

Здесь мы решили поместить бланк расписания занятий, чтобы Вы могли заполнить ячейку для проведения лабораторных работ и не пропускать занятия ☺.

Дни недели	Часы дня			
	8 ³⁰ -10 ⁰⁵	10 ²⁰ -11 ³⁵	12 ¹⁰ -13 ⁴⁵	14 ²⁰ -15 ⁵⁵
Понедельник				16 ¹⁰ -17 ⁴⁵
Вторник				
Среда				
Четверг				
Пятница				
Суббота				



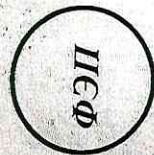
№ 3676

МИНИСТЕРСТВО ОБРАЗОВАНИЯ И НАУКИ
РОССИЙСКОЙ ФЕДЕРАЦИИ
ФЕДЕРАЛЬНОЕ АГЕНТСТВО ПО ОБРАЗОВАНИЮ
ГОСУДАРСТВЕННОЕ ОБРАЗОВАТЕЛЬНОЕ УЧРЕЖДЕНИЕ
ВЫСШЕГО ПРОФЕССИОНАЛЬНОГО ОБРАЗОВАНИЯ
ТАГАНРОГСКИЙ ГОСУДАРСТВЕННЫЙ
РАДИОТЕХНИЧЕСКИЙ УНИВЕРСИТЕТ

МЕТОДИЧЕСКИЕ УКАЗАНИЯ
к выполнению лабораторных работ
по курсу

«Измерительные преобразователи и электроды»
Часть 1

Для студентов специальностей 190500 и 190600
направления бакалаврской подготовки 553400
«Биомедицинская инженерия»



Таганрог 2004

Методические указания к выполнению лабораторных работ по курсу «Измерительные преобразователи и электроды». Ч. 1. Таганрог: Изд-во ТРТУ, 2004. 44 с.

Данные методические указания содержат теоретический и практический материал для выполнения лабораторной работы «Исследование свойств пьезокерамики и характеристик пьезоэлементов» по курсу «Измерительные преобразователи и электроды» по теме «Ультразвуковые преобразователи и датчики».

Рекомендуются студентам 4-го курса специальности 190500, 190600 направления бакалаврской подготовки 553400 «Биомедицинская инженерия», а также для использования в ПНИРС и при подготовке выпускной бакалаврской работы.

Методические указания разработаны применительно к технологии обучения в системе РИТМ и могут быть использованы для дистанционного образования в локальной вычислительной сети ТРТУ, а также в глобальной сети Интернет.

Рецензент: Заграй Н.П., д-р техн. наук, профессор, начальник УМУ ТРТУ

1. ОБЩИЕ ТЕОРЕТИЧЕСКИЕ СВЕДЕНИЯ

Пьезоэффект – связь между электрической поляризацией (индукцией), или электрическим полем, и механическим напряжением, или деформацией, которая наблюдается у некоторых диэлектриков и полупроводников.

Прямой пьезоэффект – возникновение электрической поляризации (индукции) под действием механических напряжений.

Обратный пьезоэффект – зависимость деформации пьезоэлектриков от электрического поля.

Пьезоэлектрик можно представить в виде активного четырехполюсника, описываемого четырьмя переменными (рис. 1).

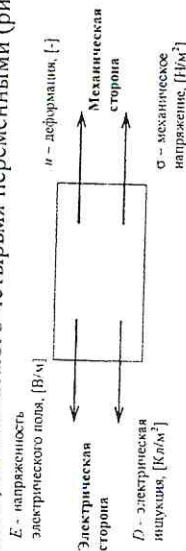


Рис. 1

$D = \epsilon E$ – закон Максвелла;

$u = S \sigma$ – закон Гука.

Так как переменные взаимосвязаны попарно, то любая пара (одна электрическая величина и одна механическая величина) может быть выбрана в качестве независимых переменных. Тогда две оставшиеся будут зависеть. Таким образом, уравнения пьезоэффекта могут быть четырех видов (1) – (4). Причем первое уравнение отражает закон Гука (с учетом электрической стороны), а второе – закон Максвелла (с учетом механической стороны) [2]:

$$u_i = s_{ij}^E \sigma_j + (d_{im})^E E_m \quad (1)$$

$$\sigma_i = c_{ij}^E u_j - (e_{im})^E E_m \quad (3)$$

$$d_{ij} = 1 \div 6$$

$$m, n = 1 \div 3$$

$$D_m = d_{mj}^D \sigma_j + (\epsilon_{mm}^D) E_m \quad (2)$$

$$E_m = -h_{mi} u_i + \beta_{mm}^D D_m$$

При записи системы уравнений для упрощения используется следующая система индексных обозначений [2]:

$$\sigma_{11} = \sigma_1; \quad u_{11} = u_1;$$

$$\sigma_{22} = \sigma_2; \quad u_{22} = u_2;$$

$$\sigma_{33} = \sigma_3; \quad u_{33} = u_3;$$

$$\sigma_{32} = \sigma_{23} = \sigma_4; \quad u_{32} + u_{23} = u_4;$$

$$\sigma_{31} = \sigma_{13} = \sigma_5; \quad u_{31} + u_{13} = u_5;$$

$$\sigma_{12} = \sigma_{21} = \sigma_6; \quad u_{12} + u_{21} = u_6.$$

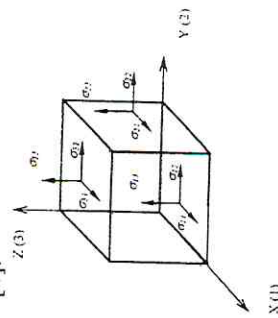


Рис. 2

Данные равенства выполняются при отсутствии сдвиговых напряжений.

Типы граничных условий

Тип	Режим	Аналогия
$E=0$	короткое замыкание (кз)	$U=0$
$D=0$	холостой ход (хх)	$I=0$
$\sigma=0$	свободный элемент	$F=0$
$u=0$	заторможенный элемент	$v=0$

Таблица 1.1

При определении механических граничных условий оцениваются условия в направлении, поперечно колебательному движению.

При определении электрических граничных условий оцениваются условия в направлении, совпадающем с направлением колебательного движения.

Система нижних индексов такова, что первый указывает направление действия силы, а второй – направление электрического поля.

Определим константы из уравнений (1) – (4).

1) упругие или механические константы: s_{ij}^E, s_{ij}^D – упругая податливость, $[M^2/H]$, порядок $\sim 10^{-12}$; c_{ij}^E, c_{ij}^D – упругий модуль (Юнга), $[H/M^2]$, порядок $\sim 10^{10}$.

Они представляют собой тензоры четвертого порядка. Связывают величины u_i и σ_i (или u_i и σ_j) – тензоры второго порядка.

2) пьезоконстанты $d_{im}, e_{jm}, g_{im}, h_{im}$ – тензоры третьего порядка. Связывают векторы D и E с тензорами второго порядка u_i или σ_i (u_i или σ_j).

* d – пьезомодуль, определяет величину деформации в свободном ($\sigma=0$) элементе при $E=const, [Kл/H]$, порядок $\sim 10^{-12}$.

* e – пьезоконстанта, определяет механические напряжения в заторможенном ($u=0$) элементе при $E=const, [Kл/M^2]$, порядок $\sim 10^8$.

* g – пьезоконстанта давления, характеризует напряженность электрического поля в режиме холостого хода ($D=0$) при постоянных механических напряжениях $\sigma=const, [Bл/H]$, порядок $\sim 10^{-3}$.

* h – пьезоконстанта деформации, определяет напряженность электрического поля в режиме холостого хода ($D=0$) при заданных деформациях $u=const, [Bл/M^2]$, порядок $\sim 10^8$.

3) диэлектрические константы $\epsilon_{im}, \beta_{im}$

$$\beta_{im} = \frac{1}{\epsilon_{im}}$$

Они представляют собой тензоры второго порядка и связывают векторы E и D .

В справочниках обычно задаются величиной

$$\frac{\epsilon_{im}}{\epsilon_0} \sim 10^2 - 10^3, \text{ где } \epsilon_0 = 8,85 \cdot 10^{-12} \text{ Ф/м.}$$

Связь между константами [1]

Упругие константы	Диэлектрические константы	Пьезоэлектрические константы	Уравнения
$s^E - s^D = dg$ $gd = dg$	–	$d = e^T g$ $g = \beta^T d$	(1)–(3)
$c^D - c^E = eh$ $he = eh$	–	$e = \epsilon^T h$ $h = \beta^T e$	(2)–(4)
–	$\epsilon^D - \epsilon^E = ed$ $de = ed$	$d = \epsilon s^E$ $e = dc^E$	(1)–(2)
–	$\beta^D - \beta^E = hg$ $hg = gh$	$g = hs^D$ $h = gc^D$	(3)–(4)

Таблица 1.2

Во многих случаях работу пьезоматериала удобно оценить применительно к различным режимам работы комбинацией рассмотренных констант.

Наиболее важным из них является коэффициент электроомеханической связи (КЭМС), характеризующий эффективность преобразования мощности в пьезоматериале. От величины КЭМС прямо зависит пьезоэффект. С помощью этого параметра сравнивают пьезоматериал с различными константами. Для каждой системы граничных условий и каждой ориентации электрического поля существует свой КЭМС.

