

Министерство высшего и среднего специального образования РСФСР

Ленинградский ордена Ленина и ордена Октябрьской Революции
электротехнический институт имени В.И.Ульянова (Ленина)

Методические указания
к лабораторным работам по дисциплине
"КОЛЕБАНИЯ И ВОЛНЫ"
(в твердых средах)

Ленинград
1988

Методические указания к лабораторным работам по дисциплине "Колебания и волны" (в твердых средах)/Сост.: Е.К. Гусева, А.В. Харитонов; ЛЭТИ. - Л., 1988. - 27 с.

В методических указаниях содержится описание методики измерения параметров и характеристик колебательных систем в виде стержней и пластин. Рассмотрены физические основы колебательных процессов, методики измерения и описание аппаратуры.

Утверждено редакционно-издательским советом ЛЭТИ в качестве методических указаний.

С Ленинградский ордена Ленина и ордена Октябрьской Революции электротехнический институт им. В.И. Ульянова (Ленина), 1988

ИЗМЕРЕНИЕ ВНУТРЕННЕГО ТРЕНИЯ В ТВЕРДЫХ ТЕЛАХ

Цель работы

Ознакомиться с методиками измерения внутреннего трения в твердых телах и получить навыки измерения добротностей образцов в форме стержня.

1.1. Методика измерений

В любой реальной среде имеют место диссипативные процессы, в результате которых упругая энергия превращается в тепловую. Физические явления, порождающие диссипацию упругой энергии, весьма разнообразны и объединяются общим названием - внутреннее трение.

Внутреннее трение оказывает существенное влияние на колебательные и волновые процессы в твердых телах, в частности:

- Деформация отстает по фазе на некоторый угол ψ от вызывающего эту деформацию механического напряжения. Величина $\tan \psi = Q^{-1}$ служит мерой внутреннего трения и называется коэффициентом механических потерь. Обратная величина Q - механическая добротность материала.

- При распространении упругих волн имеет место поглощение их энергии и соответствующее уменьшение амплитуды. Для плоской волны процесс ее распространения вдоль некоторой оси x описывается выражением:

$$\xi = \xi_0 e^{-\alpha x} e^{j(\omega t - kx)}$$

где α - коэффициент поглощения.

Свободные колебания образцов становятся затухающими во времени (рис. 1.1) и изменяются по закону:

$$\xi = \xi_0 e^{-\delta t} e^{j\omega t}$$

где δ - показатель затухания.

- При вынужденных колебаниях образцов с ростом внутреннего трения увеличивается относительная ширина частотного диапазона $\Delta f/f_p$, в пределах которого амплитуда колебаний уменьшается на

более чем в $\sqrt{2}$ раз по сравнению с ее максимальным значением при резонансной частоте f_p . Величину $\Delta f/f_p$ называют также относи-

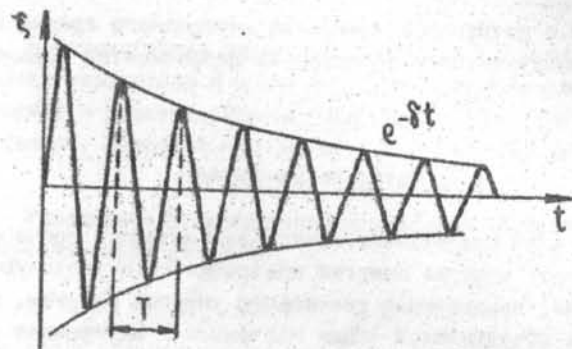


Рис. I.1. Затухание свободных колебаний
относительной шириной резонансной кривой (рис. I.2).
Механическая добротность, коэффициент поглощения, показате-

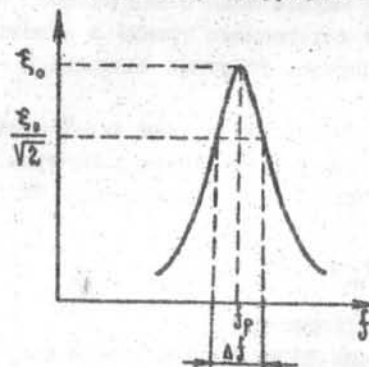


Рис. I.2. Резонансная кривая вынужденных колебаний
образца

тель затухания и относительная ширина резонансной кривой связаны между собой простыми соотношениями

$$\frac{1}{Q} = \frac{\alpha \lambda}{\pi} = \frac{\delta}{\pi f_p} = \frac{\Delta f}{f_p},$$

где λ — длина упругой волны в исследуемом материале.

В соответствии со сказанным выше, экспериментальное определение внутреннего трения может осуществляться тремя методами: методом измерения коэффициента поглощения α , методом свободных колебаний (измерение показателя затухания δ) и резонансным методом (измерение ширины резонансной кривой $\Delta f/f_p$). В данной лабораторной работе используются два последних метода.

При реализации резонансного метода или метода свободных колебаний используются образцы в виде тонких стержней, проволок или пластинок, в которых тем или иным способом возбуждаются продольные, крутильные или изгибные колебания на одной из собственных (резонансных) частот. Поскольку максимальный размер колеблющегося на резонансной частоте образца по порядку величины равен длине волны упругих колебаний, при измерениях в области высоких частот приходится применять образцы очень малых размеров. По этой причине метод свободных колебаний и резонансный метод используются на частотах ниже 1 МГц.

Сущность резонансного метода весьма проста. В образце возбуждают колебания. Поддерживая амплитуду возбуждающей силы постоянной и изменяя ее частоту, каким-либо способом наблюдают за изменением амплитуды колебаний образца. В процессе наблюдения измеряют значения резонансной частоты f_p и ширины резонансной кривой Δf . По найденным значениям f_p и Δf рассчитывают механическую добротность Q . Следует отметить, что для образцов с высокой механической добротностью величина Δf оказывается весьма малой и ее трудно измерить с достаточно высокой степенью точности. Поэтому резонансный метод целесообразно применять при $Q < 0,1 f_p$. Для образцов, имеющих $Q > 0,1 f_p$, более подходящим оказывается метод свободных колебаний.

