Ж.Желкобаев, В.Календин, П.Тодуа,
Научно-исследовательский центр по изучению
свойств поверхности и вакуума, Москва

ЛАЗЕРНАЯ МЕТРОЛОГИЯ
АКУСТИЧЕСКИХ НАНОСМЕЩЕНИЙ

С тех пор, как техническая диагностика объектов ушла от принципа простого обнаружения дефектов, многое изменилось. Понадобилось измерять дефекты порядка 10^{-6} – 10^{-9}м. Возможности акусто-оптических методов достигли таких результатов. Поэтому решение задач метрологического обеспечения акустических измерений приобретает особое значение.

Обеспечение промышленной безопасности в энергетике, авиационной, ракетно-космической технике всегда имеет первостепенное значение [1, 2]. Но условия работы промышленных объектов при повышенной мощности и производительности отдельных блоков, при возрастании значений параметров рабочих сред (давление, температура, химическая и радиационная активность и т.д.) привлекают особое внимание к решению этой проблемы [3]. Отказы в работе изделий, оборудования, коммуникаций, трубопроводов ведут к значительным экономическим потерям и нарушениям экологического баланса. Все это определяет необходимость системного подхода к оценке надежности работы опасных производственных объектов, в которых на первое место выдвигаются методы технической диагностики и неразрушающего контроля. До настоящего времени основной задачей большинства методов было обнаружение дефекта и сравнение его с известными «эталонными».

Современные подходы и требования мониторинга состояния объекта заключаются в том, чтобы в процессе выполнения диагностики объекта проводилось не только выявление дефекта как такового, но и измерения его важнейших параметров и характеристик, в том числе и в динамике, с целью аналитического расчета прочности объекта и его остаточного ресурса.

Среди широкого спектра методов и средств неразрушающего контроля значительное место занимают акустические методы. В акустических методах, к которым относятся ультразвуковая дефектоскопия и метод акустической эмиссии, в качестве первичных преобразователей в большинстве своем используются акустоэлектрические преобразователи, принцип действия которых основан на преобразовании механического (акустического) смещения поверхности в электрический сигнал.

Для обеспечения безопасности техногенных объектов решение задач метрологического обеспечения акустических измерений приобретает особое значение. Информация о состоянии объекта заключена в параметрах сигналов, приходящих от дефекта в контролируемом объекте. Поскольку она приходит на первичный преобразователь в системе приема и обработки сигналов, то необходима обязательная калибровка первичных преобразователей акустической эмиссии. К основным параметрам и техническим характеристикам акустических преобразователей относятся коэффициент преобразования «смещение – электрический сигнал», амплитудно-частотная характеристика, коэффициент затухания импульсной характеристики.

Существует два подхода в измерениях основных параметров преобразователей акустической эмиссии (ПАЭ). Первый основан на определении амплитудно-частотной характеристики (АЧХ) путем подачи на вход преобразователя гармонических механических колебаний калиброванной амплитуды с частотой, перестраиваемой в требуемом диапазоне частот [4]. Данная методика выполнения измерений при калибровке (поверке) преобразователей акустической эмиссии реализована и проводится в соответствии с МИ 1787-87 и МИ 2030-89.

Второй, реализуемый в создаваемой установке, предполагает возбуждение преобразователя импульсным сигналом и определение основных параметров из импульсной характеристики в соответствии с методикой ASTM Standard: E1106-92 [5, 6]. При измерениях параметров акустического преобразователя необходимо использовать средства измерений, позволяющие измерять абсолютные смещения поверхности объекта в широком динамическом диапазоне 10^{-9}–10^{-6} м с чувствительностью менее 0,1 нм в полосе рабочих частот 10^4–$2 \cdot 10^6$ Гц.

Наиболее перспективными являются бесконтактные оптические методы лазерной интерферометрии, обеспечивающие высокую чувствительность ($\leq 10^{-12}$ м) к смещению объекта, линейность в широком динамическом диапазоне, высокую локальность, абсолютный характер калибровки измерений в долях длины волны лазерного излучения и возможность автоматизации и обработки измерительной информации с помощью ПЭВМ.

Учитывая актуальность задачи метрологического обеспечения измерений параметров преобразователей акустической эмиссии в НИЦПВ создана эталонная установки на основе гетеродинной лазерной интерферометрии – фазометрии. Она реализует радиооптические цифровые фазовые методы измерений параметров ультразвуковых смещений. В основу работы эталонной установки положено сравнение измеряемых значений амплитуды ультразвукового смещения с высокостабильной мерой – длиной волны излучения стабилизированного гелий-неонового лазера. Сравнение осуществляется при помощи двухчастотного лазерного гетеродинного интерферометра, в измерительное плечо которого устанавливается калибруемое средство измерений (ПАЭ). Преобразование частоты излучения стабилизированного гелий-неонового лазера осуществляется с помощью акустооптических модуляторов с последующим выделением информационного сигнала на разностной частоте 1,0 МГц в фотоприемном устройстве (ФПУ) и обработкой полученной информации в специализированной электронно-фазометрической системе (ЭФС), сопряженной с ПЭВМ.