За главные КЭМС принимаются:

$$k_{33} = \frac{d_{33}}{\sqrt{\epsilon_{33}^D \epsilon_{33}^E}}, \quad k_{31} = \frac{d_{31}}{\sqrt{\epsilon_{33}^D \epsilon_{11}^E}}, \quad k_{33} > k_{31}$$

– для электрического поля, параллельного оси z;

$$k_{15} = \frac{d_{15}}{\sqrt{\epsilon_{11}^D \epsilon_{33}^E}} = h_{15} \sqrt{\frac{\epsilon_{11}^D}{\epsilon_{33}^E}}$$

– для электрического поля, перпендикулярного оси z.

Пьезоэлемент как основная часть пьезопреобразователя

Пьезоэлемент – изготовленная из пьезоматериала деталь простой геометрической формы (стержень, пластина, диск и др.) с нанесенными на определенные поверхности электродами, являющаяся основой пьезоэлектрического преобразователя.

Пьезоматериалы – тип материалов, обладающих свойством пьезоэффекта. Бывают естественного происхождения (кварц) и искусственного происхождения (пьезокерамика). Пьезокерамика представляет собой неорганический диэлектрик с высокой диэлектрической

проницаемостью, относится к сегнетозлектрикам (твердые растворы солей бария $BaTiO_3$ и свинца $PbTiO_3$). Промышленные составы пьезокерамик гостированы ГОСТ 12370-72, ГОСТ 13927-74 «Материалы пьезокерамические». В соответствии с ГОСТом они делятся на 4 класса [1]:

- I излучатели и приемники малой и средней мощностей; высокая чувствительность (ТБ-1, ЦТСНВ-1, ЦТС-19) – сегнетомягкая керамика;
- II излучатели и приемники большой (ЦТСС-1, ЦТС-23) и средней (ЦТБС-3, ТБК-3, НБС-1) мощностей. Преимущественно излучатели, использующиеся для работы в условиях сильных механических полей и электрических напряжений – сегнетожесткая керамика;
- III с повышенной стабильностью частотных характеристик в заданном интервале температур и времени (ЦТС-22, НБС-3);
- IV высокотемпературная керамика с повышенной стабильностью частотных характеристик – до $+250^\circ\text{C}$ (ЦТС-21).

В соответствии с химическим составом пьезокерамическим материалам присваиваются марки, буквы которых означают химическую формулу, а цифры присваиваются заводом-изготовителем:

Б – барий, В – висмут,
 Ц – цирконий, К – кальций,
 С – свинец, Ст – олово.
 Н – ниобий,

Технологический процесс изготовления пьезокерамических элементов (ПКЭ) можно разбить на 7 этапов.

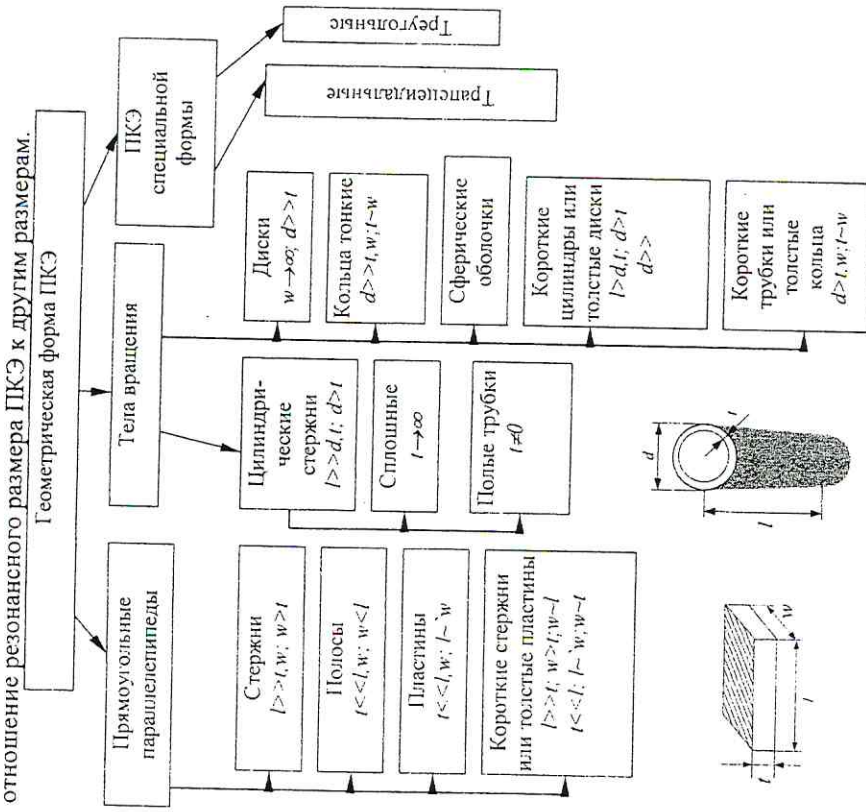
- 1) Синтез материала – сущность процесса сводится к получению однородного мелкодисперсного продукта с высоким содержанием требуемого вещества. Исходное сырье – окислы и соли вышеуказанных металлов.
- 2) Изготовление заготовок – осуществляется прессованием или литьем под давлением. Сухой порошок пластифицируют, прессование осуществляется в специальных прессформах при удельных давлениях $(5-8) \cdot 10^7$ Па.
- 3) Обжиг – производят в печах со специальным градиентом температуры ($t^\circ = 900-1500^\circ\text{C}$).
- 4) Механическая обработка – этап непосредственного изготовления пьезоэлемента. Изготовление заготовки осуществляется теми же способами, что и обработка металлов: на токарных, фрезерных и сверлильных станках. Рекомендуются победитовые резцы, сверла и т.д. Доводка элементов до заданных размеров осуществляется шлифовкой, для доводки по частоте используют полировку.
- 5) Нанесение электродов – осуществляется вакуумным напылением, вжиганием, осаждением из раствора (химический способ). Материалы для электродов – серебро (обычно), никель, палладий, индий, медь. Наиболее распространенный способ – вжигание серебряной пасты: на

обезжиренную поверхность наносят кистью или пульверизатором слой серебряной пасты, сушат при 200°C и вжигают при $750-800^\circ\text{C}$.

- 6) Поляризация – процесс ориентации произвольно направленных доменов вещества в определенном направлении. Способы: масляная и воздушная, высоко- и низкотемпературная, в постоянном или импульсном поле динамическим методом. Чаще используется масляная или воздушная поляризация в непрерывном постоянном электрическом поле.
- 7) Выходной контроль пьезоэлементов – визуальный осмотр на соответствие чертежу и техническим условиям, контроль поляризации, диэлектрических констант, коэффициента связи.

ПКЭ можно классифицировать по трем основным признакам:

- геометрическая форма;
- взаимная ориентация приложенного электрического поля и возникающего колебательного смещения;
- отношение резонансного размера ПКЭ к другим размерам.

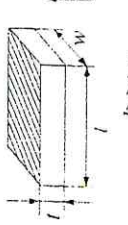
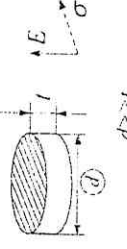
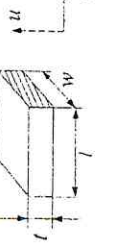
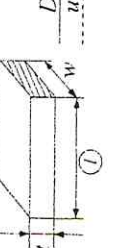


По взаимной ориентации электрического поля и колебательного смещения, определяющей электрические граничные условия в направлении колебаний, выделяют моды колебаний, в которых электрическое поле перпендикулярно направлению колебаний (пьезомягкие) или совпадает с ним (пьезожесткие).

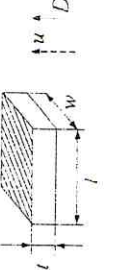
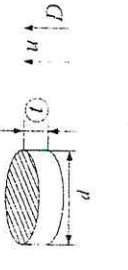
Используются следующие условные обозначения:

- * заштрихованная поверхность – нанесенный электрод;
- * сплошная линия со стрелкой – направление электрического поля (от электрода к электроду);
- * пунктирная линия со стрелкой – направление механических колебаний;
- * размер, обведенный в круг – резонансный, вдоль которого осуществляются механические колебания.

Таблица 1.3

Частотный диапазон	Система уравнений	Тела вращения	
		Прямоугольные параллелепипеды	Пьезомягкие моды
НЧ	(1)	 <p>$l \gg t, w$ Стержень, поперечные колебания в поле, перпендикулярном длине</p>	 <p>$d \gg t$ Диск, радиальные колебания</p>
ВЧ	(2)	 <p>$l < w \approx t$ Пластина, продольные колебания по толщине</p>	
НЧ	(3)		 <p>$l \gg w \gg t$ Стержень, продольные колебания по длине</p>

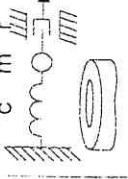
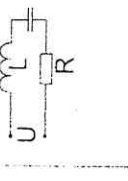


ВЧ

(4)	 <p>$l < w \approx t$ Пластина, продольные колебания по толщине</p>	 <p>$d \gg t$ Диск, продольные колебания по толщине</p>
-----	--	---

Сущность метода эквивалентных схем

Дифференциальные уравнения, описывающие явления в преобразователе, одинаковы по своей форме с уравнениями, описывающими явления в некоторой электрической схеме, называемой эквивалентной.