При использовании метода свободных колебаний образец возбуждают на одной из его собственных частот и измеряют ее величину, затем возбуждающую силу выключают и с помощью какого-либо записывающего устройства регистрируют процесс затухания свободных колебаний. По записанной диаграмме свободных колебаний определяют величину показателя затухания δ . Найденные величины f_p и δ используют для расчета механической добротности Q .

1.2. Описание измерительной установки

Установка предназначена для измерения собственных частот и внутреннего трения в диапазоне 10...200 кГц на образцах в форме стержней круглого сечения. Используемые в установке способы возбуждения и регистрации колебаний применимы только к образцам, имеющим достаточно высокую собственную электрическую проводимость или нанесенное на их поверхность электропроводящее покрытие.

Структурная схема установки представлена на рис.1.3. Элект-

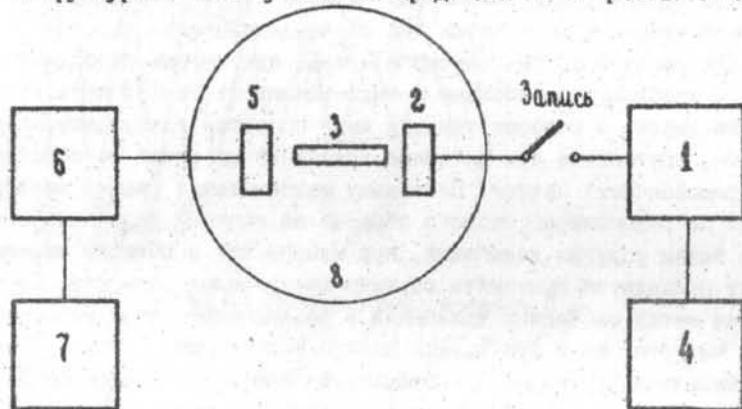


Рис.1.3. Структурная схема измерительной установки

рическое напряжение генератора I с плавно регулируемой частотой подается на электромеханический преобразователь (излучатель) 2, с помощью которого в образце 3 возбуждаются продольные колебания. Для реализации метода свободных колебаний в схеме предусмотрен выключатель "запись", позволяющий разорвать цепь питания излучателя 2. Измерение частоты питающего напряжения (и, следовательно, возбуждающей силы) осуществляется частотомером 4. Механические колебания образца преобразуются в электрические сигналы с помощью электромеханического преобразователя (приемника) 5, подсоединенного ко входу усилителя 6. Усилитель снабжен стрелочным индикатором выходного напряжения и подключен к самописцу 7, который служит для записи процесса свободных колебаний образца. Излучатель, приемник и образец установлены в специальных держателях и размещены на століке 8.

Запись процесса свободных колебаний осуществляется самопис-

цем 7 на специальной бумажной ленте, приводимой в движение с помощью лентопротяжного механизма. Движение ленты с заданной скоростью образует на ней масштаб времени и позволяет каждому участку ленты длиной l сопоставить определенный интервал времени t .

Записывающая игла самописца вычерчивает на ленте диаграмму (см.рис.1.4), которая представляет собой зависимость амплитуды

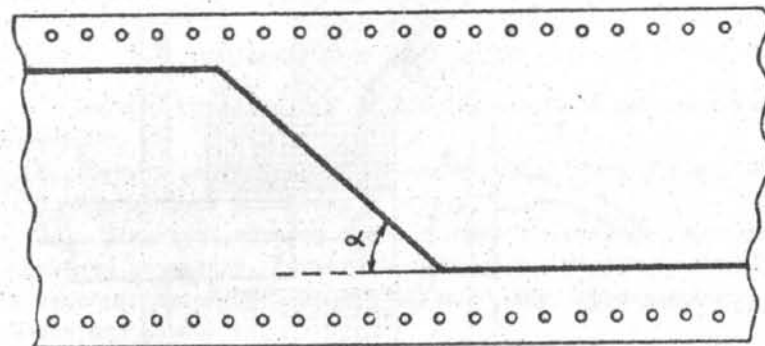


Рис.1.4. Диаграмма записи процесса свободных колебаний на ленте самописца

подводимого к самописцу напряжения от времени. Запись обычно ведется в логарифмическом масштабе, т.е. регистрируется в децибелах величина, пропорциональная $l \cdot U_{bx} / U_0$, где U_{bx} - амплитуда входного сигнала, U_0 - амплитуда сигнала, уровень которого принят равным 0 дБ. В логарифмическом масштабе экспоненциальная зависимость, характерная для процесса свободных колебаний, отображается на диаграмме в виде наклонной прямой линии. Вертикальный масштаб записи на ленте определяется подключаемым к самописцу сменным логарифмическим делителем и указан на корпусе делителя.

Угол наклона α линии записи на диаграмме оказывается однозначно связанным с показателем затухания δ . Последний может быть рассчитан по формуле

$$\delta = 0,025 B \text{tg} \alpha, \quad (1.1)$$

где B - предел логарифмического делителя самописца (дБ), V - скорость движения ленты в процессе записи (см/с). Скорость движения ленты целесообразно выбирать таким образом, чтобы угол α

был близок к 45° . В этом случае обеспечивается наименьшая ошибка в определении величины δ .

Электромеханические преобразователи для возбуждения и приема колебаний в образцах выполнены одинаковыми. Конструкция преобразователя показана на рис. I.5. Он включает в себя постоянный

