

**ИЗМЕРЕНИЕ АМПЛИТУДНО-ЧАСТОТНЫХ ХАРАКТЕРИСТИК (АЧХ) И
КОЭФФИЦИЕНТОВ ЛИНЕЙНОГО ПРЕОБРАЗОВАНИЯ (КЛП)
ПРЕОБРАЗОВАТЕЛЕЙ АКУСТИЧЕСКОЙ ЭМИССИИ (ПАЭ)**

Работа посвящена измерению линейных смещений в нанодиапазоне, анализу особенностей такого рода работ, обеспечению единства измерений и стабильности измеряемой физической величины, достоверности результатов и их привязки к Государственному эталону единицы длины – метру и к Государственному эталону угла фазового сдвига (УФС) – градусу фазы. Рассмотрены критерии, которым должны соответствовать методы и средства, прецизионных измерений нанодиапазона, а также методы и средства съема и представления обработки получаемой информации. Сделан анализ основных источников погрешностей. Рассмотрены особенности построения измерительных комплексов, а также вопросы калибровки фазовых измерений в оптике. Рассмотрены вопросы прикладного характера: измерение реальных перемещений объектов в нанодиапазоне, определения их скорости и ускорения, а также вопросы внедрения разработанных методов в область практического применения. Приведены результаты экспериментальных и прикладных задач с использованием метода и средств численного гетеродинамирования, приведены формулы расчета измерения скорости смещения и ускорения и даны рекомендации по обеспечению экологического баланса с окружающей средой. Также в предлагаемой работе приведены источники проявления акустоэмиссионного явления, их роль и значимость в тех или иных производственных циклах. Расставлены приоритеты их применения в различных областях науки и техники. Рассмотрены вопросы практического использования явления акустоэмиссионного эффекта в различных контрольно-измерительных комплексах для определения дефектов, их размеров и мощности в различных технологических циклах: прокачка нефте- и газопроводов, магистральных водопроводах, особо нагруженных узлов железнодорожного транспорта и других техногенно-опасных объектов.

Ключевые слова: нанометрия-фазометрия, лазер, угол фазового сдвига (УФС), наносмещение, гетеродин, интерферометрия-фазометрия, нанометрология.

A.V. VASILEVA, S.A. DARZNEK, ZH.E. ZHELKOBAYEV, R.H. TSARBAEV
JSC “NICPV”, Moscow

**MEASUREMENT OF AMPLITUDE-FREQUENCY CHARACTERISTICS (AFC) OF ACOUSTIC EMISSION
TRANSFORMERS (AET) AND THEIR COEFFICIENTS OF LINEAR TRANSFORMATION**

The work is devoted to measurement of linear displacements in the nanoscale, analysis of features of this kind of work, ensuring the uniformity of measurements and stability of the measured physical quantity, reliability of results and their binding to the State standard of unit length - meter and to the state standard of the phase shift angle (UFS) - phase degree. The criteria that should be met by methods and tools, precision measurements of the nanoscale, as well as methods and means for the removal and presentation of the processing of the information received. The analysis of the main sources of errors is made. The features of the construction of measuring systems, as well as the issues of calibration of phase measurements in optics, are considered. Questions of an applied nature are considered: measurement of real displacements of objects in the nano-range, determination of their speed and acceleration, and also questions of introduction of the developed methods in the field of practical application. The results of experimental and applied problems using the method and means of numerical heterodyning are given, formulas for calculating the measurement of the displacement and acceleration velocity are given and recommendations are given for ensuring an ecological balance with the environment. Also in the proposed work are the sources of the manifestation of the acoustic emission phenomenon, their role and significance in these or those production cycles. The priorities of their application in various fields of science and technology are set out. The problems of practical use of the acoustic emission effect phenomenon in various test and measurement systems for determining defects, their sizes and power in various technological cycles are considered: pumping of oil and gas pipelines, main water pipelines, especially loaded railway transport junctions and some techno genic dangerous objects.

Key words: nanometry-phaseometry, laser, phase-shift angle (UFS), nanoscaling, heterodyne, interferometry-phaseometry, nanometrology.

1. Введение

В данной работе рассмотрены принципы построения фазоизмерительных комплексов нанодиапазона, а также вопросы калибровки фазовых измерений и проанализированы источники погрешностей.

С учетом большого класса шумов, используя лазерные интерферометры, можно измерять фазовые сдвиги на уровне $\sim 10(-3)$ градуса фазы на длине волны $\lambda = 0,6328$ мкм, что эквивалентно линейному смещению $\sim 0,01$ нм [1].

Измерители наноперемещений, созданные к настоящему моменту, максимально учитывают перечисленные выше требования, обеспечивая необходимое разрешение, быстродействие, минимальную погрешность, а также непосредственную привязку: к Государственному эталону единицы длины – метру и к Государственному эталону угла фазового сдвига (УФС) – градусу фазы.

Рассмотрены вопросы прикладного характера: измерение реальных перемещений объектов в нанодиапазоне, определения их скорости и ускорения, а также вопросы внедрения разработанных методов в область практического применения.

Приведены результаты, достигнутые с использованием рассмотренных методов нанометрии в

экспериментальных и прикладных задачах и реальные погрешности сопутствующие этим измерениям.

2. Схема измерений фазовых сдвигов

Принципиальная схема фазоизмерительной системы приведена на рис. 1.

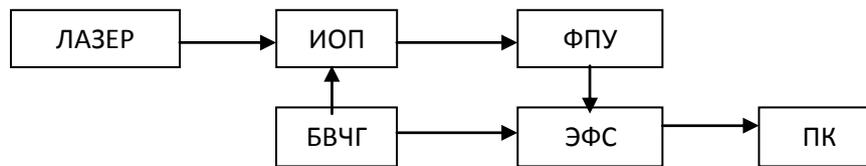


Рис. 1. Структурная схема измерительной системы, где ЛАЗЕР - источник высокостабилизированного оптического излучения; ИОП - интерференционный оптический преобразователь со встроенными акустооптическими модуляторами; ФПУ - фотоприемное устройство; БВЧГ - блок высокочастотных генераторов со встроенным электрическим смесителем; ЭФС - электронно-фазоизмерительная система; ПК - персональный компьютер

Для методов с переносом спектра пределы асимметричны и равны $\Delta\varphi_{Ton} < 2\pi$ для отрицательного значения f_g . Алгоритмические методы, восстанавливающие ФЦ по алгоритму $|\varphi_i - \varphi_{i-1}| = 180^\circ$ имеют предел $\Delta\varphi_{Ton} = \Delta\varphi_{Тизм} \leq 180^\circ$, где $\Delta\varphi_{Тизм}$ — приращение УФС за время измерения $T_{изм}$.