Таблица 1.4

Механическая система	Эквивалентная схема	Электрические дифференциальные уравнения	Механические дифференциальные уравнения движения
		$L \frac{d^2 q}{dt^2} + R \frac{dq}{dt} + \frac{1}{C} q = v$	$\frac{d^2 \xi}{dt^2} + \frac{1}{a^2 \rho S_{11}} \xi = \frac{d_{31}}{a \rho S_{11}} E_3$
		$\frac{\partial^2 v}{\partial l^2} = v^2 \frac{\partial^2 v}{\partial X^2}$	$\rho \frac{\partial^2 \xi}{\partial l^2} = \frac{1}{S} \frac{\partial^2 \xi}{\partial X^2}$

Преимущество метода эквивалентных схем: возможность использования эффективных методов теории электрических цепей.

Правила составления эквивалентных схем [2]:

- 1) используются системы уравнений пьезоэффекта (1) – (4) и соответствующие им уравнения движения;
- 2) задаются граничные условия на двух активных поверхностях;
- 3) получают систему из трех уравнений, описывающих процессы, протекающие в преобразователе

$$\left. \begin{aligned} F_1 = \dots \\ F_2 = \dots \\ U = \dots \end{aligned} \right\} \quad (*)$$

где F_1, F_2 – силы, действующие на концах пьезоэлемента; U – напряжение на электродах;

4) составляют эквивалентную схему, имеющую две пары механических (F) и одну пару электрических (U) клемм;

5) вводят понятие “идеальный электромеханический трансформатор”, который связывает механическую и электрическую стороны; коэффициент трансформации имеет вид:

$$N = \frac{\text{статич. внешн. сила}}{\text{внутр. эл.напряж. заторм. элемент}} \quad (U = U) = \frac{F}{U}$$

где значение N определяет величину пьезоэффекта и эффективность преобразования механической энергии в электрическую;

F – статическая внешняя сила;

U – внутреннее электрическое напряжение заторможенного элемента.

N имеет порядок $\sim 10^{-2} - 10^2$, размерность [H/м].

6) Уравнения (*) сопоставляются с уравнениями для эквивалентной электрической схемы

$$\left. \begin{aligned} U_1 = \dots \\ U_2 = \dots \\ U = \dots \end{aligned} \right\}$$

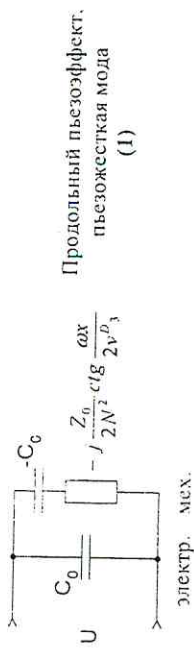
Откуда получаем параметры эквивалентной схемы, как коэффициенты при одинаковых переменных.

Частотная характеристика преобразователя $Y(\omega)$ или $Z(\omega)$ [1]

$Y = G - jB$ – полная проводимость (адмитанс);

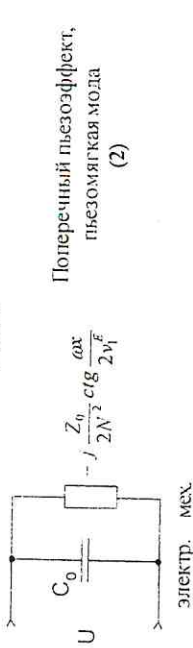
$Z = R - jX$ – полное сопротивление (импеданс).

Полная эквивалентная схема свободного колеблющегося пьезоэлемента (стержня, пластины) может быть приведена к виду, представленному на рис. 3, 4.



Продольный пьезоэффект, пьезожесткая мода (1)

Рис. 3



Поперечный пьезоэффект, пьезомягкая мода (2)

Рис. 4

Здесь x – резонансный размер (в общем случае может быть w или l).
Ветвь, содержащая статическую емкость C_0 , отражает электрическую сторону, а другая ветвь – механическую.

Условие резонанса для механической стороны: $Im Y = 0; B = 0$.

$$\omega C_0 - \frac{2N^2}{Z_0} ig = 0 \quad \text{— для схемы на рис. 3;} \quad (1)$$

$$c/ig - \frac{ax}{2v_1^2} = 0 \quad \text{— для схемы на рис. 4.} \quad (2)$$

Графическое решение уравнения (1) приведено на рис. 5.

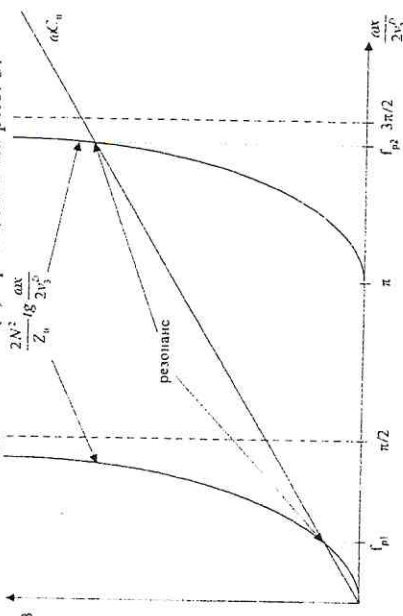


Рис. 5

Частота резонанса f_0 – частота механического резонанса. Определяется для последовательного колебательного контура. Решением уравнения (2) является выражение

$$\frac{\omega x}{2V_1^2} = \left(\frac{2n-1}{2} \right) \pi, \quad n=1, 2, 3, \dots$$

Для стержня или пластины, работающих на поперечном пьезоэффекте, резонанс наблюдается при условии, что резонансный размер (l_n или l) кратен нечетному числу длин полуволн.

Полные проводимости схем на рис. 3 и рис. 4, т.е. с учетом механической и электрической сторон имеют вид

$$Y_1 = j \frac{\omega C_0 Z_0 c/g}{2V_1^2} - \frac{\omega x}{2N^2} \omega C_0$$

$$Y_2 = j \left(\omega C_0 + \frac{2N^2}{Z_0} - jg \frac{\omega x}{2V_1^2} \right)$$

Условие равенства нулю адмитансов Y , т.е. электромеханического резонанса, следующее

$$\frac{\omega x}{2V_1^2} = \frac{(2n-1)}{2} \pi, \quad n=1, 2, 3, \dots \quad (3)$$

$$\omega C_0 - \frac{2N^2}{Z_0} - jg \frac{\omega x}{2V_1^2} = 0 \quad (4)$$

Графическое решение уравнения (4) представлено на рис. 6.

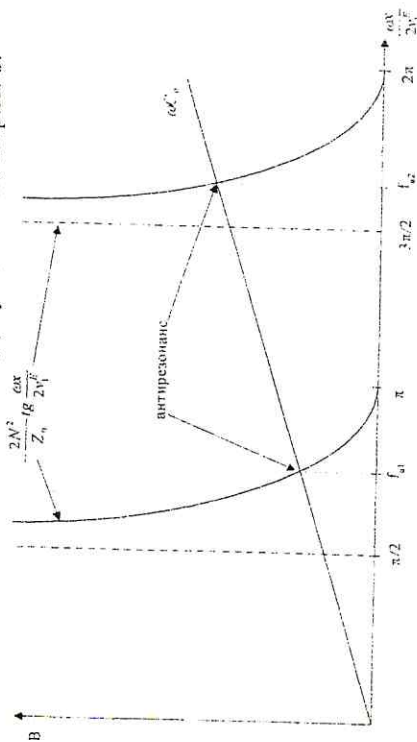


Рис. 6

Частота антирезонанса (f_a) — это частота электромеханического резонанса. Определяется для параллельного колебательного контура ($f_a > f_p$ — всегда).

Без учета потерь энергии в диэлектрическом материале — пьезокерамике — преобразователь характеризуется одной парой основных характеристических частот: f_p и f_a .

Более подробные сведения о пьезоэффекте, пьезоматериалах и пьезоэлементах вы можете получить в [9].

2. ЛАБОРАТОРНАЯ РАБОТА №1.

ИССЛЕДОВАНИЕ СВОЙСТВ ПЬЕЗОКЕРАМИКИ И ХАРАКТЕРИСТИК ПЬЕЗОЭЛЕМЕНТОВ

2.1. Цель и задачи работы

Цель работы: Освоение стандартной методики измерения параметров пьезокерамики (ГОСТ 12370-81) и характеристик пьезоэлементов.

Задачи:

- изучить физические предпосылки использования метода резонанса-антирезонанса;
- изучить особенности измерительных трактов в методе резонанса-антирезонанса;
- научиться делать оценочные расчеты параметров пьезоэлементов (электрическая емкость, характеристические частоты);
- освоить на практике метод измерения свойств пьезокерамических материалов;
- научиться измерять и анализировать АЧХ отдельного пьезоэлемента.

2.2. Теоретическое введение (используемые методики)

2.2.1. Метод резонанса-антирезонанса. Общие определения

Математической моделью, используемой в методе, служат выражения для комплексной проводимости или импеданса (см. п. 1), полученные при решении электромеханической задачи об одномерных колебаниях пьезокерамических элементов (ПКЭ) [1]. Основным допущением модели является пренебрежение всеми видами потерь энергии.