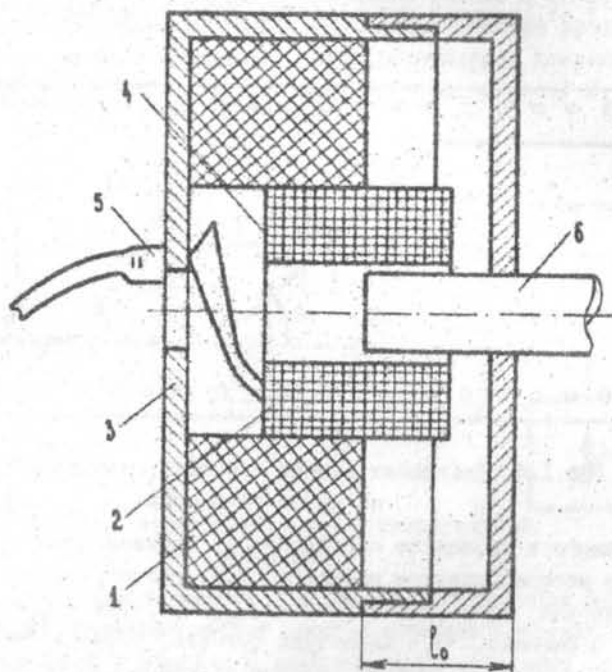


Рис. I.5. Конструкция электромеханического преобразователя

магнит I в форме кольца и цилиндрическую обмотку 2, установленные в разъемном корпусе 3. Обмотка заключена в латунный каркас 4, разрезанный по образующей для устранения короткозамкнутого зитка, и соединяется с электрической схемой посредством кабеля 5. Исследуемый образец 6 должен быть введен в отверстие преобразователя на глубину $l_0 \approx 14$ мм и расположен без соприкосновения с его внутренними элементами.

При работе преобразователя в качестве излучателя подаваемый в обмотку электрический ток индуцирует в образце кольцевые токи,

соосные с обмоткой. В результате взаимодействия наведенных в образце токов с полем постоянного магнита возникают силы Ампера, действующие на образец в осевом направлении и возбуждающие в нем продольные колебания.

При работе в режиме приема в электропроводящем образце, колеблющемся в поле постоянного магнита, в соответствии с законом электромагнитной индукции возникает система кольцевых токов, которые индуцируют ЭДС в обмотке преобразователя.

I.3. Порядок выполнения работы

1. Изучить описание работы и ознакомиться с рекомендованной литературой.

2. Изучить измерительную установку и входящие в нее приборы.

3. Подготовить установку к работе:

3.1. Закрепить образец в его среднем сечении в треугольном проволочном держателе. Держатель с образцом, приемный и возбуждающий преобразователи установить на подставку, отрегулировать их взаимное положение.

3.2. Подключить преобразователи к гнездам разъемов на поверхности столика: излучатель - к правому, приемник - к левому.

3.3. Подключить вход усилителя к гнезду левого разъема, а выход генератора - к правому разъему под столиком. Две нижние клеммы "Выход" генератора соединить между собой перемычкой.

4. Проверить положение ручек на пульте и на приборах:

4.1. Переключатель "Сеть" на пульте должен находиться в положении "Выкл.", переключатель "Насос" - в положение "Выкл.". Тумблеры "Сеть" на всех приборах должны быть выключены.

4.2. Переключатель "Выходное сопротивление" Ω генератора необходимо установить в положение "600", переключатель "Пределы шкалы" - в положение "300 мВ", тумблер "Внутр.нагр." - в положение "Выкл.".

4.3. Переключатели "Шкалы индикатора" и "Аттенватор" усилителя должны находиться в положении I, потенциометр "Усиление" должен быть выведен.

4.4. Переключатель "Запись" под столиком должен находиться в нижнем положении, переключатель "Диаметр образца" - в положении, соответствующем используемому преобразователю.

5. Включить установку:

- 5.1. Включить пакетный выключатель на главном щите.
- 5.2. Тумблером "Сеть" на пульте включить установку.
- 5.3. Включить усилитель, самописец, генератор и частотомер.

Дать прогреться приборам 20 мин.

5.4. Пользуясь инструкцией по эксплуатации частотомера и самописца, проверить их работу и произвести калибровку. Высокочастотным кабелем подключить частотомер к генератору.

6. Измерить резонансную частоту и ширину резонансной кривой исследуемого образца. В процессе настройки на резонансную частоту своевременно регулировать коэффициент усиления усилителя, пределы шкалы индикатора и выходной сигнал генератора, не допуская перегрузки стрелочного индикатора усилителя.

7. Если полоса оказалась слишком узкой для того, чтобы ее можно было правильно измерить, подключить самописец и провести измерение показателя затухания δ методом свободных колебаний.

Как и при измерениях по п.6, не допускать перегрузки стрелочного индикатора усилителя. В целях экономии бумажной ленты самописца своевременно включать и выключать двигатель лентопротяжного механизма и тумблер "Запись".

8. Все измерения на каждом образце провести не менее 3-х раз. По данным измерений рассчитать механическую добротность образца, а также погрешность измерений и расчетов.

I.4. Требования к отчету

Отчет должен содержать:

1. Структурную схему установки и ее краткое описание.
2. Описание (размеры, материал) исследуемых образцов.
3. Анализ погрешностей измерений и расчетов.
4. Численные примеры расчетов добротности и погрешностей ее определения.
5. Сводную таблицу данных измерений и расчетов.

Таблица

Образец	f_p , Гц	Δf , Гц	B , дБ	v , см/с	α°	$Q + \Delta Q$

I.5. Контрольные вопросы

1. Что такое внутреннее трение?
2. Как влияет внутреннее трение на параметры колебательных и волновых процессов в твердых телах?
3. Расскажите о сущности метода свободных колебаний и резонансного метода измерения внутреннего трения.
4. Докажите правильность соотношения (I.1).

Библиографический список

I. Колесников А.Е. Ультразвуковые измерения. - М.: Изд-во стандартов, 1982.-С.107-109.

Лабораторная работа № 2

ИЗГИБНЫЕ КОЛЕБАНИЯ СТЕРЖНЕЙ

Цель работы

Ознакомиться с методикой измерения собственных частот изгибных колебаний тонких однородных стержней, изучить измерительную аппаратуру и приобрести необходимые практические навыки исследования.

2.1. Методика исследований и описание измерительной установки

В настоящей работе измеряются собственные частоты изгибных колебаний тонких однородных стержней со свободными концами. Собственные частоты колебаний определяются формулой:

$$f_n = \sqrt{EJ/\rho S} \beta_n^2 / 2\pi l^2,$$

где $\beta_n \approx 4,73; 7,85; 11,0; \dots$; E и ρ - модуль Юнга и плотность материала стержня; S - площадь поперечного сечения стержня; J - момент инерции площади поперечного сечения; $J = \pi r^4/4$ - для круглого сечения радиусом r ; $J = a^4/12$ - для квадрата со стороной a ; l - длина образца; n - номер обертона.

