



МИНИСТЕРСТВО ОБРАЗОВАНИЯ И НАУКИ РОССИЙСКОЙ ФЕДЕРАЦИИ  
Федеральное государственное автономное образовательное учреждение  
высшего образования  
Дальневосточный федеральный университет  
(ДФУ)

**ИНЖЕНЕРНАЯ ШКОЛА**

«СОГЛАСОВАНО»

Руководитель ОП  
Приборостроение

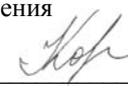
 В.В. Петросьянц

(подпись)

« 28 » сентября \_\_\_\_\_ 2018 г.

«УТВЕРЖДАЮ»

Заведующий кафедрой  
Приборостроения

 В.И. Короченцев

(подпись)

« 28 » сентября \_\_\_\_\_ 2018 г.

**РАБОЧАЯ ПРОГРАММА УЧЕБНОЙ ДИСЦИПЛИНЫ**

Электроакустические преобразователи

**Направление подготовки – 12.03.01 Приборостроение**

профиль подготовки: «Акустические приборы и системы»

**Форма подготовки очная**

курс 3 семестр 6

лекции 36 (час.)

лабораторные работы 18 час.

практические занятия 18 час.

в том числе с использованием МАО лек. 12 /пр. 6 /лаб. 6 час.

всего часов аудиторной нагрузки 72 (час.)

самостоятельная работа 117 (час.)

контрольные работы – не предусмотрено учебным планом

курсовая работа 6 семестр

зачет - не предусмотрено учебным планом

экзамен 6 семестр

Рабочая программа составлена в соответствии с требованиями Образовательного стандарта, самостоятельно устанавливаемого ДФУ для реализуемых основных профессиональных образовательных программ по направлению подготовки 12.03.01 Приборостроение, уровня высшего образования (бакалавриат), введенного в действие приказом ректора ДФУ от 19.04.2016 № 12-13-718

Рабочая программа обсуждена на заседании кафедры Приборостроение  
протокол № 1 от « 28 » сентября \_\_\_\_\_ 2018 г.

Заведующий кафедрой профессор, д.ф.м.н. В.И. Короченцев

Составитель доцент, к.т.н. Е.Н. Сальникова

## Оборотная сторона титульного листа РПУД

### I. Рабочая программа пересмотрена на заседании кафедры:

Протокол от «\_\_» \_\_\_\_\_ г. № \_\_\_\_

Заведующий кафедрой \_\_\_\_\_ В.И.Короченцев  
(подпись) (и.о. фамилия)

### II. Рабочая программа пересмотрена на заседании кафедры:

Протокол от «\_\_\_\_\_» \_\_\_\_\_ № \_\_\_\_\_

Заведующий кафедрой \_\_\_\_\_ \_\_\_\_\_  
(подпись) (и.о. фамилия)

## АННОТАЦИЯ

Дисциплина «Электроакустические преобразователи» разработана для студентов, обучающихся по направлению подготовки 12.03.01 «Приборостроение», профиль «Акустические приборы и системы» и включена в состав обязательных дисциплин вариативной части блока 1 Дисциплины (модули) учебного плана.

Дисциплина реализуется в 6 семестре на 3 курсе. Общая трудоемкость освоения дисциплины «Электроакустические преобразователи» составляет 6 зачетных единиц (216 часов). Учебным планом предусмотрены лекционные занятия (36 часов), практические занятия (18 часов), лабораторные работы (18 часов), самостоятельная работа студента (117 часов), контроль (27 часов). Учебным планом предусмотрено выполнение курсовой работы и экзамен.

Электроакустические преобразователи являются начальным звеном всякого акустического тракта и окончательным элементом трактов радиовещания, звуковой индикации. Электроакустические преобразователи используются для создания и детектирования акустических полей при проведении ультразвуковой дефектоскопии, в медицине, при измерении шумов и вибраций и т.д.

Для освоения дисциплины необходимо знание высшей математики (линейная алгебра и аналитическая геометрия, дифференциальное и интегральное исчисления, элементы теории поля, дифференциальные уравнения, уравнения математической физики, функция комплексной переменной), физики (механика, электричество и магнетизм), теории колебательных и волновых процессов, информатики (алгоритмизация и программирование), физических основ получения информации, материаловедения, общей электротехники, акустики.

Дисциплина «Электроакустические преобразователи» является базовой при изучении таких специальных дисциплин, как «Гидроакустические

приборы и системы», «Неразрушающие методы контроля», «Шумо и виброзащита в приборостроении» и др.