Экспериментально метод основан на измерении частот f_m и f_a (максимума и минимума полной проводимости или импеданса), по которым рассчитываются упругие коэффициенты и коэффициент электромеханической связи. Дополнительные измерения частот свободного образца позволяют оценить величину пьезоконстант.

Основными недостатками метода являются:

- замена частот последовательного f_s и параллельного f_p резонансов, для которых получены основные соотношения, на частоты f_m и f_a соответственно, так как в исходных формулах не учтены механические, пьезоэлектрические и диэлектрические потери;
- диэлектрические параметры измеряются на низких, а не на рабочих частотах;
- влияние конечных размеров ПКЭ на точность определения констант пьезоматериалов и пьезорезонаторов (ПНР).

Основные достоинства:

- простота и доступность математического и аппаратного обеспечения;
- высокая точность определения характеристических частот и рассчитываемых с их помощью упругих констант;
- удовлетворительная точность измерения коэффициентов электро-механической связи и пьезоконстант при условии $\frac{Q^2}{r} \gg 1$ (здесь $r = \frac{f_p^2 - f_s^2}{f_p^2}$);
- возможность автоматизации метода измерений при необходимости оценки параметров большого количества ПКЭ или ПКР.

Формулы представления параметров одномерных мод колебаний пьезоэлементов и определения констант пьезокерамики методом резонанса-антирезонанса приведены в приложениях 2, 3.

Обобщенная схема определения параметров пьезокерамики представлена на рис. 7.

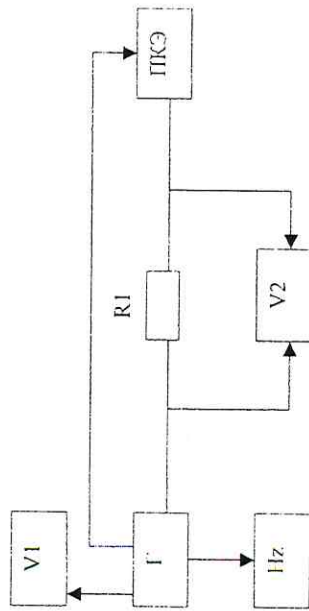


Рис. 7

При проведении испытаний необходимо выдерживать условие $U1 = const$, т.е. показания вольтметра V1 должны поддерживаться на постоянном уровне.

Схема на рис. 8 содержит активное сопротивление R_1 , включенное последовательно с исследуемым преобразователем. Если во всем частотном диапазоне $R_1 \ll |Z|$, где $|Z|$ - модуль собственного сопротивления ПКЭ, то ток в цепи определяется сопротивлением Z

$$i = \frac{U_1}{Z} = U_1 Y$$

U_1 , U_2 и падение напряжения на вспомогательном сопротивлении R_1 пропорционально Y при $U_1 = const$.

Чтобы напряжение U_2 было пропорционально $\delta = \frac{Y}{\omega}$, необходимо ввести еще один частотозависимый делитель напряжения. Один из вариантов показан на рис. 9.

Напряжение от измерительного генератора подается на вспомогательную цепочку $R_1 C_1$, причем если в частотном диапазоне, в котором проводятся измерения, $1/\omega C_1 \gg R_1$, а

сопротивление $R_2 \gg R_1$, то ток в цепи $C_1 R_1$ определяется сопротивлением емкости C_1

$i_1 = \frac{U_1}{1/\omega C_1}$ и напряжение на сопротивлении R_1

$U_{R_1} = i_1 R_1 = U_1 R_1 \omega C_1$ пропорционально частоте ω .

В свою очередь сопротивление $R_2 \gg Z$ во всем частотном диапазоне, в котором проводятся измерения. Тогда ток $i_2 = \frac{U_{R_1}}{R_2}$ и падение

напряжения на ПКЭ

$$U_2 = i_2 Z = \frac{U_{R_1} R_2 \omega C_1}{R_2} Z = \frac{U_1 R_1 C_1 \omega}{R_2} Y$$

Рис. 9

т.е. обратно пропорционально $\frac{Y}{\omega}$ при постоянных значениях U_1, R_1, C_1 и R_2 .

Достоинства схемы:

- измерительный генератор нагружен на большое сопротивление во всем диапазоне частот, и поэтому не приходится заботиться о подстройке амплитуды напряжения на частоте резонанса;
- один из электрических выводов преобразователя заземлен, что исключает возможность электрических наводок.

Недостатки схемы:

- наличие двух делителей приводит к существенному уменьшению выходного напряжения U_2 . Однако напряжение U_1 от измерительного генератора может быть существенно увеличено ввиду большого входного сопротивления схемы. Кроме того, в каждом конкретном случае величины R_1 и R_2 могут быть отрегулированы весьма тщательно;
- вследствие больших значений сопротивления R_2 (до 5-10 МОм) имеет место влияние емкостей монтажа переключателя сопротивлений R_1 и схемы в целом на процесс измерения.

Типичный вид частотной зависимости проводимости ПКЭ показан на рис. 10.

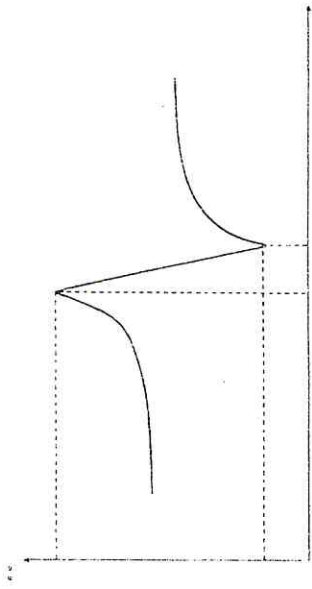


Рис. 10

2.2.2. Эквивалентные схемы пьезоэлементов

Стержень. Продольный эффект. Пьезожесткая мода

Электрический аналог стержня — длинная линия, поэтому используется Т-образная схема замещения.

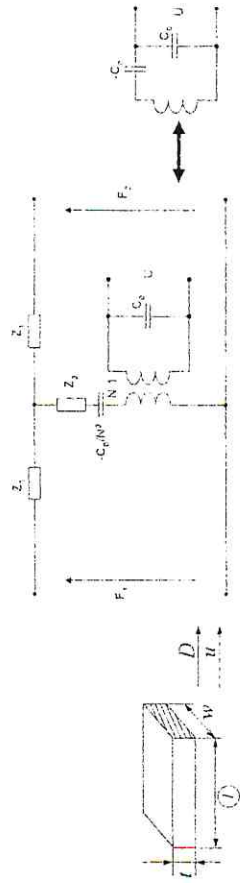


Рис. 11

Параметры эквивалентной схемы определяются следующим образом:

$$C_0 = \frac{wl}{l} \varepsilon_{33}^{\sigma} (1 - K_{33}^2) - \text{емкость заторможенного элемента}; \sigma$$

$\frac{C_c}{N^2}$ — емкость динамического торможения. Представляет собой отрицательную гибкость. Это означает, что реальная упругость стержня меньше его фактической упругости из-за пьезоэлектрической реакции, обусловленной совпадением электрического и механического полей.

Примечание: емкость динамического торможения появляется только при продольном эффекте.

$$N = \frac{wld_{33}}{lS_{2,2}^E} - \text{коэффициент трансформации};$$

$$Z_2 = -jZ_0 \frac{1}{\sin kl} \text{— имеет смысл упругости (для всех схем одинаково);}$$

$$Z_1 = -jZ_0 tg \frac{kl}{2} \text{— представляет собой массу (для всех схем одинаково);}$$

$$k = \frac{\omega}{v_p} \text{— волновое число.}$$

Примечание: обратить внимание на то, что масса стержня разделена пополам по узловой линии, а гибкость сосредоточена в одном месте.



Рис. 13

Функции \sin , tg указывают на неоднозначность решения, его периодичность.

$Z_0 = \rho v_p^D S_{nc}$ — характеристический импеданс, где ρ — поперечное сечение, v_p — плотность пьезокерамики, $S_{nc} = wl$ — поперечное сечение в направлении, перпендикулярном колебательному движению.

Стержень. Поперечный эффект. Пьезомягкая мода

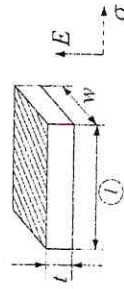


Рис. 14

Рис. 15

Схема на рис. 15 аналогична схеме, показанной на рис. 12, за исключением того, что отсутствует емкость динамического торможения. Параметры эквивалентной схемы определяются следующим образом:

$$C_0 = \frac{wl}{l} \varepsilon_{33}^{\sigma} (1 - K_{33}^2); N = \frac{Wd_{31}}{S_{11}^E}; Z_0 = \rho v_p^E (wl).$$

Сопротивления Z_1 и Z_2 определяются, как описано ранее.

Пластина. Колебания по толщине

Этот случай аналогичен первому, т.е. имеем продольный пьезоэффект, пьезожесткую моду колебаний.