Распределение амплитуд изгибных колебаний по длине стержня зависит от номера n обертона и для первых трех собственных частот показано на рис.2.1.

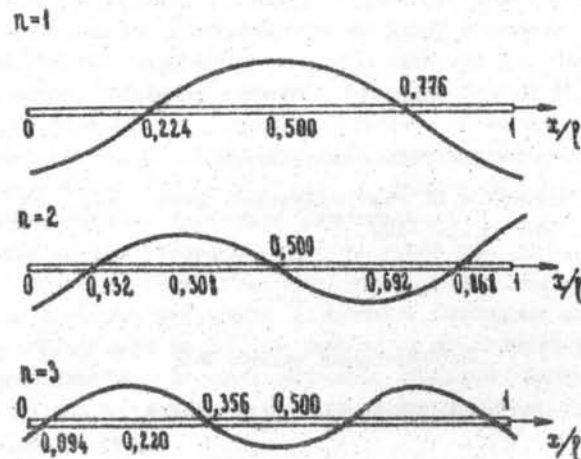


Рис.2.1. Распределение амплитуд изгибных колебаний по длине стержня

Как видно из рис.2.1, некоторые поперечные сечения стержня характеризуются нулевой амплитудой колебаний. Такие сечения называются узловыми. Их положение, а также положение пучностей колебаний (максимальная амплитуда колебаний) даны в табл.2.1.

Таблица 2.1

Номер обертона	z_0/l	
	Узлы	Пучности
$n = 1$	0,224; 0,776	0,5
$n = 2$	0,132; 0,500; 0,868	0,301; 0,692
$n = 3$	0,094; 0,356; 0,644; 0,906	0,225; 0,500; 0,775

Структурная схема измерительной установки показана на рис.2.2. Измерения осуществляются прибором "Звук-107", который работает следующим образом. 12 -

Генератор создает электрические синусоидальные колебания, частота которых может изменяться в пределах 5...500 кГц. Элект-



Рис.2.2. Структурная схема измерительной установки

рические колебания преобразуются пьезоэлектрическим излучателем И в механические и передаются исследуемому образцу. Колебания образца воспринимаются пьезоэлектрическим приемником П, осуществляющим обратное преобразование. Электрические колебания с приемника усиливаются усилителем и поступают на вольтметр и амплитудный индикатор резонанса. При совпадении частоты генератора с частотой собственных колебаний образца наступает резонанс, который фиксируется по сближению освещенных полюсов амплитудного индикатора или с помощью вольтметра. "Звук-107" имеет гнезда разъемов для включения частотомера и вольтметра.

Установка исследуемых стержней между куполообразными насадками пьезоэлектрических преобразователей производится в узлах колебаний, чтобы влияние преобразователей на собственные частоты стержней было минимальным.

2.2. Порядок выполнения работ

1. Изучить описание лабораторной работы и ознакомиться с рекомендованной литературой.
2. Ознакомиться с аппаратурой и собрать схему для исследования изгибных колебаний стержней.
3. Рассчитать собственные частоты изгибных колебаний стержня со свободными концами.
4. Определить для трех низших частот образцов положение узлов смещений.
5. Установить стержень в соответствующих узлах смещений и измерить собственные частоты не менее 3-х раз.

2.3. Обработка данных и требования к отчету

Свести в табл. 2.2 рассчитанные три низшие собственные частоты для указанных руководителем стержней из дюралюминия, латуни, железа.

Таблица 2.2

Материал	Размеры стержня		Собственные частоты,	
	длина l , мм	сечение S , мм ²	f_n , Гц теория	эксперимент
Дюралюминий $\rho = 2,7 \cdot 10^3$ кг/м ³ $E = 6,95 \cdot 10^{10}$ Н/м ²				
Латунь $\rho = 8,1 \cdot 10^3$ кг/м ³ $E = 10,3 \cdot 10^{10}$ Н/м ²				
Железо $\rho = 7,8 \cdot 10^3$ кг/м ³ $E = 20,6 \cdot 10^{10}$ Н/м ²				

Отчет должен содержать:

1. Структурную схему установки.
2. Таблицы.
3. Формулы и числовые примеры.
4. Анализ и оценку погрешностей измерений.

2.4. Контрольные вопросы

1. Каков принцип работы прибора для исследования изгибных колебаний стержней?
2. Как изменяется положение узлов смещений свободного стержня в зависимости от номера обертона?
3. Зачем стержни при измерениях устанавливаются между куполообразными насадками в узлах колебаний?

Библиографический список

Лепендин Л.Ф. - Акустика. - М.: Высш. школа, 1978.

Лабораторная работа № 3

РАДИАЛЬНЫЕ КОЛЕБАНИЯ ПЬЕЗОКЕРАМИЧЕСКИХ ПЛАСТИН

Цель работы

Ознакомиться с методикой измерения упругих постоянных пьезокерамических материалов на образцах в форме тонких круглых пластин и приобрести практические навыки подобных измерений.

3.1. Методика измерений и измерительная установка

Радиальными называют такие колебания круглых тонких пластин (дисков), при которых частицы пластины совершают колебательное движение, направленное по радиусу диска.

Спектр собственных частот радиальных колебаний тонкого однородного диска определяется выражением

$$f_n = \frac{\beta_n c}{2\pi a}, \quad n = 0, 1, 2, \dots \quad (3.1)$$

где a - радиус диска; n - номер обертона; c - скорость распространения продольных упругих волн в тонкой пластине; β_n - корни уравнения

$$\beta J_0(\beta) = (1-\nu) J_1(\beta), \quad (3.2)$$

ν - коэффициент Пуассона. Скорость продольных волн в тонкой пластине дается формулой

$$c = \sqrt{E/\rho(1-\nu^2)}, \quad (3.3)$$

где E - модуль Юнга; ρ - плотность материала пластины.