### **Цели и задачи дисциплины**

Основная **цель** преподавания дисциплины - формирование знаний в области: принципов построения и конструктивного исполнения электроакустических преобразователей различного назначения, предназначенных для работы в различных физических средах при различных условиях.

### **Задачи дисциплины:**

изучить физические основы и принципы построения электроакустических преобразователей и аппаратуры,

овладеть методами анализа характеристик электроакустических преобразователей и оптимизации их характеристик,

научить использовать основные законы естественнонаучных дисциплин, применять методы математического анализа и моделирования, теоретического и экспериментального исследования параметров и характеристик электроакустических преобразователей.

Результаты освоения ООП определяются приобретаемыми выпускником компетенциями, т.е. его способностью применять знания, умения и личные качества в соответствии с задачами профессиональной деятельности.

Для успешного изучения дисциплины «Электроакустические преобразователи» у обучающихся должны быть сформированы следующие предварительные компетенции:

ОК-1: способность к обобщению, анализу, восприятию информации, постановке цели и выбору путей ее достижения, владение культурой мышления;

ОК-2: способность логически верно, аргументировано и ясно строить устную и письменную речь, создавать тексты профессионального назначения;

ПК-1: способность использовать основные законы естественнонаучных дисциплин в профессиональной деятельности, применять методы математического анализа и моделирования, теоретического и экспериментального исследования;

ПК-2: способность собирать и анализировать научно-техническую информацию, учитывать современные тенденции развития и использовать достижения отечественной и зарубежной науки, техники и технологии в профессиональной деятельности;

ПК-3: способность работать с информацией в глобальных компьютерных сетях;

ПК-4: способность проводить исследования, обрабатывать и представлять экспериментальные данные;

ПК-5: способность использовать системы стандартизации и сертификации, осознание значения метрологии в развитии техники и технологий;

ПК-6: способность применять современные программные средства для разработки и редакции проектно-конструкторской и технологической документации, владение элементами начертательной геометрии и инженерной графики.

После изучения данной дисциплины студенты должны **иметь представление** о тенденциях развития электроакустических приборов различного назначения;

**знать** физические закономерности и соотношения, характеризующие основу устройства и функционирования электроакустических преобразователей, использующих различные принципы действия, их физические и математические модели;

**владеть** методами расчета и проектирования электроакустических излучателей и приемников, работающих в различных условиях и средах;

**уметь** проводить экспериментальные исследования пьезоэлектрических преобразователей;

использовать стандартную терминологию , определения, обозначения и единицы физических величин.

**иметь опыт** учебного проектирования и конструирования приборов различной физической природы и различного назначения.

В результате изучения данной дисциплины у студентов формируются следующие общепрофессиональные и профессиональные компетенции:

Код и формулировка компетенции	Этапы формирования компетенции	
<b>ОПК-5</b> способность обрабатывать и представлять данные экспериментальных исследований	Знает	Методы измерения основных параметров и характеристик электроакустических преобразователей
	Умеет	Правильно выбрать средства измерения для контроля конкретных параметров и характеристик, грамотно их эксплуатировать
	Владеет	Методами математического моделирования электроакустических преобразователей, навыками обработки результатов измерений
<b>ПК-3</b> способность к проведению измерений и исследования различных объектов по заданной методике	Знает	Способы описания, основные характеристики и методы анализа электроакустических преобразователей
	Умеет	Применять теоретические знания и справочные данные для выбора средств измерительной техники
	Владеет	Навыками самостоятельного поиска информации, необходимой для анализа характеристик конкретных преобразователей

Для формирования вышеуказанных компетенций в рамках дисциплины «Электроакустические преобразователи» применяются следующие методы активного обучения: анализ конкретных ситуаций, «лекция-беседа», «групповая консультация», «выполнение и защита лабораторных работ», «выполнение и защита курсовой работы».

# **I. СТРУКТУРА И СОДЕРЖАНИЕ ТЕОРЕТИЧЕСКОЙ ЧАСТИ КУРСА (36 час.)**

## **МОДУЛЬ 1. Электроакустические преобразователи (22 час.)**

### **Раздел I. Физические принципы работы электроакустических преобразователей (16 час.)**

#### **Тема 1. Обратимые преобразователи индуктивного типа (8 час.)**

Области применения и классификация ЭАП. Индуктивные и емкостные преобразователи. Обратимые и необратимые преобразователи. Электродинамический преобразователь. Соотношение взаимности. Уравнения преобразователя. Основные характеристики. Анализ работы преобразователя в режиме излучения и приема. Электромагнитные преобразователи. Конструкции электромагнитных преобразователей. Линеаризация характеристик. Анализ работы преобразователя в режиме излучения и приема. Магнитострикционные преобразователи. Стержневые магнитострикционные преобразователи. Цилиндрические магнитострикционные преобразователи. Эквивалентные схемы. Анализ работы преобразователя в режиме излучения и приема.

