 Гц). Спектральная плотность на частоте 0,05 Гц меняется со временем, причем скорость изменения зависит от концентрации активатора в коррозионной среде, температуры и времени от начала воздействия коррозионной среды на металл. В предположении о том, что скорость коррозии пропорциональна спектральной плотности, показано, что функция  $\lg G(\lg t)$ , где  $t$  — время, линейна, причем угол наклона связан с кинетикой образования пленки на поверхности стали.

Для исследования коррозионных процессов все шире используют новые методы, основанные на измерении физических характеристик образцов и электролитов. Эти методы еще не стали общепринятыми, но могут представлять значительный интерес при разработке различных сторон коррозионной проблемы.

Однако изучение электрохимических флуктуаций связано с большими трудностями, обусловленными малостью измеряемых величин, которые обычно оказываются ниже порога чувствительности стандартной радиоэлектронной аппаратуры.

Электрохимический шум может быть связан и с другими физическими проявлениями, в частности, акустическими. Выявлена взаимосвязь самопроизвольных флуктуаций потенциала коррозии ряда систем и частоты, испускаемых ими звуковых волн. Каждая корродирующая система характеризуется своим спектром низкочастотных шумов. Скорость коррозии можно оценить по амплитуде волн с очень низкой частотой.

Установлено, что амплитуда электрохимического шума связана со скоростью коррозии. Этот шум связан с другими проявлениями коррозии, в частности акустической эмиссией. Выявлена взаимосвязь самопроизвольных флуктуаций потенциала коррозии и характери-

стик сопровождающей их акустической эмиссии. Показано, что суммарный счет акустической эмиссии может являться мерой общего коррозионного поражения металла.

**Электромагнитный шум (электромагнитная эмиссия).** Причины возникновения электромагнитного шума многочисленны. Ее можно обнаружить, потеряв два куска металла один о другой. Это достаточно просто можно обнаружить по треску в радиоприемнике, антенна которого размещена вблизи трущихся поверхностей (эффект тем заметнее, чем ниже частота регистрации, поэтому обнаруживать такие сигналы лучше всего в длинноволновом диапазоне радиоволн). Электромагнитная эмиссия может наблюдаться при соударении двух тел.

В инфранизкочастотном диапазоне при наличии очень чувствительной аппаратуры могут быть обнаружены электромагнитные волны, вызванные флуктуациями тока, в частности тока катодной защиты. При этом сигналы могут быть зарегистрированы бесконтактными методами, например на поверхности земли — от подземных трубопроводов. Однако ограничения по чувствительности существенны: известно, что излучатель волны любой физической природы является эффективным, если его размеры не намного меньше длины волны. Поэтому эффективный излучатель (и приемник), например на частоте 50 Гц по размерам должен быть сопоставим с длиной волны, равной  $\lambda = c/\nu = 3 \cdot 10^8 / 50 = 6 \cdot 10^6 \text{ м} = 6000 \text{ м}$ , то есть сравнимым по величине с радиусом земного шара. Тем не менее, фундаментальные исследования в области бесконтактной регистрации флуктуаций тока катодной защиты могут привести к появлению качественно новых методов диагностики подземных трубопроводов и других объектов.