Форма собственных колебаний (распределение амплитуд колебаний по площади диска) зависит от номера обертона и определяется функцией Бесселя $J_1(\beta_n r/a)$, где r - радиус точки наблюдения. При $n = 0$ форма колебаний наиболее проста: все частицы диска колеблются синфазно. При $n \geq 1$ форма усложняется: появляются n узловых окружностей, причем соседние кольцевые участки пластины, разделенные узловыми окружностями, совершают противофазные колебания.

Методика экспериментального определения упругих постоянных E и ν материала диска опирается на соотношения (3.1) - (3.3). Как видно из (3.2), значения корней уравнения β_n зависят только от коэффициента Пуассона ν . Следовательно, отношение

$$\alpha = f_1/f_0 = \beta_1/\beta_0$$

также зависит только от коэффициента Пуассона. Таким образом, измерение собственных частот f_0 и f_1 позволяет определить значение ν . Связь между значениями α и ν приведена ниже.

α	2,653	2,645	2,638	2,630	2,624	2,617	2,610	2,604
ν	0,27	0,28	0,29	0,30	0,31	0,32	0,33	0,34

С помощью формул (3.1) и (3.3) нетрудно рассчитать значение модуля Юнга по измеренной собственной частоте f_0 . Для расчетов необходимо дополнительно знать плотность ρ материала диска и значения корня β_0 , которые приведены ниже.

ν	0,27	0,28	0,29	0,30	0,31	0,32	0,33	0,34
β_0	2,030	2,036	2,043	2,049	2,055	2,061	2,067	2,074

Структурная схема измерительной установки показана на рис.3.1.

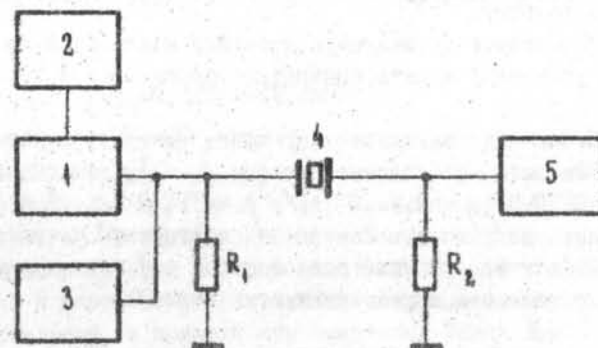


Рис.3.1. Структурная схема измерительной установки

Установка включает в себя перестраиваемый по частоте генератор электрических сигналов 1; частотомер 2; вольтметр 3; исследуемый пьезоэлектрический диск 4; вольтметр 5 и два сопротивления R_1 , R_2 . Возбуждение радиальных колебаний диска осуществляется электрическим полем за счет собственного пьезоэффекта диска. Для этого на его торцах нанесены электроды, подключенные к выходной цепи генератора. Входное электрическое сопротивление пьезоэлектрического диска с нанесенными электродами изменяется с частотой приложенного электрического напряжения и на частоте резонанса имеет резко выраженный минимум. Поэтому при совпадении частоты генератора с собственной частотой колебаний диска ток в цепи диск-сопротивление R_2 , а также показания вольтметра 5, становятся максимальными. Таким образом, установка позволяет измерять собственные частоты колебаний пьезоэлектрических дисков. Процедура таких измерений очевидна из приведенных выше пояснений.

Примечание: В процессе перестройки частоты генератора желательно с помощью вольтметра 3 контролировать и

3.2. Программа и порядок выполнения работы

1. Изучить описание лабораторной работы и ознакомиться с рекомендованной литературой.
2. Ознакомиться с используемой аппаратурой и собрать измерительную установку.
3. Установить исследуемую пластину между клеммами держателя, включить установку и дать аппаратуре прогреться в течение 10-15 мин.
4. Установить выходное напряжение генератора равным 200 мВ.
5. Измерить собственные частоты f_0 и f_1 для дисков из пьезо-керамики ЦТБС-3 ($\rho = 7,2 \cdot 10^3 \text{ кг/м}^3$) и ТВК-3 ($\rho = 5,4 \cdot 10^3 \text{ кг/м}^3$). Оценить погрешность измерения собственных частот.
6. Рассчитать упругие постоянные E и ν исследуемых дисков и оценить погрешность определения этих величин.

3.3. Требования к отчету

Отчет должен содержать:

- а) структурную схему измерительной установки и ее краткое описание;
- б) результаты измерений и расчетов;
- в) анализ и оценку погрешностей измерений и расчетов.

3.4. Контрольные вопросы

1. Являются ли собственные частоты радиальных колебаний гармоничными (кратными)?
2. Что такое узловая окружность?
3. В чем состоит процедура измерения собственных частот радиальных колебаний пьезоэлектрических дисков?
4. Можно ли определить упругие постоянные с помощью данной методики, не зная плотности материала диска?

Библиографический список

1. Пьезокерамические преобразователи. Справочник/под ред. С.И.Пугачева. - Л.: Судостроение, 1984. - С.55-57, 106-108.

Цель работы

Ознакомиться с возбуждением и приемом волн Лэмба методом клина (методом наклонного пучка) и получить практические навыки измерения фазовой и групповой скоростей распространения этих волн.

4.1. Методика измерений

Волны в пластинах по своей структуре (распределению амплитуд колебаний по фронту волны) и по скорости распространения значительно отличаются от волн в ограниченном пространстве и называются нормальными волнами. Волнами Лэмба называют такие нормальные волны, в которых частицы пластины совершают эллиптическое движение в плоскости, параллельной направлению распространения волны и нормальной к поверхности пластины. Волны Лэмба могут быть симметричными (S -волны) и антисимметричными (A -волны). При распространении S -волн движение частиц пластины происходит симметрично относительно срединной плоскости пластины, а при распространении A -волн - антисимметрично.

Для волн Лэмба, как и для других нормальных волн характерны дисперсия (зависимость скорости распространения от частоты колебаний) и многомодовость (существование нескольких разновидностей (мод) волн Лэмба, отличающихся по своей структуре и скорости распространения). Волновым модам присписываются номера в порядке возрастания их фазовой скорости (S_0, S_1, S_2 и т.д.). Волновую моду, обозначаемую символом S_n , называют симметричной волной n -го порядка. Для антисимметричных волн приняты аналогичные обозначения и терминология.