2.2.4. Измерение электрического сопротивления, емкости и индуктивности с помощью ПК [7]

Существует два вида электрического сопротивления: активное и реактивное. Активное сопротивление (R) не зависит от рода тока. Реактивное сопротивление – это сопротивление катушек индуктивности (дросселей) и конденсаторов. Величина реактивного сопротивления зависит от частоты тока. Так, на постоянном токе реактивное сопротивление конденсатора стремится к бесконечности, а дросселя, наоборот, – к нулю (без учета активной составляющей сопротивления провода).

С изменением частоты тока электрическое сопротивление конденсатора изменяется по закону $X_c = \frac{1}{\omega C}$, где X_c – сопротивление конденсатора, Ом; f – частота, Гц; C – емкость, Ф.

Электрическое сопротивление конденсатора переменному току можно измерить. Зная сопротивление и частоту тока, легко по формуле вычислить емкость. Кроме того, если в электрической цепи стоит конденсатор, происходит сдвиг фаз напряжения и тока. Причем ток опережает напряжение на 90° .

Реактивное сопротивление катушки индуктивности с увеличением частоты возрастает: $X_L = 2\pi fL$, где X_L – сопротивление катушки, Ом; L – индуктивность, Гн.

Индуктивность дросселя легко вычисляется по известному сопротивлению и заданной частоте тока. При этом фазы напряжения и тока на катушке индуктивности сдвигаются относительно друг друга, и теперь ток отстает от напряжения на 90° .

Для измерения реактивного сопротивления емкости и индуктивности потребуется, прежде всего, переменный ток синусоидальной формы. С задачей программного генератора может справиться звуковая плата компьютера. Другая проблема – определение величины электрического сопротивления измеряемого элемента. Эту задачу можно решить программным путем с помощью той же звуковой платы, не прибегая к специальным аналого-цифровым преобразователям.

В качестве измерительного преобразователя используется обычная звуковая карта. Генерируемый сигнал переменного тока с выхода Line-Out поступает на линейный вход Line-In. По одной цепи сигнал с Line-Out идет напрямую, без всякого сопротивления на левый линейный вход звуковой карты – это эталонный сигнал. По другой цепи тот же выходной сигнал поступает на правый линейный вход, но уже через измеряемый элемент (рис. 18). Так же вводится дополнительный резистор (R serial), который устанавливается снаружи корпуса системного блока и соединяется одним концом с корпусом. Уровень сигнала с правого входа Line-In, прошедшего через сопротивление, будет меньше, чем с левого. Программа измеряет соотношение уровней сигналов с левого и правого входов, и по нему вычисляется активное сопротивление обычного резистора. Для реактивной нагрузки емкости и индуктивности алгоритм несколько усложняется:

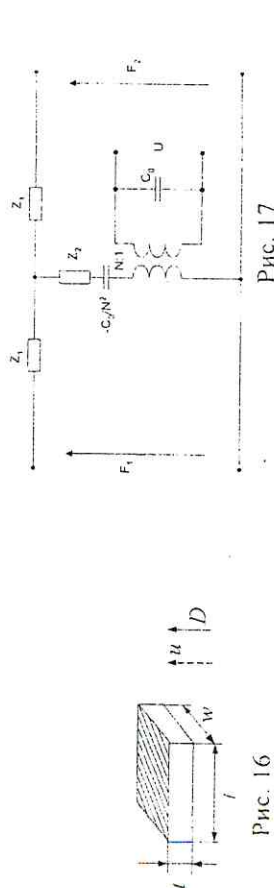


Рис. 16

Параметры эквивалентной схемы определяются следующим образом:

$N = C_0 \cdot K_{33}^2$; $C_0 = \frac{\epsilon_0 \epsilon_{33}^0}{l}$; $Z_0 = \rho V_3^D(wl)$. Сопротивления Z_1 и Z_2 определяются, как описано ранее.

2.2.3. Расчет резонансных частот

Стержень:

1. Расчет резонанса для пьезомягкой моды колебаний осуществляется по формуле $f_p = \frac{c_{31}}{2l}$. Здесь c_{31} – скорость звука в пьезокерамике, l – длина пьезоэлемента. Далее по формуле $f_a = \frac{f_p}{\sqrt{1 - K_{31}^2}}$ определяется частота антирезонанса. Здесь K_{31} – коэффициент электромеханической связи (для поперечного пьезоэффекта).

2. Для пьезожесткой моды находится частота антирезонанса по формуле: $f_a = \frac{c_{33}}{2l}$. Здесь c_{33} – скорость звука в пьезокерамике (l – толщина пьезоэлемента). Частота резонанса находится из соотношения: $f_p = f_a \sqrt{1 - K_{33}^2}$, где K_{33} – коэффициент электромеханической связи (при продольном пьезоэффекте).

Диск:

1. Для толщинной моды колебаний (продольный пьезоэффект) расчет частоты антирезонанса диска проводится по формуле $f_a = \frac{c_{33}}{2l}$, где l – толщина диска. По аналогии с пластиной резонансная частота находится по формуле: $f_p = f_a \sqrt{1 - K_{33}^2}$.

2. Для радиальной моды колебаний (поперечный пьезоэффект) для частоты резонанса расчет производится по формуле

$$f_n = \frac{2,0488}{2\pi r_0} \sqrt{\frac{1}{[1 - (\sigma^E)^2]} \rho \cdot S_{11}^E}$$

Представление параметров одномерных мод колебаний пьезоэлементов для применения метода резонанса-антирезонанса [1]

Мода	Комплексная проводимость Y	C_n	$I_g(\varphi)$	φ	V
НЧ, стержень	$Y = j\omega C_p \times$	$\frac{h\nu}{l} \varepsilon_{33}^e (1 - k_p^2)$	$\frac{I_g(\varphi)}{\varphi}$	$\frac{\omega l}{2V_p^e}$	$V_p^e = \frac{l}{\sqrt{\rho S_{11}^e}}$
НЧ, диск	$\times \left[1 + \frac{k_p^2}{1 - k_p^2} I_g(\varphi) \right]$	$\frac{\pi R^2}{l} \varepsilon_{33}^e (1 - k_p^2)$ $k_p^2 = \frac{2k_p^2}{1 - \sigma}$	$1 + \sigma$ $J_1(\varphi) - (1 - \sigma)$ $J_1(\varphi) = \frac{\varphi J_0(\varphi)}{J_1(\varphi)}$	$\frac{\omega R}{V}$	$V = \frac{l}{\sqrt{\rho S_{11}^e (1 - \sigma^2)}}$
ВЧ, стержень	$Y = \frac{j\omega C_p}{1 - k_p^2} I_g(\varphi)$	$\frac{\omega l}{l} \varepsilon_{33}^e$	$\frac{I_g(\varphi)}{\varphi}$	$\frac{\omega l}{2V}$	$V = \frac{l}{\sqrt{\rho S_{11}^e}}$
ВЧ, диск	$k_p^2 = h_{33}^e \varepsilon_{33}^e S_{33}^e$	$\frac{\pi R^2}{l} \varepsilon_{33}^e$			

Таблица параметров пьезокерамики [4, 6]

Тип пьезокерамического материала	Плотность, $\rho, \times 10^3$, кг/м ³	Скорость звука $c_{31}/c_{33}, \times 10^3$, м/с	Относительная диэлектрическая проницаемость $\frac{\varepsilon_{33}^e}{\varepsilon_0} / \frac{\varepsilon_{33}^e}{\varepsilon_0}$	Кэффицициент упругой податливости, $S_{31} / S_{33}, \times 10^{-12}$, м ² /Н	Кэффицициент Пуассона σ^e
ТБК-3	5,4	4,7/4,4	1200/950	8,4/9,5	0,3
ЦТС-23	7,4	3,2/3,0	1100/935	13,2/15	0,27
ЦТБС-3	7,2	3,5/3,2	2300/1280	11,3/13,5	0,31
ЦТСНВ-1	7,3	2,9/2,6	2200/1030	16,3/20,2	0,3
ЦТС-19	7,45	3,12/3,0	1490/840	5,3/10,1	0,36

Тип пьезокерамического материала	Кэффицициент диэлектрических потерь $\text{tg}\delta, \%$	Кэффицициент деформации $h_{33}, \times 10^8$, В/м ²	Добротность Q_M	Кэффицициент электромеханической связи K_{31}/K_{33}	Пьезомодуль $d_{31}/d_{33}, \times 10^{-12}$, Кл/Н
ТБК-3	1,9	14,8	450	0,17/0,41	49/121
ЦТС-23	0,75	10,3	300	0,2/0,41	75/150
ЦТБС-3	1,2	15,6	350	0,3/0,6	134/286
ЦТСНВ-1	1,9	9,1	60	0,33/0,67	157/363
ЦТС-19	2,5	17,8	70	0,28/0,64	100/200

$\varepsilon_c = 8,85 \cdot 10^{-12}$ Ф/м

ПРИЛОЖЕНИЕ 3

Формулы для определения констант пьезокерамики в методе резонанса-антрезонанса [1]