#### **Тема 2. Обратимые преобразователи емкостного типа (8 час.)**

Электростатические преобразователи. Способы линеаризации характеристик. Уравнения, описывающие работу механической и электрической стороны преобразователя. Соотношение взаимности. Электретные преобразователи. Особенности конструкции. Анализ работы преобразователя в режиме излучения и приема. Пьезоэлектрические преобразователи. Пьезоэффект. Пьезоэлектрические материалы. Коэффициент электромеханической связи. Пульсирующее пьезоэлектрическое тонкое кольцо. Радиально симметричная мода колебаний тонкой сферической оболочки. Стержневой пьезоэлектрический преобразователь. Эквивалентные схемы преобразователей. Анализ работы

преобразователя в режиме излучения и приема. Частотные характеристики излучаемой мощности, чувствительности в режиме приема.

## **Раздел II. Общая теория ЭАП (6 час.)**

### **Тема 1. Электромеханические n- полюсники (2 час.)**

Энергетические соотношения в системе с n степенями свободы. Позиционные, инерциальные, гироскопические связи. Функция Лагранжа. Понятия об электромеханическом 4-х полюснике, 6-полюснике, n-полюснике. Обобщенные сопротивления. Коэффициенты преобразования. Обобщенные проводимости. Уравнения двухстороннего преобразователя, трехстороннего преобразователя. Правило знаков. Входное сопротивление системы. Чувствительность. КПД.

### **Тема 2. Электрические схемы- аналоги преобразователей (4 час.)**

Уравнения двухстороннего преобразователя индуктивного типа. Электромеханический гиратор и его свойства. Электромеханический псевдотрансформатор. Электрические схемы- аналоги преобразователей индуктивного типа. Правила пересчета сопротивлений. Уравнения двухстороннего преобразователя емкостного типа. Электромеханический трансформатор. Электрические схемы- аналоги преобразователей емкостного типа. Модифицированные схемы аналоги. Доказательство эквивалентности схем. Теорема об эквивалентном генераторе.

## **МОДУЛЬ 2. Электроакустическая аппаратура (14 час.)**

### **Раздел I. Приемники звука (8 час.)**

#### **Тема 1. Параметры и характеристики приемников звука (2 час.)**

Классификация и основные характеристики приемников звука. Индуктивные и емкостные приемники. Приемники давления, градиента давления и комбинированные. Ненаправленные приемники, направленные приемники, приемники с управляемыми характеристиками. Основные параметры: осевая чувствительность, стандартный уровень осевой чувствительности, характеристика направленности, коэффициент и индекс направленности, уровень собственного шума.

## **Тема 2. Направленные свойства приемников звука (2 час.)**

Акустическая характеристика. Направленные свойства приемников давления. Зависимость направленных свойств от формы приемника и от частоты, основные конструкции приемников давления индуктивного и емкостного типов. Направленные свойства приемника градиента давления в поле плоской волны и в поле сферической волны. Помехозащищенность приемника градиента давления. Основные конструкции приемников давления индуктивного и емкостного типов. Конденсаторный микрофон – приемник градиента давления и его характеристики направленности. Комбинированный приемник звука. Некоторые конструкции комбинированных приемников индуктивного и емкостного типов и возможность управления характеристикой направленности.

## **Тема 3. Частотные характеристики приемников звука (4 час.)**

Эквивалентные схемы индуктивного и емкостного приемников давления. Вывод и анализ выражений для чувствительности. Частотная характеристика чувствительности приемника давления. Рекомендации по выбору конструкции в зависимости от назначения приемника. Линеаризация характеристики. Конструктивные особенности Эквивалентные схемы индуктивного и емкостного приемников градиента давления. Частотная характеристика чувствительности приемника градиента давления. Работа приемника с электрической нагрузкой. Влияние параметров усилителя на частотные характеристики.