Максимальный доплеровский сдвиг частоты, обусловленный перемещением объекта, определяется как

$$f_D = 2V_{max} / \lambda, \quad (1)$$

где f_D — доплеровский сдвиг частоты, вызванный перемещением объекта, V_{max} — скорость смещения объекта, λ — длина волны излучения используемого лазера.

Отличительной особенностью данного типа лазерного фазометра является простота оптической схемы, относительная легкость юстировки, малые габариты, быстродействие, помехозащищенность и высокая надежность, обусловленные фазовыми методами обработки информационного сигнала.

Необходимо особо отметить то обстоятельство, что в данной схеме АОМ-ы выполняют дополнительную роль управляемых делителей входного оптического излучения, обеспечивая, таким образом, управляемость контрастностью поля интерференции.

Базовый программный продукт, обеспечивает сбор, обработку и хранение информации, выдачу её потребителю на бумажных и электронных носителях. Информация выдаётся в виде редактируемых файлов: «перемещение», «скорость», «ускорение», «амплитуда смещения», «фурье-спектр».

Представленные результаты, получены с использованием гетеродинного метода измерений смещений в нанодиапазоне. В частности, измерение колебательного смещения свободного конца пьезостолбика при подаче на него модулирующего сигнала различной частоты и формы (рис. 2), амплитудно-частотной характеристики преобразователя акустической комиссии систем неразрушающего контроля (рис. 3, 4).

3. Контроль параметров движения

3.1. Измерение смещения, скорости и ускорения в нанодиапазоне

Работам, ведущимся в области нанотехнологий необходима высокая точность и достоверность получаемых результатов, т.е. нужно соответствующее метрологическое обеспечение приборов и средств используемых при измерении линейных размеров, перемещений, скорости и ускорений нанообъектов. Эти высокоточные системы и приборы нуждаются в особых методах и средствах поверки/калибровки.

Для измерения линейных перемещений в нанодиапазоне наиболее перспективными являются неразрушающие оптические методы лазерной интерферометрии-фазометрии, обеспечивающие высокую чувствительность $\sim 10^{-12}$ м к смещению объекта, высокую локальность, абсолютный характер калибровки измерительных данных в долях длины волны лазерного излучения и возможность автоматизации обработки измерительных данных. Необходимо отметить, что в целом область применимости методов лазерной интерферометрии-нанометрии сверху ограничена длиной когерентности излучения частотно-стабилизированных лазеров ($\geq 10^2$ м), а снизу порогом чувствительности приемников излучения $\sim 10^{-10}$ м.

Внутри этих границ требования, предъявляемые к лазерно-интерферометрическим измерителям линейных перемещений, существенно разнятся от того, для работы в какой части этого диапазона они предназначены.

Как отмечалось выше, в основу работы лазерной измерительной системы (ЛИС) положено сравнение измеряемого изменения длины оптического пути с высокостабильной мерой — длиной волны излучения стабилизированного гелий-неонового лазера. Сравнение осуществляется при помощи двулучевого лазерного гетеродинного интерферометра, в котором производится разделение лазерного излучения на опорный и измерительный пучки, идущие с разными частотами, и последующее совмещение излучения на смесительном элементе. Преобразование частоты излучения стабилизированного одночастотного гелий-неонового лазера осуществляется с использованием акустооптических модуляторов (АОМ).

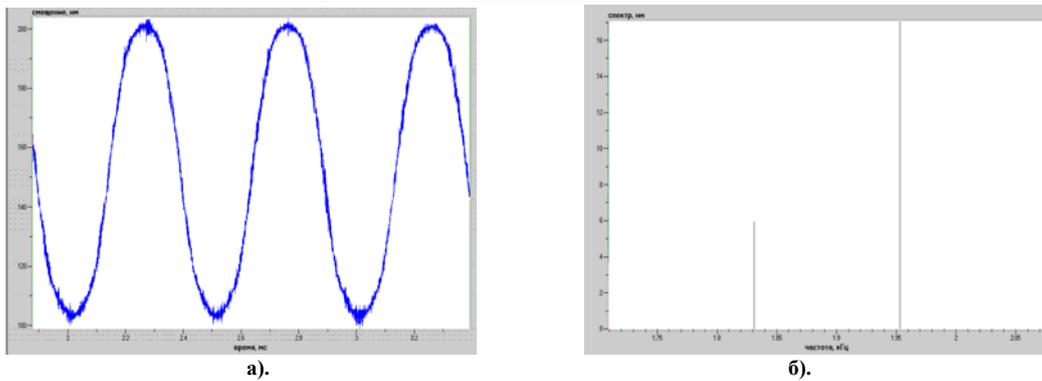


Рис. 2. График смещения (а) свободного конца пьезостолбика колебания при подаче на него гармонического колебания и его спектральное представление (б)