Модальность	Упругие характеристики		Диэлектрические характеристики		Пьезоэлектрические характеристики	
	ν	Упругие константы	Диэлектрические константы	КЭМС (k)	Пьезо-константы	
ПЧ, стержень	$\nu^E = 2f_r l$	$s_{11}^E = (4\rho_r^2 l^2)^{-1}$	$\epsilon_{33}^o = C^o \frac{l}{hw}$ $C^o = \frac{C_0}{1 - k_{31}^2}$	$k_{31}^2 = 1 - \left[\frac{\left(\frac{\pi f_o}{2 f_r} \right)}{\pi f_o} \right]^2$	$d_{31} = \frac{k_{31} l}{2 f_r l} \sqrt{\frac{C^o}{m}}$	
ПЧ, диск	$\nu = \frac{2\pi R}{\varphi_1} f_r$ φ_1 – первый корень уравнения $J_1(\varphi) = 1 - \sigma$ (см. приложение 2)	$s_{11}^E = \frac{\varphi_1^2}{4\pi^2 R^2} \times \frac{1}{f_r^2 \rho (1 - \sigma^2)}$	$\epsilon_{33}^o = C^o \frac{l}{\pi R^2}$ $C^o = \frac{C_0}{1 - k_p^2}$	$\frac{k_p^2}{1 - k_p^2} = \frac{-\varphi_1 \left(1 + \frac{\Delta f}{f_r} \right)}{(1 + \sigma)} \times \left\{ \varphi_1 \left(1 + \frac{\Delta f}{f_r} \right) \right\} \times \left\{ J_1 \varphi_1 \left(1 + \frac{\Delta f}{f_r} \right) \right\}$	$d_{31} = \frac{k_p \varphi_1 l}{2 \pi f_r R} \times \sqrt{\frac{C^o}{2(1 + \sigma) m}}$	
ВЧ, стержень	$\nu^o = 2f_o l$	$s_{33}^o = \frac{1}{4\rho_o^2 l^2}$	$\epsilon_{33}^o = C^o \frac{l}{hw}$ $C^o = C_0 (1 - k_t^2)$	$k_t^2 = \frac{\pi f_o}{\lg \left(\frac{\pi f_o}{2 f_r} \right)}$	$h_{33} = k_t 2f_o \sqrt{\frac{m}{C^o}}$	
ВЧ, диск			$\epsilon_{33}^o = C^o \frac{l}{\pi R^2}$			

ПРИЛОЖЕНИЕ 4



Бланк отчета (пример оформления)
МИНИСТЕРСТВО ОБРАЗОВАНИЯ И НАУКИ
РОССИЙСКОЙ ФЕДЕРАЦИИ
ФЕДЕРАЛЬНОЕ АГЕНТСТВО ПО ОБРАЗОВАНИЮ
ГОСУДАРСТВЕННОЕ ОБРАЗОВАТЕЛЬНОЕ УЧРЕЖДЕНИЕ
ВЫСШЕГО ПРОФЕССИОНАЛЬНОГО ОБРАЗОВАНИЯ
ТАГАНРОГСКИЙ ГОСУДАРСТВЕННЫЙ
РАДИОТЕХНИЧЕСКИЙ УНИВЕРСИТЕТ

553400 – Биомедицинская инженерия

«Измерительные преобразователи и электроды»

Лабораторная работа №1
Исследование параметров пьезоэлементов
пьезоэлементов

ОТЧЕТ (часть 1)

Ф. и. о. студента Иванов И.И.

Ф. и. о. партнера Петров А.А., Михайлова Е.Н.

Дата выполнения 20.10.2004

Фамилия, и.о. преподавателя Кузнецов В.В.

Оценка лабораторной работы (уровень теоретических + технических знаний) (40 + 45 максимум)

Теория	1	2	3	4	5	6	7	8	9
Практика									

Оценка выполнения отчета (15 максимум)

1	2	3	4	5
---	---	---	---	---

Общая оценка (100 максимум)

Комментарий преподавателя:

Примечание: Листы отчета сдать преподавателю в скрепленном виде или в папке (файле).

используются две частоты и кроме ослабления сигнала также учитывается сдвиг фаз. Емкость конденсаторов и индуктивность дросселей определяется путем решения системы из двух уравнений.

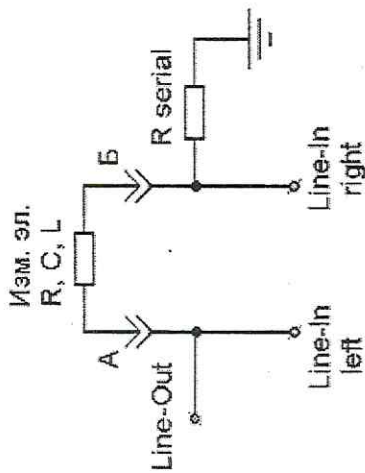


Рис. 18

Для измерения электрического сопротивления, емкости и индуктивности используется программа Multi Meter [8], которая работает под управлением Windows9X в минимальной конфигурации CPU 486DX4, 16М RAM. Multi Meter состоит из одного исполнимого файла (212Кб) и не требует инсталляции; ее интерфейс прост и понятен (рис. 19). Слева в области «Work mode» задаются режимы калибровок и измерений. Сначала программа калибруется. В режиме «Calibrating short» программа запускается с замкнутой накоротко измерительной целью (точки А и Б) без всякого сопротивления. При этом нужно подождать некоторое время, пока в окне «Егг» не установится наименьшее числовое значение. Таким же способом калибровка производится в режиме «Calibrating open», но уже при разомкнутой измерительной цепи. Режим «Measure 1st mtd» используется для измерения сопротивления резисторов. В положении «Measure 2nd mtd» измеряется емкость или индуктивность.

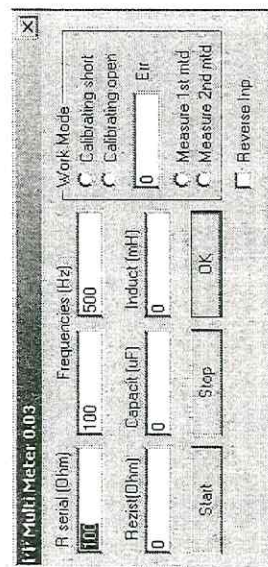


Рис. 19

Пользователем задаются значения генерируемых для измерения частот

(поля Frequencies(Hz)) и сопротивление установленного дополнительного резистора (поле R serial(Ohm)). Эти параметры могут быть разными для различных режимов и величин измерений, что будет уточнено ниже. В нижних полях выводятся числовые значения для измеряемых величин: сопротивление (Ом), емкость (мкФ), индуктивность (мГн). Теоретически каждый электрический элемент может одновременно обладать заметными величинами сопротивления, емкости и индуктивности, что и будет отображаться во всех трех окнах программы. Однако действительным будет только то значение, которое соответствует роду измеряемой величины.

Значения частот Multi Meter могут лежать в интервале 50–1000 Гц. При измерении сопротивления обычного резистора подбор частоты не так важен. Обе частоты применяются в режиме «Measure 2nd mtd», при этом разница между ними (в левом/правом окне) не должна быть меньше 10% и больше 200%. Сопротивление резистора R serial может находиться в пределах 20–1000 Ом (чаще 20–100 Ом), в зависимости от режима и диапазона измерений. Величина сопротивления R serial должна указываться в окне программы с большой точностью. Как показывает практика, при отличии указанного значения от действительного сопротивления более чем на 1% резко возрастает конечная погрешность измерений Multi Meter.

Таблица 2.1

Рекомендации по подбору сопротивления R serial и частот сигнала			
R serial, Ом	20	100	300
Диапазон измерения сопротивлений R, Ом	1–20000	До 150000	200–500000
Погрешность, %	5	5	5
Диапазон измерения емкостей С, Ф	1000 мкФ – 10 нФ	1–10 нФ	–
Частоты f_1/f_2 , Гц	100/1000	500/1000	700/1000
Погрешность, %	5–6	10	–
Диапазон измерения индуктивностей L, Гн	4 мкГн – 120 мГн	–	–
Частоты f_1/f_2 , Гц	700/1000	–	–
Погрешность, %	5	–	–

2.3. Порядок выполнения работы

2.3.1. Домашнее задание

Исходные данные:

- пьезоэлемент(ы) (для бригады студентов);
- резонансный размер (мода колебаний) – индивидуально для каждого студента;
- тип пьезокерамики – индивидуально для каждого студента.

2.3.1.1.¹ Получить у преподавателя пьезоэлемент и снять геометрические размеры, рассчитать площадь электродов и объем пьезоэлемента. Выполнить эскиз. Указать расположение электродов (штриховкой). Данные занести в табл. 1. (приложение 4).

2.3.1.2.² Выполнить расчет параметров пьезоэлементов, резонансных и антирезонансных частот для пьезокерамических материалов, приведенных в приложении 1. Результаты расчетов свести в табл. 2 (приложение 4).

Для заполнения табл. 2 необходимо рассчитать:

– собственную емкость пьезоэлемента C_0 (по таблице приложения 2);

– емкость свободного элемента C^* для низкочастотных мод (по таблице приложения 3);

– емкость заторможенного элемента C'' для высокочастотных мод (по таблице приложения 3);

– частоты основного резонанса и антирезонанса (см. п. 2.2.3).

2.3.1.3.³ Нарисовать полную (см. п. 2.2.2) и упрощенную (см. п. 1) эквивалентную электромеханическую схему пьезоэлемента. Рассчитать частотную зависимость проводимости $Y(f)$ в диапазоне $0,5f_r - 2f_r$. Использовать формулы для Y из таблицы приложения 2.