Фазовая и групповая скорости распространения каждой волновой моды зависят от значения параметра fd (f - частота колебаний, d - толщина пластины) и от упругих характеристик материала пластины. На рис.4.1 изображены соответствующие теоретические зависимости для фазовой скорости распространения волн Лэмба в пластинах из титана; на рис.4.2 - то же для групповых скоростей распространения.

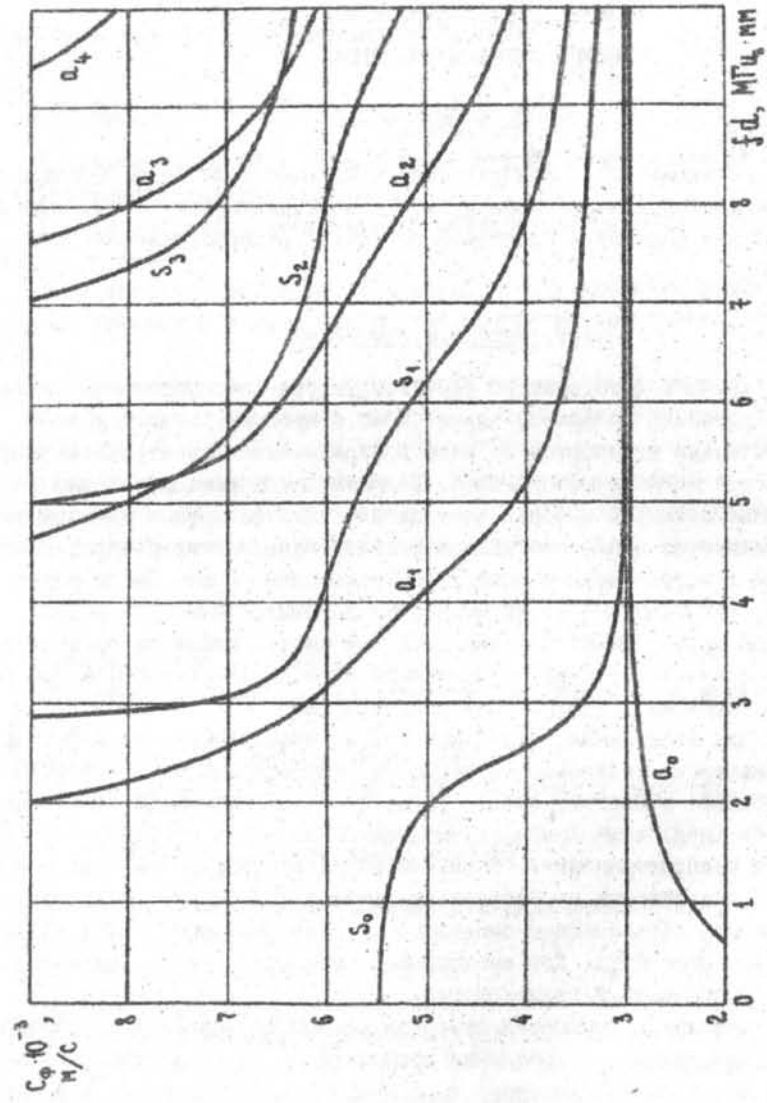


Рис.4.1. Фазовые скорости волн Лэмба в пластинах из титана

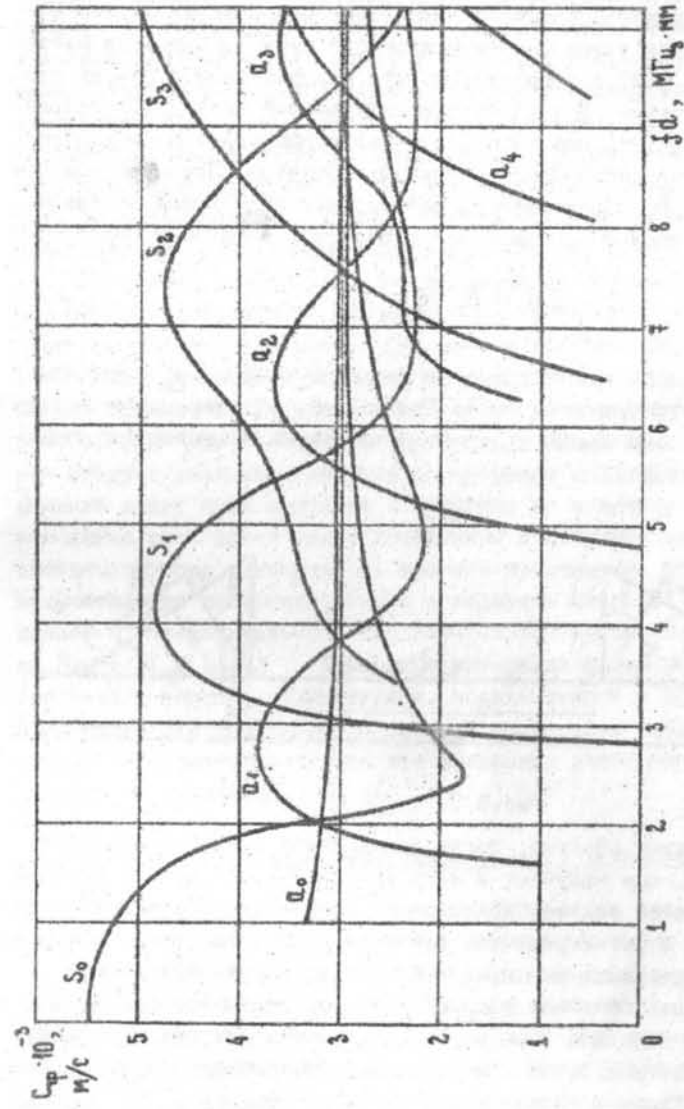


Рис.4.2. Групповые скорости распространения волн Лэмба в пластинах из титана

Для возбуждения и приема волн Лэмба в пластинах широко используется метод клина (метод наклонного пучка). Сущность метода клина (рис.4.3) состоит в том, что ультразвуковой пучок, созданный излучателем И, с помощью клиновидной призмы I направляется на поверхность пластины 2 под некоторым углом θ и возбуждает в пластине волны Лэмба различных порядков. При произвольном значении угла θ эффективность возбуждения волн Лэмба невелика. Однако, если угол θ выбрать в соответствии с законом Снеллиуса:

$$\sin \theta = c_k / c_{fn}, \quad (4.1)$$

где c_k — скорость распространения звука в клине; c_{fn} — фазовая скорость распространения волны Лэмба n -го порядка, эффективность возбуждения волны Лэмба n -го порядка резко возрастает и становится максимальной.