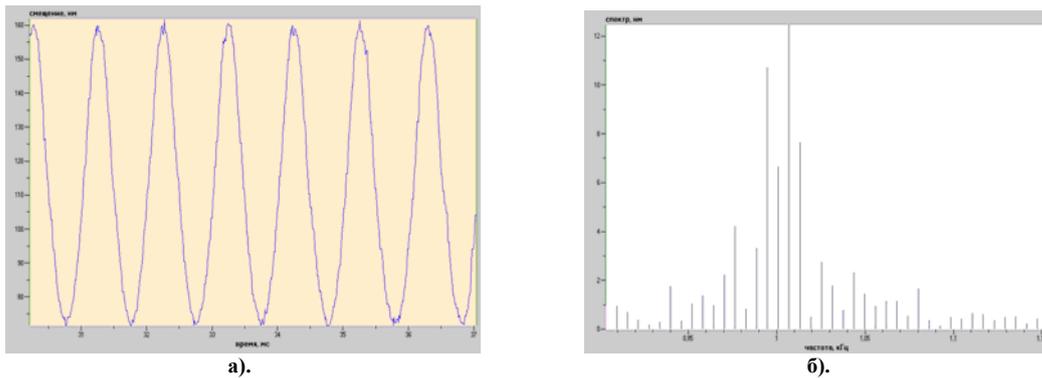


Рис. 3. График смещения (а) свободного конца пьезостолбика при подаче синусоидального колебания и его спектральное представление (б), $f \approx 1$ кГц; $U = 6V(p/p)$

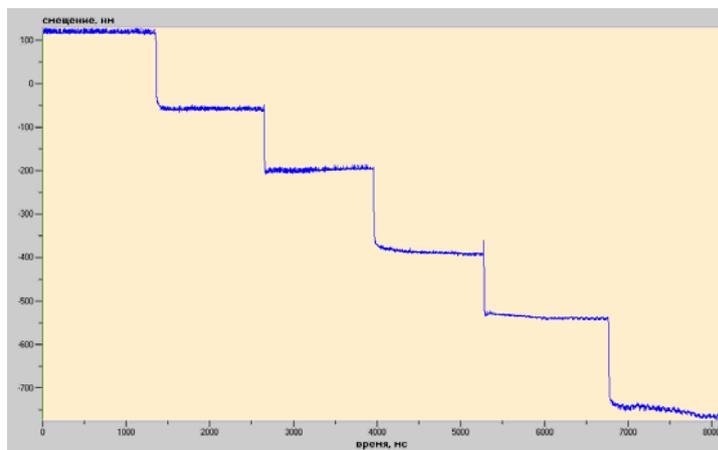


Рис. 4. График смещения свободного конца пьезостолбика при подаче напряжения шагом 10В в диапазоне «0-50В»

Известно [4–8], что при распространении ультразвуковых волн в конденсированных средах образуется высокочастотная пространственная фазовая решетка, при попадании на эту решетку свет испытывает дифракцию. При некоторых условиях (называемых условиями Брэгга) от падающего света выделяется единственный дифрагированный пучок излучения. Величина углового отклонения пучка определяется из соотношения.

$$\sin \theta_B = \frac{\lambda}{2\Lambda} \quad , \quad (2)$$

где λ – длина волны падающего излучения, Λ — длина акустической волны, θ_B – угол Брэгга.

На рисунке $5\Omega_1$ и K_1 – частота и волновой вектор ультразвуковой волны, проходящей через первый АОМ, а Ω_2 и K_2 – частота и волновой вектор ультразвуковой волны, проходящей через второй АОМ. Векторы k_{+1} и k_{-1} волновые векторы волн, испытывающих брэгговскую дифракцию на двух модуляторах.

В измерительной установке реализован вариант, схематически представленный на рисунке 5, с использованием двух АОМ. Оптический пучок, с частотой ω_0 (нулевой пучок), проходя через первый модулятор под углом Брэгга, дифрагирует на бегущей с частотой Ω_1 дифракционной решетке, разделяясь на два пучка с частотами ω_0 и $\omega_0 + \Omega_1$ (плюс первый пучок). Далее нулевой пучок проходит через второй модулятор с частотой Ω_2 под углом Брэгга и разделяется опять на два пучка с частотами ω_0 и $\omega_0 - \Omega_2$ (минус

первый пучок). Таким образом, на выходе АОМ мы получаем три пучка: нулевой, плюс первый и минус первый. Один из полученных пучков (например, плюс первый), падая на образец и отражаясь, получает информацию о перемещениях объекта в виде набега угла фазового сдвига $\Delta\varphi$ (информационный пучок); другой пучок проходит свой оптический путь, не соприкасаясь с образцом (опорный пучок). Нулевой пучок поглощается дополнительным устройством. Далее информационный и опорный пучки интерферируют, падая на фотоприемное устройство (ФПУ). Последующее выделение информационного сигнала происходит на разностной частоте $|\Omega_1 - \Omega_2|$ в ФПУ. Обработка полученной информации производится в специализированной электронно-фазометрической системе (ЭФС). ЭФС подключен к персональному компьютеру. Программное обеспечение позволяет в режиме диалога осуществлять сбор измерительных данных, их обработку и представление в виде, удобном для пользования.

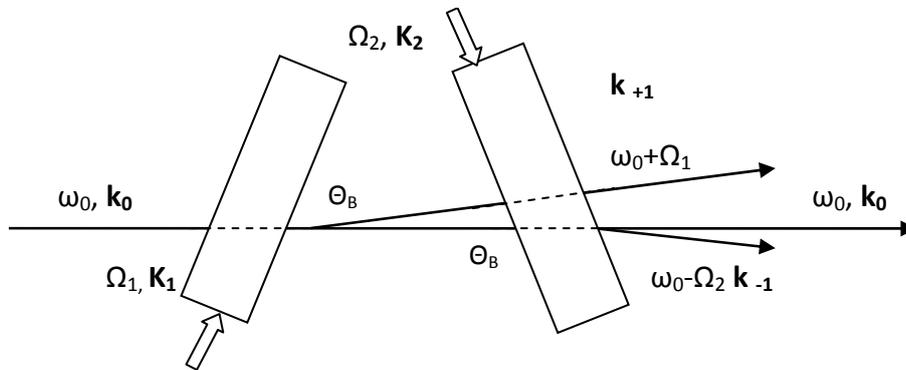


Рис. 5. Схема дифракции Брэгга при распространении лазерного излучения (с частотой ω_0 и волновым вектором k_0) через два акустооптических модулятора (АОМ)

Система ЛИС включает в себя:

- стабилизированный гелий-неоновый лазер;
- интерференционный оптический преобразователь с включением двух акустооптических модуляторов (АОМ);
- фотоприёмное устройство (ФПУ);
- электронно-фазометрическую систему (ЭФС);
- блок высокочастотных генераторов (ВЧГБ);
- интерфейс связи;
- персональный компьютер;
- программное обеспечение.