2.3.2. Лабораторные исследования

2.3.2.1. Определить плотность пьезокерамического материала.

Взвесить пьезоэлемент и вычислить плотность по формуле $\rho = \frac{m}{V}$, где m – масса пьезоэлемента в кг (результат измерения); V – объем пьезоэлемента в m^3 (расчетное значение). Полученное значение занести в таблицы 1 и 4 (приложение 4).

Сравнить с табличными значениями. Какой тип керамики (по расчетным значениям) более соответствует результатам измерения плотности пьезоматериала?

2.3.2.2. Определить полярность пьезоэлемента и отметить ее карандашом.

Контроль полярности пьезокерамических элементов или преобразователей производится с помощью осциллографа [5].

Для измерений элемент или преобразователь устанавливают на прокладке из пористой резины. Один вывод преобразователя подключают к клемме «Вход», а другой – к клемме «Земля» осциллографа.

¹ Выполняется бригадой студентов из 3–5 человек.

² Выполняется каждым студентом индивидуально. Расчет ведется для одного из пьезоматериалов, выбранных в таблице приложения 1.

³ Выполняется каждым студентом индивидуально для заданной преподавателем формы пьезоэлемента и моды колебаний. В расчете используются параметры пьезокерамики, выбранной в п. 2.3.1.2.

Полярность элемента или преобразователя определяется легким постукиванием по активной поверхности. Если первый выброс на экране осциллографа направлен вверх от линии развертки, то вывод пьезоэлемента, соединенный с клеммой «Вход», имеет положительную полярность, если вниз, – то отрицательную.

2.3.2.3. На частоте 1 кГц измерить емкость свободного пьезоэлемента C^* и активное сопротивление. Измерения проводятся на стенде с использованием ПК и соответствующего программного обеспечения.



Ярлык для ПК

mm.exe

Запустить программу Multi Meter . Выполнить калибровку стенда. Она выполняется в два этапа.

1) Поставить маркер в поле Calibrating short, замкнуть перемычкой клеммы А и В на измерительном стенде, нажать кнопку Start. Когда в поле Егт установится минимальное значение, нажать кнопку Stop.

2) Поставить маркер в поле Calibrating open, убрать перемычку, оставив свободными клеммы А и В на измерительном стенде, нажать кнопку Start. Когда в поле Егт установится минимальное значение, нажать кнопку Stop. Выполнить измерение активного сопротивления.

1) Поставить маркер в поле Measure 1st mtd.

2) В поле R serial установить значение вспомогательного сопротивления (20), поставить переключатель на стенде в соответствующее положение.

3) Подсоединить пьезоэлемент к клеммам А и В.

4) Нажать кнопку Start. В поле Resist(Ohm) зафиксировать результат. Выполнить измерение емкости.

1) Поставить маркер в поле Measure 2nd mtd.

2) В поле R serial установить значение вспомогательного сопротивления (100), поставить переключатель на стенде в соответствующее положение.

3) В поле Frequencies установить значения вспомогательных частот 500 и 1000.

4) Нажать кнопку Start. В поле Capacit(µF) зафиксировать результат. Результаты измерений занести в таблицы 3, 5 приложения 4.

Сравнить с полученными расчетными значениями. Какой тип керамики (по расчетным значениям) более соответствует результатам измерения емкости пьезоэлемента?

2.3.2.4. Схема установки, используемой в данной работе для измерения АЧХ пьезоэлементов [3], показана на рис. 20.

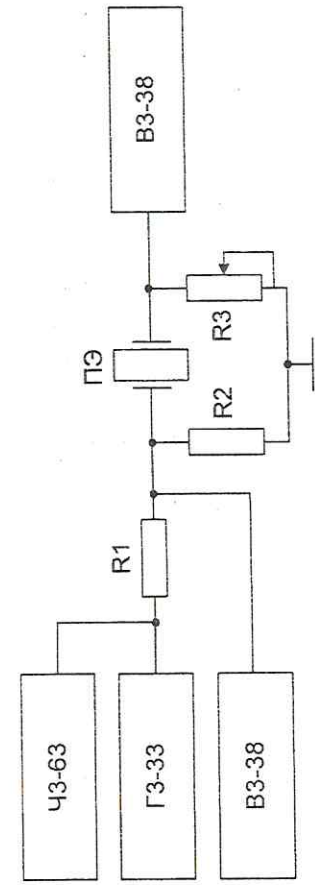


Рис. 20

Лабораторная установка реализована в виде стенда. Его внешний вид и схема подключения контрольно-измерительных приборов показаны на рис. 21.

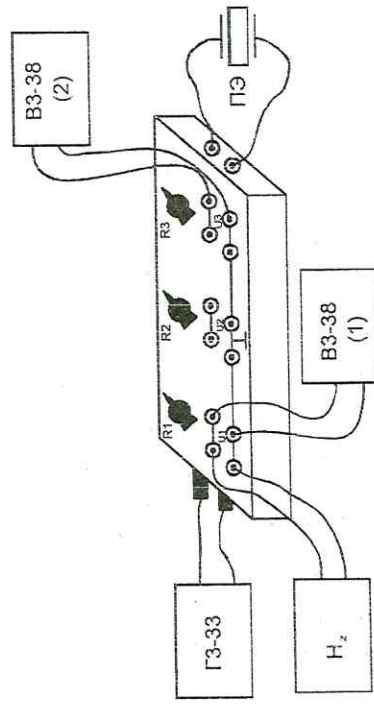


Рис. 21

Генератор ГЗ-33 позволяет плавно изменять частоту входного сигнала в диапазоне 0–200 кГц. (Может использоваться генератор Г4-154 для работы в диапазоне частот входного сигнала 0–2 МГц.) Амплитуда входного сигнала устанавливается в пределах 1–3 В. Частотомер Нз (ЧЗ-63) используется для точного определения частоты сигнала, подаваемого на пьезоэлемент. Вольтметр ВЗ-38 (1) используется для контроля постоянства входного напряжения. Вольтметр ВЗ-38 (2) является измерительным и фиксирует значения выходного напряжения.

Сопротивление R1 изменяется ступенчато в пределах 0–12 кОм. Сопротивление R2 изменяется ступенчато в пределах 2 Ом–1 кОм. Эти сопротивления используются для согласования схемы с генератором: $R_1 R_2 R_T$, где R_T – внутреннее сопротивление генератора. Сопротивление R3 изменяется ступенчато в пределах 0–10 кОм. Это сопротивление

используется для согласования с пьезоэлементом и подстраивается в процессе измерений для достижения максимальной чувствительности. Величина сопротивления R3 в схеме должна выбираться из условия

$$R3 = \frac{R}{20 \div 10}, \text{ где } R - \text{ измеренное значение активного сопротивления.}$$

Собрать схему и пригласить преподавателя для контроля.

2.3.2.5. Выполнить измерение частотной характеристики преобразователя вблизи расчетной основной частоты (использовать результаты измерений п. 2.3.2.1, 2.3.2.3 для уточнения резонансной частоты). Особо фиксировать частоты f_{max} и f_{min} .

АЧХ оформить в виде таблицы (см. приложение 4, табл. 6).

Значения частот резонанса и антрирезонанса занести в таблицы 3, 5 приложения 4.

2.3.3. Обработка результатов измерений

2.3.3.1. По результатам измерений п. 2.3.2.5 построить график $U(f)$.

Отметить характеристические частоты (f_r, f_d)

Сравнить с полученными расчетными значениями. Какой тип керамики (по расчетным значениям) более соответствует результатам измерения характеристической частот пьезоэлемента?

2.3.3.2. Используя экспериментальные данные, рассчитать упругие, диэлектрические и пьезоэлектрические константы пьезокерамического материала. Скорость звука в пьезокерамике c , упругий модуль s , диэлектрическая постоянная ϵ , коэффициент электроэластической связи k и пьезоконстанты d, h рассчитываются для исследуемой формы и моды колебаний пьезоэлемента, используя формулы из таблицы Приложения 3. Добротность Q рассчитывается с использованием следующей формулы:

$$Q_M = \gamma \sqrt{\frac{|Y_m|}{|Y_n|}} \approx \frac{f_r^2}{f_a^2 - f_r^2} \sqrt{\frac{Y_m}{Y_n}}, \text{ при этом делается замена } \frac{Y_m}{Y_n} = \frac{V_m}{V_n}$$

где V_m и V_n - напряжения на сопротивлении R3 на частотах f_m и f_n , соответственно.

Расчетные значения занести в таблицы 3, 5 приложения 4.

Сравнить с табличными значениями. Сделать окончательный вывод, какой тип пьезокерамического материала был исследован?

2.4. Содержание отчета

Отчет по выполнению лабораторной работы состоит из двух частей. Первая часть, содержащая домашнее задание, выполняется индивидуально, каждым студентом. Вторая часть, содержащая результаты лабораторных исследований и их анализ, выполняется бригадой студентов.

Отчет оформляется на бланках, образцы которых приведены в

приложении 4. Бланки отчетов содержатся в pdf-файлах на странице кафедры ЭГА и МТ в Интернете, в разделе Литература <http://www.fep.isge.ru/vip/egamt/learn>), где их можно скопировать или распечатать.