Эталонная установка обеспечивает работу в режиме динамических измерений амплитуды ультразвуковых смещений в реальном масштабе времени путем счета фазовых циклов (ФЦ) и добавленного к ним так называемого угла фазового сдвига (УФС), нормируемых в долях или единицах длины волны He-Ne лазера. Функциональная схема лазерной измерительной системы приведена на рис.1. Излучение стабилизированного He-Ne лазера направляется на две оптически связанные фазовые дифракционные решетки – акустооптические модуляторы, управляемые высокочастотным напряжением с частотами Ω_1 и Ω_2. В результате взаимодействия света, обладающего оптической частотой ω, с фазовыми решетками на выходе последней формируются два пучка света с частотами $\omega+\Omega_1$ и $\omega-\Omega_2$. Один из пучков – зондирующий (или информационный) с частотой $\omega+\Omega_1$ направляется на объект, испытывающий смещение. Второй пучок – опорный $\omega-\Omega_2$, направляется на неподвижное зеркало. В отраженном от объекта пучке содержится информация о фазовом сдвиге, обусловленном смещением объекта. Отраженный от объекта пучок и пучок, отраженный от неподвижного зеркала, совмещаются. Далее сигнал, содержащий информацию о фазовом сдвиге, регистрируется фотоприемником и обрабатывается на разностной частоте $\Omega_1-\Omega_2$. Такая схема измерений угла фазового сдвига и, как следствие, линейного смещения поверхности объекта позволила перейти от измерений фазы в оптическом диапазоне частот к измерениям сдвига фаз методами и средствами фазометрии радиодиапазона.

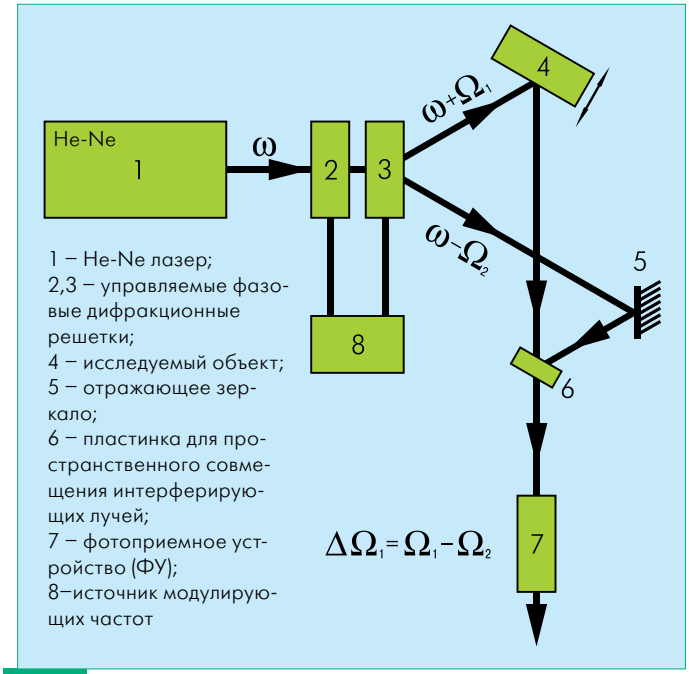

Рис.1 Функциональная схема лазерной интерференционной измерительной установки

Аттестация эталонной интерферометрической установки проводилась как поэлементно, так и путем сличения с УВТ для воспроизведения единиц амплитуды ультразвукового (УЗ) смещения, колебательной скорости частиц поверхности твердого тела и коэффициента электроакустического преобразования в диапазоне частот 10^3–$5 \cdot 10^7$ Гц (УВТ-58-А-89) с применением эталонной меры-калибратора акустического тракта, созданной в НПО «Дальстандарт» (Д-СТ). Диапазон значений амплитуд ультразвуковых смещений, воспроизводимых УВТ, составляет 10^{-10}–10^{-6} м, что обеспечивается высокой чувствительностью и широким динамическим диапазоном измерений используемого метода лазерной интерферометрии. Результаты сличений эталонных пьезопреобразователей в диапазоне частот 10^4–10^6 Гц,