ЛИС обеспечивает работу в режиме измерений перемещений ΔX в реальном масштабе времени путем счета фазовых циклов (ФЦ) и добавленного к ним так называемого угла фазового сдвига (УФС) $\Delta\varphi$:

$$\Delta X = \left(N + \frac{\Delta\varphi}{2\pi} \right) \cdot \frac{\lambda}{2n} \quad (3)$$

где N – фазовые циклы ($N=0,1,2,3,\dots,N$),
 $\Delta\varphi$ – угол фазового сдвига, n –
 показатель преломления среды

Оптическая система ЛИС представляет собой двулучевой модифицированный интерферометр Майкельсона. Функциональная схема ЛИС представлена на рисунке 6.

ЛИС обладает диапазоном измерений линейных перемещений 10^{-9} – 10^{-2} м, с дискретностью отсчёта 0.1 нм и быстродействием обусловленной выбранной разностной частотой. Диапазон абсолютной погрешности измерений, в зависимости от диапазона, укладывается в промежуток от 0.5 до 3 нм. Такие технические характеристики дают возможность решать широкий спектр задач.

Диапазон линейных измерений, при небольших значениях

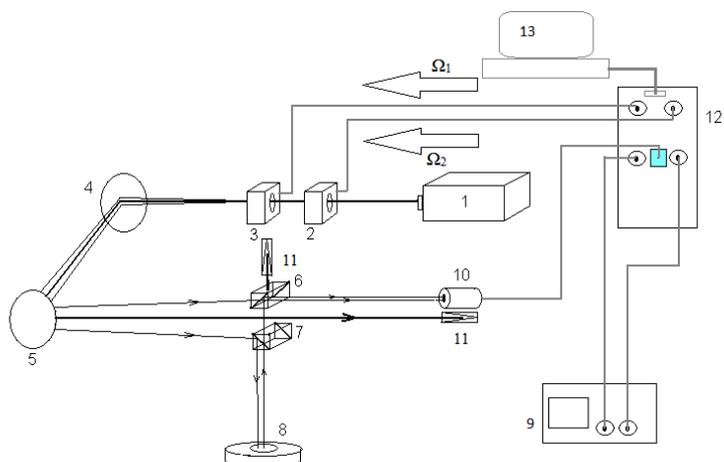


Рис. 6. Структурно-функциональная схема ЛИС-01М
 1 – лазер ЛГН 302; 2, 3 – АОМ; 4, 5 – зеркала; 6, 7 – светоделительные элементы; 8 – образец с нанесённым отражающим покрытием; 9 – осциллограф; 10 – фотоприёмник; 11 – поглотитель нерабочего пучка; 12 – ЭФС; 13 – ПК и/или ноутбук

падающей на приемник оптической мощности ограничен шумами фотоприёмного устройства. Однако фазовые измерения ограничены не только шумами фотоприёмника, но также и флуктуациями самой фазы. Нестабильность фазы имеет с одной стороны, квантовую природу, а с другой стороны она может быть обусловлена флуктуациями оптической длины пути. Флуктуации оптического пути, в свою очередь, вызваны самими разнообразными причинами: температурными вариациями длин плеч интерферометра и показателей преломления оптических элементов, механическими, акустическими и микросейсмическими колебаниями. Данные виды колебаний ограничивают чувствительность и точность фазовых измерений. Эти значения можно улучшить сужением полосы приема, т.е. увеличением времени измерений.

Однако при достаточно больших временах измерения вариаций фазового сдвига существенное значение имеет его стабильность. Температурные изменения, механическая текучесть, старение образцов, изменение состояния окружающей среды приводят к изменению длины оптического пути, т.е. к дрейфу фазового сдвига.

Можно показать, что с учетом большого класса шумов, используя лазерные интерферометры, можно измерять фазовые сдвиги $\sim 10^{-2}$ градуса фазы на длине волны $\lambda=0.6328$ мкм, что эквивалентно линейному смещению ~ 0.1 нм.

Как указывалось выше, верхний предел измерений ограничен длиной когерентности излучения лазера, а нижний шумами фотодиода и, конечно, особенностями конструкторской реализации всего комплекса.

Установка позволяет проводить измерение амплитудно-частотных характеристик различных объектов. Рассмотрим исследование актюатора, у которого один конец закреплен, а другой является свободным. Актюатор используется для преобразования электрического напряжения в перемещение, пропорциональное приложенному сигналу. На исследуемый образец подается напряжение, от генератора переменных сигналов, с частотой «f». Измерительная система позволяет изучать характеристики объекта при различных видах воздействия: импульсного характера, пилообразного и гармонического вида.

Ещё одним примером типовых измерений является статические измерения перемещения образца. В данном случае, на образец подаётся постоянное напряжение через заданные промежутки времени, данный тип измерений позволяет изучить такие характеристики актюатора, как гистерезис и крип, а также узнать зависимость смещения образца в зависимости от прикладываемого напряжения рисунках 7, 8, 9.

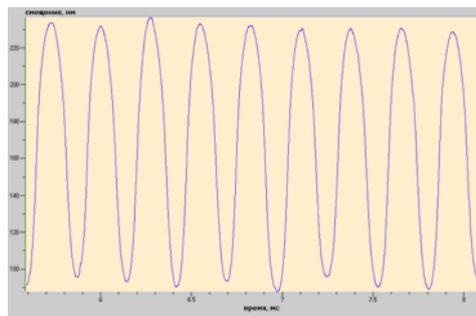
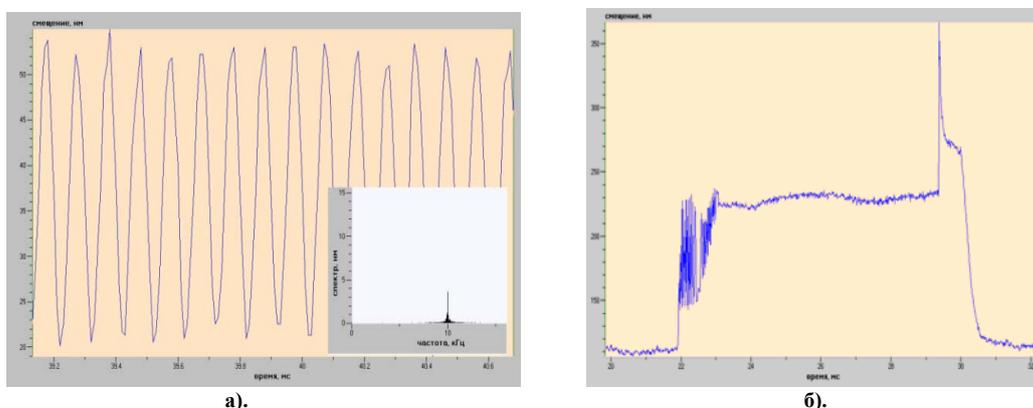