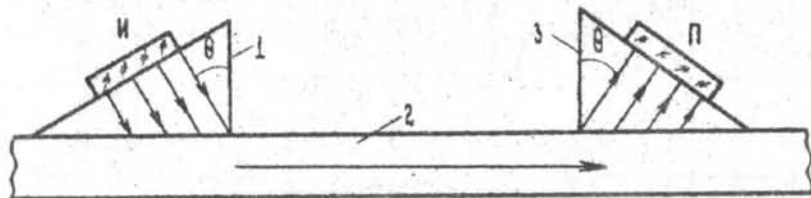


Рис.4.3

Метод клина обратим: когда волна Лэмба проходит над приемным клином 3, она излучает в клин ультразвуковой пучок, который распространяется под тем же углом θ , определяемым законом Снеллиуса (4.1), и регистрируется приемником ультразвука П. При реализации метода клина как приемный, так и излучающий твердый клин могут быть заменены жидкостью, в частности излучатель И, приемник П и пластина 2 могут быть полностью погружены в ванну с иммерсионной жидкостью. Именно такой вариант метода клина используется в данной лабораторной работе.

То обстоятельство, что эффективность возбуждения и приема максимальна, когда угол θ удовлетворяет закону Снеллиуса (4.1), является основой экспериментальной методики определения фазовых скоростей распространения волн Лэмба. Сущность этой методики

проста — изменяя одновременно углы наклона излучателя И и приемника П относительно пластины 2 добиваются максимального значения электрического сигнала на выходе приемника П и отсчитывают величину угла θ , соответствующего этому максимуму. По измеренному значению угла θ с помощью соотношения (4.1) рассчитывают фазовую скорость c_f соответствующей волны Лэмба. При этом скорость звука c_k в клине (или в иммерсионной жидкости) должна быть известна заранее. В данной установке в качестве иммерсионной жидкости использована вода ($c_k = 1,5 \cdot 10^3$ м/с).

Обратимся теперь к методике измерения групповой скорости. Как известно, групповая скорость является скоростью переноса энергии. Поэтому при распространении в пластине волнового пакета (импульса) он будет перемещаться вдоль пластины со скоростью, равной групповой. Вследствие дисперсии волновой пакет при распространении будет изменять свою форму и под скоростью его движения следует понимать скорость перемещения максимума огибающей. Изменяя длину пути импульса в пластине на величину Δl (путем изменения расстояния между приемником и излучателем) и измеряя соответствующие изменения Δt времени прохождения импульса от излучателя до приемника, можно определить скорость движения импульса и, следовательно, групповую скорость распространения волн Лэмба: $c_g = \Delta l / \Delta t$. Измерения интервала времени Δt можно осуществить с помощью осциллографа, подключенного к приемнику П и имеющего калиброванную по времени развертку, наблюдая на его экране перемещение импульса при изменении расстояния между излучателем и приемником.

4.2. Описание измерительной установки

Структурная схема установки изображена на рис.4.4. Излучатель И, приемник П и пластина помещены в ванну с водой.

Излучатель возбуждается электрическими радиоп импульсами, вырабатываемыми генератором Г. Частота заполнения $f = 2$ МГц. Приемник подключен ко входу осциллографа О, ждущая развертка которого запускается синхронизирующими импульсами того же генератора Г. В данной лабораторной работе функции генератора и осциллографа выполняет один прибор — дефектоскоп "ДУК-66".

Изменение взаимного расположения излучателя и приемника, а также их положения относительно пластины осуществляется с по-

мощью двух одинаковых координатных устройств, одно из которых

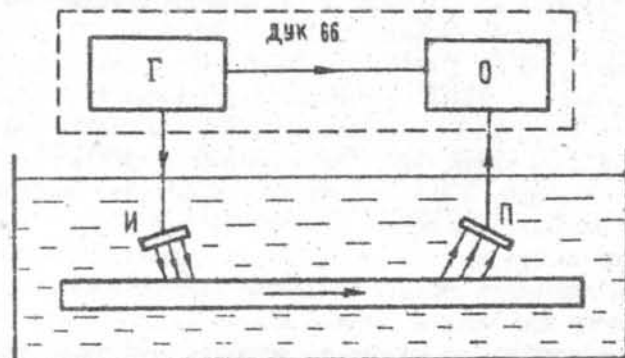


Рис.4.4

схематически изображено на рис.4.5. Излучатель или приемник I укреплен на угловой планке, с помощью которой угол наклона

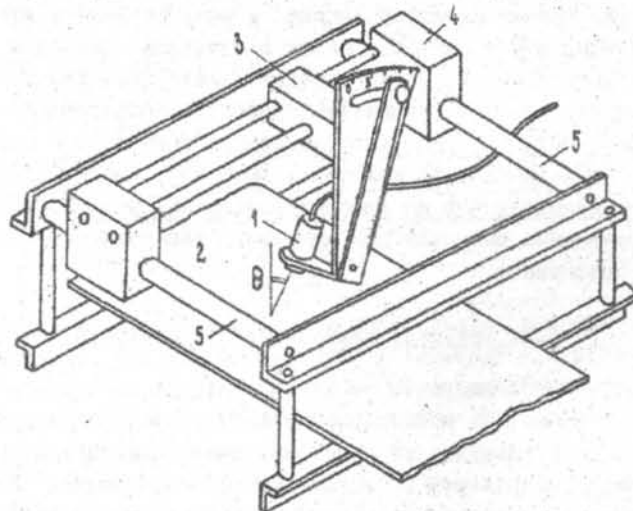


Рис.4.5

относительно пластины 2 может изменяться. Значение угла θ отсчитывается по шкале. Перемещение излучателя параллельно плоскости пластины осуществляется перемещением каретки 3 по направляющим траверсы 4 и перемещением всей траверсы по направляющим 5.