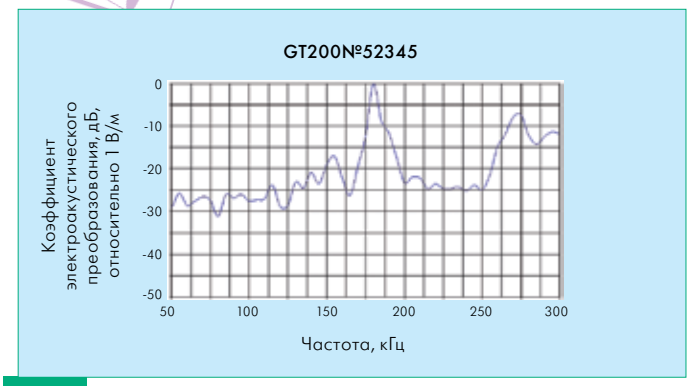

Рис.2 Результаты поверки преобразователя акустической эмиссии (ПАЭ): амплитудно-частотная характеристика серийно выпускаемого типа

проведенные на УВТ («Дальстандарт»), показали, что расхождение результатов измерений не превышает 5%.

Измерение амплитуд ультразвукового смещения при калибровке (поверке) преобразователей акустической эмиссии в диапазоне частот 10^4–10^6 Гц проводится сличением с аттестованной в индивидуальном порядке на эталонной интерферометрической установке мерой-калибратором акустического тракта (КАТ-3) или эталонным преобразователем акустического тракта (ПАЭ). Калибратор (КАТ-3) с отражающим зеркалом устанавливается в измерительное плечо интерферометра, и после тщательной юстировки на него подают импульс смещения длительностью 1^{-100} мкс, соответствующей рабочей полосе частот с нормированной амплитудой 1^{-10} В и определяют максимальное значение амплитуды ультразвукового смещения.

Амплитуду смещения (S_0) измеряют путем счета целых и дробной частей интерференционных полос и определяют по формуле

$$S_0(t) = \lambda/4\pi\{\Phi(t)N + \Delta\varphi(t)\},$$

где λ – длина волны излучения используемого лазера;
$\Phi(t)N$ – число целых полос интерференции, N = 0, 1, 2, ...;
$\Delta\varphi(t)$ – дробная часть полосы интерференции.

Коэффициент преобразования меры-калибратора (КАТ-3) определяют, используя выражение

$$K_м = \frac{S_0}{U},$$

где S_0 – максимальное значение амплитуды смещения в рабочей полосе частот, измеренное с помощью УВТ; U – значения импульсного напряжения, подаваемого на КАТ-3. Основная погрешность измерений амплитуды ультразвукового смещения ($\Delta S_{см}$) определяется по формуле

$$\Delta S_{см} = \sum_{i=1}^{n} \frac{S_э - S_0}{n},$$

где $S_э$ – максимальное значение амплитуды смещения эталонной меры-калибратора в рабочей полосе частот; n – число измерений в каждой серии.

Отличительной особенностью созданного лазерного гетеродинного интерферометра является простота оптической схемы, легкость его юстировки, малые габариты, быстродействие, помехозащищенность и надежность, обусловленные фазовыми методами обработки информационного сигнала [6]. В эталонной интерферометрической установке реализован принципиально новый метод аттестации лазерных измерителей перемещений и параметров вибрации в диапазоне 10^{-9}–10^{-3} м. Он основан на сравнении измеряемого УФС в диапазоне 0–360° с величиной калиброванного задаваемого эталонными фазовращателями УФС в радио и оптическом диапазонах с погрешностью меньше 0,1° фазы.

Известно, что основой системы метрологического обеспечения линейных измерений является структура передачи размера единицы длины от Государственного эталона единицы длины рабочим средствам измерений, регламентированная соответствующей поверочной схемой. Практическая реализация структуры передачи размера единицы длины в нанометровом диапазоне зависит от наличия соответствующих эталонных средств измерений на каждой ступени передачи. Современные подходы и требования мониторинга состояния объекта заключаются в том, чтобы в процессе выполнения диагностики объекта проводилось не только выявление дефекта как такового, но и измерения его важнейших параметров и характеристик, в том числе и в динамике. Рабочими средствами измерений являются преобразователи акустичесой эмиссии (ПАЭ). Они представляют собой первичные датчики разного рода дефектов и трещин, в том числе скрытых. Калибровка (поверка) ПАЭ при проведении мониторинга в процессе выполнения диагностики состояния объекта проводится в соответствии с методикой