Рис. 7. АЧХ актюатора типа АПМ

На рисунках 8 (а,б) и 9 (а,б) представлены результаты исследований фазосдвигающих устройств (ФСУ), изготовленных из пьезокерамических структур.



а). б).
Рис. 8. Отклик ФСУ-1: а) на сигнал с $f=10$ кГц и спектр отклика; б) на импульсное напряжение в 20В

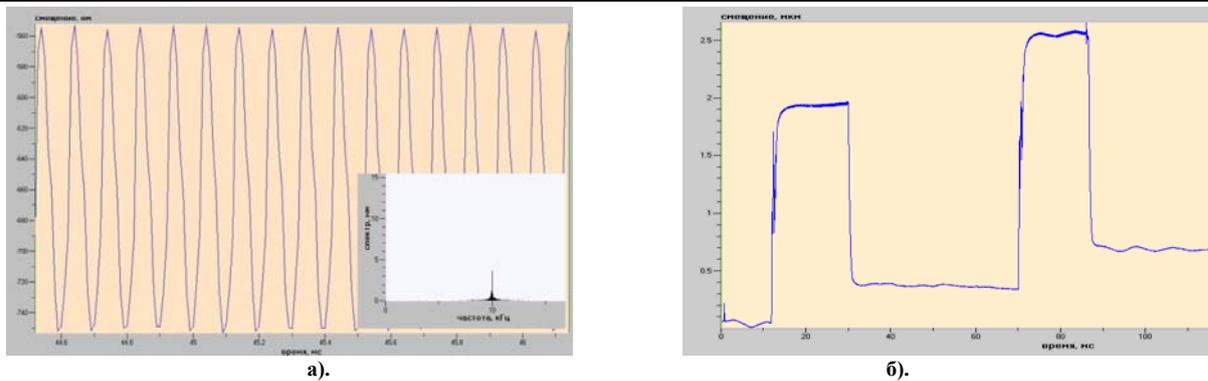


Рис. 9. Отклик ФСУ-2: а) на сигнал с $f=10\text{кГц}$ и спектр отклика; б) на импульсное напряжение в 50В. Погрешность измерений лежит в диапазоне (6-8)%

Глубокая программная обработка позволяет получать такие параметры, как скорость и ускорение движения объекта.

Развитие наноиндустрии невозможно без точных и надёжных диагностических инструментов. Сканирующая зондовая микроскопия (СЗМ) является одной из немногих методик, позволяющих исследовать наноразмерные структуры и визуализировать поверхность материалов с атомарным разрешением. При этом СЗМ позволяет проводить измерения целого ряда пространственно распределённых параметров, таких как модуль упругости, твёрдость, электропроводность, а также получать топографические изображения формы поверхности и её свойств. Основным источником погрешности в СЗМ является неточность определения положения объекта во время сканирования. Емкостные датчики, традиционно применяемые в СЗМ, измеряют, перемещение опосредовано. Оценить или как-то учесть вносимую ими погрешность практически невозможно. В отличие от них, измерения, осуществляемые лазерным интерферометром, как прибором, проводящим сравнение величины перемещения объекта с длиной волны лазерного излучения, носят первичный характер. Поэтому лазерная интерферометрия в настоящее время становится основным метрологическим обеспечением средств измерений в нанометровом диапазоне перемещений [1].

На данный момент, на базе уже существующих измерителей создан прототип 3D-измеритель наноперемещений, в основу которого положены принципы работы гетеродинного интерферометра. Она совмещалась с атомно-силовым микроскопом (АСМ) и позволяла не только производить более точные измерения наноразмерных образцов, но и калибровать сами АСМ, привязывая их к Государственному первичному эталону единицы длины – метру, и к Государственному эталону угла фазового сдвига – градусу фазы.

Представленная измерительная система «интерферометр-фазометр» позволяет исследовать в реальном режиме времени, сложные по составу пьезокерамические структуры, используемые в различных устройствах в качестве актюаторов.

3.2 Вычисление перемещений, скорости и ускорений

Для расчета смещения подвижного зеркала $s(t)$ в лазерном интерферометрическом измерителе перемещений [5, 6] использована методика численного гетеродинирования сигнала фотоприемника. Оцифрованный сигнал фотоприемника умножался на систему базовых гармоник $\cos \Omega t$ и $\sin \Omega t$ несущей частоты Ω , а затем из произведения методом численной фильтрации удаляется высокочастотная компонента. Полученные низкочастотные составляющие использовались для восстановления искомого зависимости смещения зеркала $S(t)$. Для численной фильтрации использовался фильтр Баттерворта в частотном домене.

Такая методика позволяет рассчитывать смещение зеркала с шагом по времени, значительно меньшим, чем в методе временных интервалов [5]. Приведены результаты обработки экспериментальных данных по измерению временной зависимости колебаний зеркала интерферометра с амплитудой порядка десятков нанометров на частотах в диапазоне кГц.

Принципиальная схема лазерного гетеродинного интерферометра представлена на рисункеб. В интерферометрах такого типа луч света от He-Ne лазера 1 сначала проходит через блок из двух оптико-акустических дефлекторов 2 и 3. Дифрагируя на ультразвуковой волне дефлектора, свет отклоняется от оптической оси системы и приобретает дополнительный сдвиг частоты, равный частоте ультразвуковой волны. В результате луч лазера расщепляется на два пучка, распространяющихся под углом друг к другу. Разность частот между ними равна разности частот акустических волн в дефлекторах F и лежат в диапазоне 10–1000 кГц.