Студент самостоятельно рассчитывает необходимые параметры (см. п. 2.3.1) на основе исходных данных, заданных преподавателем, и заполняет первую часть отчета. Эта работа выполняется студентом в рамках часов, отводимых на самостоятельную работу.

Во время лабораторных занятий, бригада студентов заполняет вторую часть отчета, в которой содержатся сводные таблицы с результатами индивидуальных вычислений, что является допуском к выполнению лабораторных исследований.

Результаты лабораторных исследований, оформленные в виде таблиц и графиков экспериментальных и расчетных значений, заносятся бригадой студентов во вторую часть отчета и в первую часть индивидуальных отчетов.

В заключение второй части делается общий вывод по результатам выполнения лабораторной работы (см. п. 2.3.3.2).

В заключение первой части отчета каждый студент самостоятельно делает вывод, отвечая на вопросы, содержащиеся по ходу выполнения лабораторной работы (см. пп. 2.3.2, 2.3.3).

2.5. Оценка работы и контрольные вопросы

Оценка студента за выполнение лабораторной работы складывается из трех частей: 1) оценка уровня теоретических знаний (40 баллов), 2) оценка уровня технических знаний и навыков практической работы (45 баллов), 3) оформление отчета (10 баллов). Таким образом, суммарная оценка за лабораторную работу составляет $40 + 45 + 15 = 100$ баллов, что легко переводится в оценку по действующей пятибалльной системе в соответствии с методикой РИТМ: 100–85 – «отлично», 84–70 – «хорошо», 69–55 – «удовлетворительно», менее 55 баллов – «неудовлетворительно».

Критерии оценки

1. Теоретическая часть. Оценка складывается из оценки правильности расчетов, выполненных в домашнем задании (первая часть отчета), и ответов на контрольные вопросы теоретического характера при сдаче лабораторной работы преподавателю в форме устного опроса.

- 1.1. Расчет площади электродов и объема – 5 баллов.
- 1.2. Расчет электрической емкости – 5 баллов.
- 1.3. Расчет характеристических частот – 5 баллов.
- 1.4. Эквивалентные схемы – 5 баллов.
- 1.5. Расчет $Y(f)$ – 5 баллов.
- 1.6. Ответ на контрольный вопрос – 5 баллов.
- 1.7. Ответ на контрольный вопрос – 5 баллов.
- 1.8. Ответ на контрольный вопрос – 5 баллов.

2. Практическая часть. Оценка складывается из оценки степени активности студента в процессе выполнения лабораторной работы, умения

работать с приборами, умения интерпретировать полученные результаты и оценивать их достоверность, а также ответов на контрольные вопросы по лабораторным установкам при сдаче лабораторной работы преподавателю в форме устного опроса.

- 2.1. Сборка лабораторного стенда – 5 баллов.
- 2.2. Настройка стенда – 5 баллов.
- 2.3. Работа с приборами – 5 баллов.
- 2.4. Фиксирование результатов – 5 баллов.
- 2.5. Достоверность результатов – 5 баллов.
- 2.6. Интерпретация результатов – 5 баллов.
- 2.7. Ответ на контрольный вопрос – 5 баллов.
- 2.8. Ответ на контрольный вопрос – 5 баллов.
- 2.9. Ответ на контрольный вопрос – 5 баллов.

3. Оформление отчета. Оценка складывается из оценки умения студента представить результаты теоретических и практических исследований.

- 3.1. Правильность – 3 балла.
 - 3.2. Аккуратность – 3 балла.
 - 3.3. Точность – 3 балла.
 - 3.4. Четкость – 3 балла.
 - 3.5. Организованность – 3 балла.
- Примечания.*

1. Преподаватель имеет право при оценке работы, выполненной не в установленном учебным графиком срок, снизить оценку отдельных пунктов до 4, 3, 2 или 1 балла.

2. Поощряется дополнительными баллами проявление творческого подхода к выполнению работы (использование информационных технологий, рациональные методы расчета и др.).

Индивидуальные задания

1. Моделирование лабораторного стенда (Electronic Workbench, Microcap, Pspice или др.).
2. Расчет параметров пьезоэлемента и частотной характеристики (Mathcad, MatLab или др.).
3. Обработка результатов эксперимента (MS Excel, Mathcad, MatLab или др.).

Контрольные вопросы

1. Какие моды колебаний пьезоэлементов вы знаете?
2. Чем отличаются "пьезожесткие" моды от "пьезомягких"? Как это учитывается в эквивалентной схеме?
3. Записать систему уравнений состояния для вашего элемента.
4. Какая система индексных обозначений используется в уравнениях состояния? Пределы изменения индексов и их физический смысл.
5. Нарисуйте эквивалентную схему исследованного пьезоэлемента в

общем виде и вблизи резонанса. Как учесть условия нагрузки, использованные в эксперименте?

6. Поясните физический смысл резонансной и антирезонансной частот. Записать условия резонанса (антирезонанса) с учетом геометрии пьезоэлемента и из его эквивалентной схемы.

8. Что такое емкость свободного и закороченного элемента?

9. Что такое коэффициент электромеханической трансформации?

10. Дать определение коэффициенту электромеханической связи (КЭМС).

11. Что такое пьезоконстанты, какие из них используются в данной работе? Дать определение пьезоконстанте (по выбору преподавателя).

12. Дать определения упругих констант.

13. Какие характеристические частоты Вы знаете и с какими параметрами преобразователя они связаны?

14. Сущность метода измерения полярности.

15. Сущность метода измерения емкости.

16. Сущность метода резонанса-антирезонанса.

17. Пояснить назначение резисторов R1, R2, R3 на экспериментальной установке.

18. Пояснить назначение вольтметров на экспериментальной установке.

19. Как экспериментально определяются значения диэлектрических констант?

20. Что такое добротность и как она определяется экспериментально?

СПИСОК ИСПОЛЬЗОВАННЫХ ИСТОЧНИКОВ

1. Пьезокерамические преобразователи: Справочник /В.В.Ганопольский, Б.А.Касаткин, Ф.Ф.Легуша, М.И.Прудько, С.И.Пугачев. – М.: Судостроение, 1984. – 256 с.

2. Физическая акустика/Под ред. Ж. Мэзона. – М.: Мир, 1966. Т. I, ч. А, гл. 3.

3. Руководство к лабораторным работам по курсу ЭАП и А. Ч. I. Пьезоэлементы. – Таганрог: ТРТИ, 1960. № 475.

4. Ультразвук. Маленькая энциклопедия/Под ред. И.П. Голяминой. – М.: Советская энциклопедия. 1979. – 400 с.

5. Рабинович А.Г., Рубанов Л.А. Технология производства гидроакустической аппаратуры. –Л.: Судостроение. 1973. – 224 с.

6. Свердлов Г.М. Гидроакустические преобразователи и антенны: Учебник. 2-е изд., перераб. и доп.–Л.: Судостроение, 1998. – 200 с.

7. <http://www.ferga.ru/online/suprply/21347>. Зубаль И. Измерение электрического сопротивления, емкости, индуктивности с помощью обычного ПК.

8. <http://www.i-adrian.home.ro/mm.htm>. Multi Meter.

9. <http://www.fer.tsure.ru/win/egant/learn>. Старченко И.Б. Конспект лекций по курсу «Измерительные преобразователи и электроды».

СОДЕРЖАНИЕ

1. ОБЩИЕ ТЕОРЕТИЧЕСКИЕ СВЕДЕНИЯ.....	3
2. ЛАБОРАТОРНАЯ РАБОТА №1. ИССЛЕДОВАНИЕ СВОЙСТВ ПЬЕЗОКЕРАМИКИ И ХАРАКТЕРИСТИК ПЬЕЗОЭЛЕМЕНТОВ.....	13
2.1. Цели и задачи работы.....	13
2.2. Теоретическое введение (используемые методики).....	13
2.2.1. Метод резонанса-антирезонанса. Общие определения.....	13
2.2.2. Эквивалентные схемы пьезоэлементов.....	16
2.2.3. Расчет резонансных частот.....	18
2.2.4. Измерение электрического сопротивления, емкости, индуктивности с помощью ПК [7].....	19
2.3. Порядок выполнения работы.....	21
2.3.1. Домашнее задание.....	21
2.3.2. Лабораторные исследования.....	22
2.3.3. Обработка результатов измерений.....	25
2.4. Содержание отчета.....	25
2.5. Оценка работы и контрольные вопросы.....	26
СПИСОК ИСПОЛЬЗОВАННЫХ ИСТОЧНИКОВ.....	28
СОДЕРЖАНИЕ.....	29
ПРИЛОЖЕНИЕ 1.....	30
Таблица параметров пьезокерамики [4, 6].....	30
ПРИЛОЖЕНИЕ 2.....	31
Представление параметров одномерных мод колебаний пьезоэлементов для применения метода резонанса-антирезонанса [1].....	31
ПРИЛОЖЕНИЕ 3.....	32
Формулы для определения констант пьезокерамики в методе резонанса-антирезонанса [1].....	32
ПРИЛОЖЕНИЕ 4.....	33
Бланк отчета (пример оформления).....	33