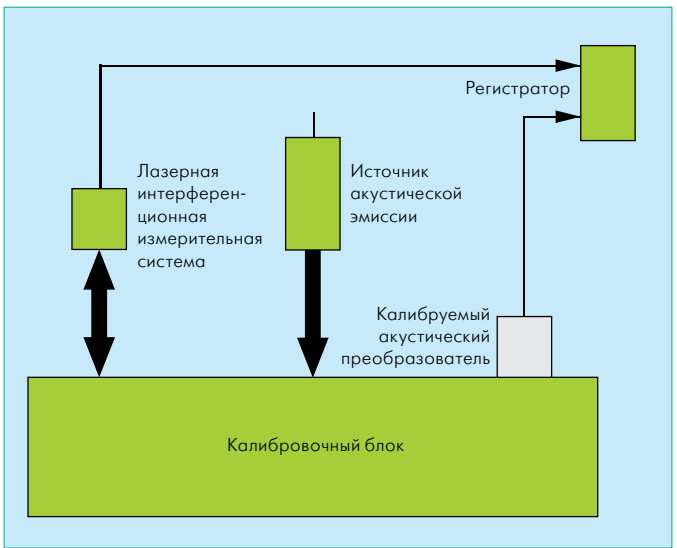

Рис.3 Схема калибровки акустического преобразователя

ASTM E1106-86 (Standard Method for PRIMERY CALIBRATION OF ACOUSTIC EMISSION SENSORS). Типичные результаты показаны на рис.2.

При использовании данного метода необходимо проводить измерение абсолютных динамических нормальных смещений поверхности калибровочного блока, возбуждаемых импульсным источником дельта-импульса либо источником ступенчатого смещения. На рис.3 представлена схема калибровки испытуемого акустоэлектрического преобразователя. Источник акустической эмиссии возбуждает калибруемый преобразователь, выходной сигнал с которого одновременно сравнивается с сигналом, поступающим на его вход, регистрируемым, в свою очередь, лазерной интерференционной измерительной системой.

Для подтверждения достоверности результатов измерений столь малых (порядка 0,1 нм) перемещений были проведены совместные измерения линейных перемещений стандартного образца атомарно чистой поверхности высокоориентированного пирографита [7]. Результаты вышеизложенного метода лазерной фазометрии рассматривались согласно стандартной процедуре совместно с результатами метода сканирующей туннельной микроскопии [8]. Получено пространственное разрешение 0,24 нм, что соответствует постоянной кристаллической решетки пиролитического графита, выбранного в качестве тестовой меры. Пирографит считается одним из эталонных материалов. Его особое свойство – зависимость шероховатости поверхности от напряжения, используемого для получения изображения поверхности, – является находкой для метрологических задач. Тем самым впервые осуществлена привязка параметра кристаллической решетки к длине волны стабилизированного He-Ne лазера [8].

Создание системы метрологического обеспечения [9,10] в области измерений акустической эмиссии на основе высокоточного лазерного интерферометра-фазометра с применением для передачи размера единицы длины в нанометровом диапазоне эталонной меры-калибратора акустического тракта позволит обеспечить высокую достоверность и единство измерений, повысить качество и надёжность сертификационных (поверочных) и калибровочных работ.

ЛИТЕРАТУРА

1. **Новиков Ю.А., Раков А.В., Тодуа П.А.** Нанометрологическая инициатива в Нанотехнологии. – Вестник технического регулирования, 2006, № 5(30).
2. **Лякишев Н.П.** Нанокристаллические структуры – новое направление развития конструкционных материалов. – Вестник РАН, 2003, том 73, № 5.
3. **Валиев К.А.** Исследования в области квантовых технологий в информатике и метрологии. – Вестник РАН, 2003, том 73, № 5.
4. **Клюев В.В., Матвеев В.И.** Современные возможности нанодиагностики. – Контроль. Диагностика, 2009, № 4.
5. **Желкобаев Ж., Календин В.В., Кухтевич В. И. и др.** – Устройство для измерения фазовых сдвигов ИК-диапазона. Авторское свидетельство № 506755, 21 ноября 1975г.
6. **Григорьев В. А., Желкобаев Ж., Календин В.В. и др.** – Фазометр оптического диапазона. Авторское свидетельство №1411572, 22 марта 1988г.
7. **Желкобаев Ж., Соболев С.С., Юрлова Г. А.** Исследование размерной стабильности углепластика методом лазерной интерферометрии. – Механика композитных материалов, 1992, №4.
8. **Власов И.Э., Желкобаев Ж.Е., Иванов В.И. и др.** Лазерная интерференционная измерительная установка для калибровки первичных преобразователей систем неразрушающего контроля особо опасных промышленных объектов. – Законодательная и прикладная метрология, 1999, №3.
9. **Желкобаев Ж., Календин В.В., Супьян В.Я. и др.** Способ регулирования угла фазового сдвига непрерывного лазерного излучения. Авторское свидетельство №1384046, 22 ноября 1987г.
10. **Владимиров Б. Г., Желкобаев Ж., Календин В.В. и др.** Патент на изобретение №2321849 от 10.05. 2008г. Приоритет изобретения 14.04.2005г. Способ калибровки преобразователей акустической эмиссии и устройство для его реализации.