Один из этих лучей — опорный — после отражения от поворотного зеркала 4 поступает на фотоприемник 9, а второй — сигнальный — сначала направляется на подвижное зеркало интерферометра 7. Подвижное зеркало закрепляется на торце пьезоэлектрического элемента, которое исполняло роль вибратора. При подаче переменного напряжения на пьезоэлемент его длина периодически изменяется, и зеркало интерферометра совершает колебания, форма которых близка к синусоидальной. (См. рисунок 1)

В результате интерференции опорного и сигнального лучей на фотоприемнике возникает частотно модулированный сигнал

$$I(t) = I_1 + I_2 + 2\sqrt{I_1 I_2} \cos \Phi(t), \tag{4}$$

где I_1 и I_2 — интенсивности лучей, $\Phi(t) = \Omega t + \varphi(t)$, $\Omega = 2\pi F$ - разностная акустическая частота, а $\varphi(t)$ — разность фаз опорного и сигнального лучей, связанная со смещением подвижного зеркала $s(t)$ формулой

$$\varphi(t) = \frac{4\pi}{\lambda_{\text{в}}} s(t), \tag{5}$$

где $\lambda_{\text{в}}$ — длина волны света в воздухе.

В качестве устройства сбора данных в наших экспериментах использовался быстродействующий запоминающий осциллограф Tektronix TDS2014B, который с заданным шагом по времени оцифровывал сигнал фотоприемника и записывал его в виде файла. Полученный файл загружался в специально разработанную программу, которая рассчитывала искомую временную зависимость смещения зеркала $s(t)$ по известному сигналу фотоприемника $I(t)$ в соответствии с разработанной методикой.

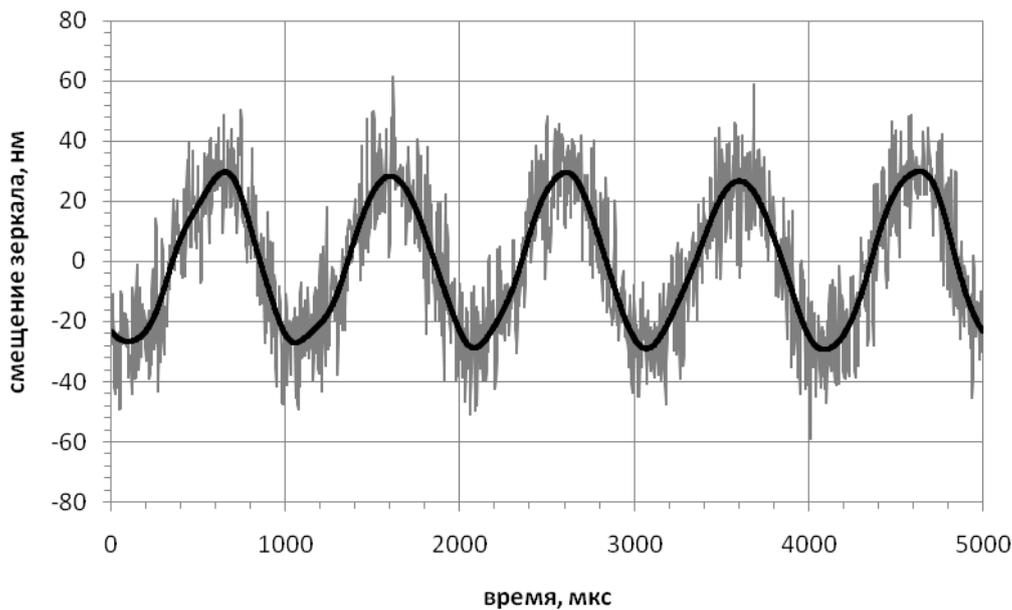


Рис. 10. Расчётная зависимость смещения подвижного зеркала от времени для различных параметров фильтра Баттерворта. Серая тонкая кривая соответствует «мягкому» фильтру с частотой среза $f_c = 99,5$ кГц, а жирная пунктирная — «жесткому» с $f_c = 3,9$ кГц

4. Калибровка /поверка преобразователей акустической эмиссии (ПАЭ)

4.1 Преобразователи акустической эмиссии (ПАЭ)

Создание лазерного гетеродинного интерферометра с двойным преобразованием входного лазерного излучения в широком диапазоне частот, дает возможность проводить поверку/калибровку преобразователей акустической эмиссии (ПАЭ).

Среди широкого спектра методов и средств неразрушающего контроля значительное место занимают акустические методы [7, 8], к которым относятся ультразвуковая дефектоскопия и метод акустической эмиссии (АЭ). В акустических методах в качестве первичных преобразователей в большинстве случаев используются акустоэлектрические преобразователи, принцип действия которых основан на преобразовании механического (акустического) смещения поверхности в электрический сигнал. Это так называемые преобразователи акустической эмиссии (ПАЭ).

4.2 Неразрушающая техническая диагностика (ТД)состояния промышленного оборудования

На современном этапе развития промышленности вопросы обеспечения надежной работы комплектующих изделий, оборудования и энергоснабжения приобретают первостепенное значение. Особое внимание к проблеме обеспечения промышленной безопасности объясняется тем, что современные производственные объекты работают в условиях повышенной нагрузки; возрастают параметры рабочих сред (давление, температура, химическая и радиационная активность); повышаются мощность и производительность отдельных блоков. Отказы в работе изделий, оборудования, коммуникаций, трубопроводов ведут к значительным экономическим потерям, в том числе обусловленными и нарушениями экологического баланса. Все это определяет необходимость системного подхода к оценке надежности работы производственных объектов, когда на первое место выдвигаются методы технической диагностики и неразрушающего контроля.

4.3 Физические основы метода неразрушающего контроля

Пластическая деформация твердых сред, развитие дефектов, трения, прохождение жидких и газообразных сред через узкие отверстия, неизбежно порождают волны, регистрируя которые, можно судить о протекании процессов и их параметрах [9].