Независимые перемещения преобразователей параллельно поверхности пластины позволяют: а) установить приемник и излучатель таким образом, чтобы их оси пересекались; в противном случае в силу острой направленности излучения акустический импульс будет проходить мимо приемника или попадать на него лишь частично; б) изменять расстояние между приемником и излучателем в процессе измерения групповой скорости.

4.3. Программа и порядок выполнения работы

1. Изучить описание работы, измерительную установку и рекомендованную литературу.

2. Подготовить прибор "ДУК-66" к работе. Для этого подключить к нему кабели излучателя и приемника, ручки "ВРЧ-глубина", "ВРЧ-длительность", "Задержка-развертка" поставить в положение "Выкл.", "Частота МГц" - в положение "2,5", "Генератор - амплитуда" - в положение "6", "Генератор - длительность" - в положение "8", "Диапазоны" - в положение "50 см", переключатель режима работы - в положение "I-П". После этого можно включить прибор в сеть (с разрешения преподавателя), прогреть его в течение 3-5 мин., отрегулировать яркость и четкость изображения на экране, установить линию развертки посередине экрана.

3. Измерить значение углов θ , при которых имеет место максимальная эффективность возбуждения и приема волновых мод различного порядка в пластине из титана. Перед проведением измерений целесообразно рассчитать с помощью кривых на рис.4.1 углы θ , соответствующие максимуму эффективности возбуждения и приема для всех волновых мод, существующих при данном значении параметра $f \cdot d$. Рассчитанные значения углов установить на шкалах излучателя и приемника и, рассматривая эти значения как приближенные, уточнить экспериментально истинные значения искомых углов (отдельно для приемника и излучателя). Измерения выполнять при минимальном расстоянии между преобразователями. Величина наблюдаемых на экране импульсов регулируется ручками "Ослабление дБ".

Примечание: Кроме импульса, соответствующего той или иной волне Лэмба, на экране наблюдаются и другие импульсы, обусловленные прохождением продольной волны по воде (зигзагообразное распространение импульса, многократно отражающегося от поверх-

Таблица 4.2

Мода	$t_1 \pm \Delta t$, мкс	$t_2 \pm \Delta t$, мкс	$\Delta l \pm \Delta(\Delta l)$, мм	Групповая скорость, $c_{\varphi} \pm \Delta c$, м/с	
				Эксперимент	Теория

4.5. Требования к отчету

Отчет должен содержать:

1. Схему и краткое описание установки.
2. Рабочую частоту преобразователей и толщину пластины.
3. Численные примеры расчетов.
4. Анализ и оценку погрешностей измерений и расчетов.
5. Табл.4.1 и 4.2 с результатами измерений и расчетов.

4.6. Контрольные вопросы

1. Что такое волны Ламба и чем они отличаются от волн в безграничном пространстве?
2. В чем заключается суть методики измерения фазовой и групповой скоростей распространения волн Ламба?
3. Как следует располагать излучатель и приемник друг относительно друга в процессе измерений?
4. От чего зависят ошибки измерений фазовой и групповой скоростей? Что вносит наибольший вклад в погрешность их определения?

Библиографический список

1. Викторов И.А. Звуковые поверхностные волны в твердых телах. - М.: Наука, 1981. - С.35-39, 97-117.
2. Колесников А.Е. Ультразвуковые измерения. - М.: Изд-во стандартов, 1982. - С.85-87.

ности воды и пластины). Эти побочные импульсы легко отличить от импульса волны Ламба, так как они значительно изменяют свою амплитуду при волнении водной поверхности. Кроме того, они располагаются на экране правее импульса волны Ламба из-за большего времени распространения.

4. По данным п.3 рассчитать значения фазовых скоростей волн Ламба различного порядка и оценить погрешность измерений и расчетов. Результаты свести в табл.4.1.

Таблица 4.1

Волновая мода	Углы наклона, град.			Фазовая скорость $c_{\varphi} \pm \Delta c$, м/с	
				Значение	
	$\theta_n \pm \Delta \theta$	$\theta_n \pm \Delta \theta$	$\theta_{cp} \pm \Delta \theta$	Экспериментальное	Теоретическое

При выполнении расчетов экспериментальное значение фазовой скорости определять исходя из средней величины угла наклона

$$\theta_{cp} = (\theta_n + \theta_n) / 2.$$

5. Измерить время t_1 и t_2 распространения импульсов от излучателя до приемника при двух различных расстояниях между ними, отличающихся на некоторую величину Δl . По данным измерений рассчитать групповые скорости волн Ламба и сравнить с теоретическими значениями. Оценить погрешность измерений и расчетов. Результаты свести в табл.4.2.

Примечание: Развертка прибора ДУК-66 отградуирована таким образом, что при установке переключателя "Диапазоны" в положение "50 см" подвижный строб-импульс на экране задержан относительно начала развертки на время (мкс) численное равное показаниям верхней шкалы "Расстояние". - 26 -

Оглавление

Лабораторная работа № 1. Измерение внутреннего трения в твердых телах	3
Лабораторная работа № 2. Изгибные колебания стержней	11
Лабораторная работа № 3. Радиальные колебания пьезоэлектрических пластин	15
Лабораторная работа № 4. Волны Лэмба в пластинах	19

Редактор А.В.Богданова

Подл. к печ. 30.04.88. Формат 60x84 1/16.
Бумага тип. №2. Офсетная печать. Печ. л. I, 75; уч.-изд. л. I, 75.
Тираж 150 экз. План 1988 г. Изд. № 22. Зак. № 95 Бесплатно.
Редакционно-издательский отдел ЛЭТИ им. В.И.Ульянова (Ленина)

Ротапринт ЛЭТИ
197022, Ленинград, ул. Проф. Попова, д. 5