4.3.1 Виды акустической эмиссии

«1. Акустическая эмиссия материала – акустическая эмиссия, вызванная локальной динамической перестройкой структуры материала;

2. Акустическая эмиссия утечки – акустическая эмиссия, вызванная гидродинамическими и/или аэродинамическими явлениями при протекании жидкости (газа) через сквозную несплошность объекта испытаний;

3. Акустическая эмиссия трения – акустическая эмиссия, вызванная трением поверхностей твердых тел;

4. Акустическая эмиссия при фазовых превращениях – акустическая эмиссия, связанная с фазовыми превращениями в веществах и материалах;

5. Магнитная акустическая эмиссия – акустическая эмиссия, связанная с излучением звуковых волн при перемагничивании материалов;

6. Акустическая эмиссия радиационного взаимодействия – акустическая эмиссия, возникающая в результате нелинейного взаимодействия излучения с веществами и материалами;

7. Акустическая эмиссия при химических и электрохимических реакциях – акустическая эмиссия, возникающая в результате протекания химических и электрохимических реакций, включая разнообразные коррозионные процессы».

ПРИМЕЧАНИЕ: Из перечисленных видов АЭ наибольшее применение для контроля промышленных объектов нашли первые три.

4.4 Акустоэмиссионный метод неразрушающего контроля

Среди широкого спектра методов и средств неразрушающего контроля (НК) значительное место занимают акустические методы, к которым относятся ультразвуковая дефектоскопия и метод акустической эмиссии (АЭ).

В акустических методах в качестве первичных преобразователей в большинстве случаев используются акустоэлектрические преобразователи, принцип действия которых основан на преобразовании механического (акустического) смещения поверхности в электрический сигнал.

Метод АЭ успешно применяется для диагностирования технического состояния промышленных объектов: больших емкостей, металлических строительных конструкций, трубопроводов, мостов, различных узлов и устройств железнодорожного транспорта и т.д. Основным макроисточником такой эмиссии в твердом теле выступают фазовые превращения, образование и рост дефектов. Микромеханизмом АЭ является динамический разрыв атомных связей.

Метод АЭ – один из наиболее мощных средств контроля за безаварийной работой оборудования опасных производственных объектов. Основное достоинство метода – возможность с его помощью выявлять и классифицировать развивающиеся дефекты не по размерам, а по степени их опасности для контролируемого объекта. Возможность работы в реальном времени делает метод АЭ незаменимым при исследовании механизмов перестройки структуры твердого тела и контроле промышленных объектов. Кроме того, метод АЭ обладает рекордно высокой чувствительностью по сравнению с другими методами неразрушающего контроля. При акустической эмиссии амплитуда колебаний поверхности твердого тела, как правило, не превышает нескольких нанометров, поэтому использование лазерного интерферометра – нанометра для калибровки (поверки) ПАЭ не вызывает сомнений, а абсолютная привязка к Государственному эталону единицы длины – метру, обеспечивает высокую достоверность полученных результатов.

Метод АЭ [7, 8] позволяет наблюдать и исследовать динамику процесса деформации, разрушения, перестройки структуры, химических реакций, взаимодействия излучения с веществом и т.п.

При детектировании АЭ используется явление пьезоэффекта (прямой и обратный эффект). Для этих целей применяются приемники акустической эмиссии (ПАЭ). В России выпускают приемники акустической эмиссии различных модификаций в промышленных масштабах, например, фирма «ГлобалТест». Обработку измерительных данных обеспечивает оборудование фирмы «Интерюнис». Качество этих средств находится на хорошем, современном уровне, и имеют возможность обновления.

Объектами тотального контроля являются магистральные нефте-газопроводы, химические и атомные реакторы, мосты, особо нагруженные элементы железнодорожных систем, оборудование ЖКХ и т.п. ПАЭ выпускают в виде различных модификаций и назначения, с встроенным усилителем или без него. В промышленности наибольшее распространение получили ПАЭ типа



Рис. 11. Преобразователь акустической эмиссии типа GT200, работающий в диапазоне частот (50-250) кГц

GT200, рисунок 11. При поверке/калибровке ПАЭ используется ЛИС-01М.

Чувствительность используемых в промышленности приборов АЭ, в которых для преобразования акустического сигнала в электрический используется пьезоэлектрическая керамика, позволяет выявлять образование трещины на площади $\sim 1 \times 1 \text{ мкм}^2$. Для обнаружения дефектов меньших размеров необходимо использовать более совершенные методики выделения сигналов из шумов и более чувствительные пьезоматериалы для преобразователей АЭ.

К основным параметрам и техническим характеристикам акустических преобразователей относятся коэффициент преобразования “смещение – электрический сигнал”, амплитудно-частотная характеристика, коэффициент затухания импульсной характеристики.

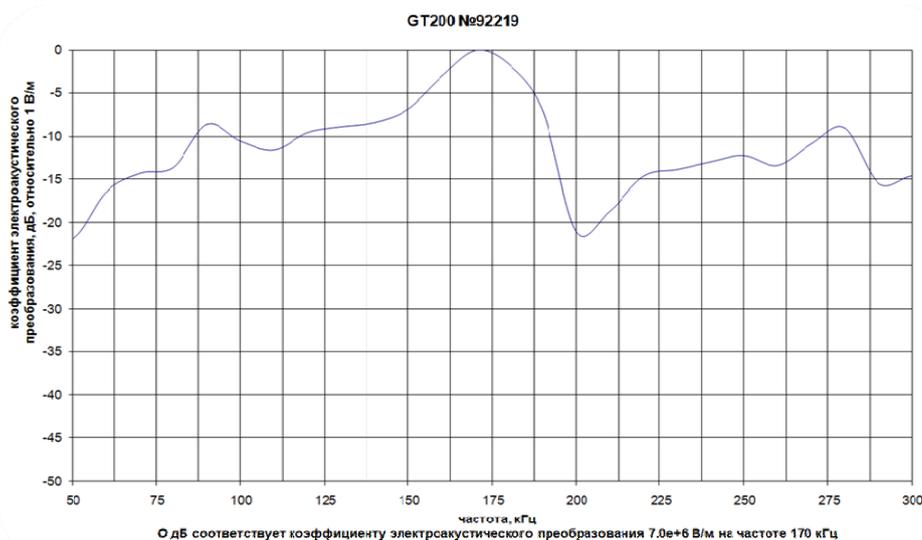


Рис. 12. Амплитудно-частотная характеристика серийно выпускаемого преобразователя АЭ типа GT200, измеренная по описанному методу



Рис. 13. География предприятий-заказчиков для поверки/калибровки систем неразрушающего контроля на территории России и ближнего зарубежья

ВЫВОДЫ

1. Разработан, запатентован и внедрен в промышленных масштабах экспресс-метод калибровки/поверки преобразователей акустической эмиссии.
2. Создан новый метод измерения наносмещений и программное обеспечение к нему, позволяющий в режиме диалога анализировать полученную информацию.
3. Создан новый класс измерительных систем, позволяющий эффективно синтезировать достижения в области фазометрии радио-диапазона с возможностями оптической интерферометрии-нанометрии.

Литература

1. Лазерный интерферометрический измеритель наноперемещений / С.А. Дарзбек, Ж. Желкобаев, В.В. Календин, Ю.А. Новиков // Труды ИОФАН им. А.М. ПРОХОРОВА РАН. – Том 62. – С. 15–35.
2. Мезон У. Физическая акустика / Мезон У. – Москва : Мир, 1974. – Том VII. – 432 с.

3. Корпел А. Акустооптика / Корпел А. – Москва : Мир, 1988. – 240 с.
4. Магдич Л.Н. Акустооптические явления и их применение / Магдич Л.Н., Молчанов В.Я. – Москва : Советское радио, 1978. – 112 с.
5. Арманова М.В. Измерение скорости и ускорения с помощью лазерного интерферометрического фазометра / М.В. Арманова, С.А. Дарзнец, Ж. Желкобаев, П.А. Тодуа // Сборник докладов 20-й Международной конференции «Лазеры. Измерения. Информация». – Санкт-Петербург : Изд-во Политехнического университета, 2010. – Т. 2. – С. 326–335.
6. Арманова М.В. Лазерный гетеродинный интерферометр с прямым расчетом смещения подвижного зеркала по сигналу фотоприемника / М.В. Арманова, С.А. Дарзнец, Ж. Е. Желкобаев, П.А. Тодуа // Сборник докладов 22-й международной конференции «Лазеры. Измерения. Информация». – Санкт-Петербург : Изд-во Политехнического Университета, 2012. – Том 2. – С. 225–231.
7. Авторское свидетельство № 1411572. Фазометр оптического диапазона / В.А. Григорьев, Ж. Желкобаев, В.В. Календин, В.И. Кухтевич, В.Я. Супьян, Г.Ф. Фролов, И.В. Троцишин. – 1988.
8. Патент № 2321849. Способ калибровки преобразователей акустической эмиссии и устройство для его реализации / Владимиров Б.Г., Желкобаев Ж., Календин В.В., Несмеянов С.С., Тодуа П.А. – 2008.
9. Иванов В.И. Методы и средства акустико-эмиссионной диагностики / В.И. Иванов // Неразрушающий контроль и диагностика : справочник. – Москва : Изд-во «Машиностроение», 2005. – С. 301–327.

References

1. Lazernyy interferometricheskiy izmeritel nanoperesmicheniy / S.A. Darznez, J. Jelkobaev, V.V. Kalendin, YU.A. Novikov // Trudy IOFAN im. A.M. PROKHOROVA RAN. – Tom 62. – S. 15–35.
2. Mezon U. Fizicheskaya akustika / Mezon U. – Moskva : Mir, 1974. – Tom VII. – 432 s.
3. Korpel A. Akustooptika / Korpel A. – Moskva : Mir, 1988. – 240 s.
4. Magdich L.N. Akustoopticheskie yavleniya i ih primeneniye / Magdich L.N., Molchanov V.YA. – Moskva : Sovetskoye radio, 1978. – 112 s.
5. Armanova M.V. Izmereniye skorosti i uskoreniya s pomoshchyu lazernogo interferometrcheskogo fazometra / M.V. Armanova, S.A. Darznez, J. Jelkobaev, P.A. Todua // Sbornik dokladov 20-y Mejdunarodnoy konferentsii «Lazeryi. Izmereniya. Informatsiya». – Sankt-Peterburg : Izd-vo Politehnicheskogo universiteta, 2010. – T. 2. – S. 326–335.
6. Armanova M.V. Lazernyy geterodinnyy interferometr s pryamyim raschetom smescheniya podvijnogo zerkala po signalu fotopriemnika / M.V. Armanova, S.A. Darznez, J. E. Jelkobaev, P.A. Todua // Sbornik dokladov 22-y mejdunarodnoy konferentsii «Lazeryi. Izmereniya. Informatsiya». – Sankt-Peterburg : Izd-vo Politehnicheskogo Universiteta, 2012. – Tom 2. – S. 225–231.
7. Avtorskoye svidetelstvo № 1411572. Fazometr opticheskogo diapazona / V.A. Grigorev, J. Jelkobaev, V.V. Kalendin, V.I. Kuhtevich, V.YA. Supyan, G.F. Frolov, I.V. Trotsishin. – 1988.
8. Patent № 2321849. Sposob kalibrovki preobrazovateley akusticheskoy emissii i ustroystvo dlya ego realizatsii / Vladimirov B.G., Jelkobaev J., Kalendin V.V., Nesmeyanov S.S., Todua P.A. – 2008.
9. Ivanov V.I. Metodyi i sredstva akustiko-emissionnoy diagnostiki / V.I. Ivanov // Nerazrushayuschiy kontrol i diagnostika : spravochnik. – Moskva : Izd-vo «Mashinostroeniye», 2005. – S. 301–327.

Рецензія/Peer review : 8.9.2018 р. Надрукована/Printed : 19.9.2018 р.
Рецензент: д.т.н., проф. Троцишин І.В.