## **Раздел II. Излучатели звука (6 час.)**

### **Тема 1. Параметры и характеристики источников звука(2 час.)**

Классификация громкоговорителей: по способу электромеханического преобразования; по особенностям излучения звуковых колебаний; по классам качества и номинальной мощности; по полосе воспроизводимых частот; по областям применения. Особенности конструкций громкоговорителей. Технические характеристики по ГОСТ, IES; параметры Смолла-Тиле.

## **Тема 2. Электродинамические громкоговорители прямого действия и рупорные (2 час.)**

Способы акустического оформления электродинамических громкоговорителей. Анализ частотной характеристики входного электрического сопротивления. Влияние акустического оформления на частотные характеристики входного электрического сопротивления громкоговорителя. Анализ эквивалентных схем. Работа электродинамического громкоговорителя в области высоких частот. Нелинейные искажения.

Рупорные громкоговорители – особенности конструкций. Уравнения, описывающие работу рупорного электродинамического громкоговорителя. Анализ частотных зависимостей.

## **Тема 3. Электростатические громкоговорители (2 час.)**

Основные конструкции электростатических громкоговорителей и области их применения. Эквивалентные схемы. Направленные свойства. Анализ частотных зависимостей звукового давления. Способы улучшения частотных характеристик.

Тенденции развития современной электроакустической аппаратуры. Заключительный обзор материала дисциплины.

# **I. СТРУКТУРА И СОДЕРЖАНИЕ ПРАКТИЧЕСКОЙ ЧАСТИ КУРСА**

## **Практические занятия (18 час.)**

### **Занятие 1. Система электромеханических аналогий (2 час.)**

1. Сопоставление уравнений, описывающих свободные колебания в механических системах и электромагнитных контурах.
2. Уравнения, описывающие установившиеся вынужденные колебания в механических системах и электромагнитных контурах.
3. Первая и вторая системы электромеханических аналогий.
4. Аналогия переменных, параметров и сопротивлений.

5. Правила составления схем аналогов.

6. Решение задач

**Занятие 2. Расчет параметров и характеристик электродинамического излучателя (2 час.)**

1. Составление эквивалентной схемы преобразователя.

2. Упрощение схемы для частот, близких к резонансу.

3. Расчет параметров схемы.

4. Расчет частотной характеристики излучаемой акустической мощности.

5. Расчет КПД в режиме излучения.

6. Расчет чувствительности преобразователя в режиме приема.

7. Анализ частотной зависимости электрического сопротивления.

8. Рекомендации по применению преобразователя.

9. Оформление документации в соответствии со стандартами ЕСКД, ЕСТД,

**Занятие 3. Расчет КЭС для различных мод колебаний п/элементов (2 час.)**

1. Запись местных уравнений пьезоэффекта для заданной моды колебаний.

2. Учет вида обобщенной матрицы упругих, диэлектрических и пьезоэлектрических параметров заданного пьезоматериала.

3. Вывод выражения для КЭС тонкого стержневого пьезокерамического преобразователя, совершающего колебания по длине, в поле, перпендикулярном длине.

4. Вывод выражения для КЭС тонкого стержневого пьезокерамического преобразователя, совершающего колебания по длине, в поле, параллельном длине.

5. Вывод выражения для КЭС тонкой пьезокерамической пластины, совершающей колебания по длине, в поле, параллельном толщине.

6. КЭС тонкого радиально поляризованного цилиндрического пьезокерамического пульсирующего преобразователя

**Занятие 4. Пьезоэлектрический цилиндрический преобразователь (2 час.)**

1. Постановка задачи.
  2. Построение эквивалентной схемы.
  3. Упрощение схемы для частоты механического резонанса.
  4. Вывод выражения для максимальной излучаемой акустической мощности.
  5. Выбор пьезоматериала для наиболее эффективной работы преобразователя на частоте механического резонанса.
  6. Расчет геометрических параметров преобразователя.
  7. Расчет параметров эквивалентной схемы и частотных характеристик.
- Анализ полученных данных.

**Занятие 5. Расчет параметров пьезоэлектрической пластины. Построение схемы-аналога. Анализ частотных характеристик. (2 час.)**

1. Постановка задачи.
  2. Построение эквивалентной схемы.
  3. Упрощение схемы для частот вблизи резонанса, на частоте механического резонанса.
  4. Вывод выражения для максимальной чувствительности в режиме приема
  5. Выбор пьезоматериала для наиболее эффективной работы преобразователя на частоте электромеханического резонанса.
  6. Расчет геометрических параметров преобразователя.
  7. Расчет параметров эквивалентной схемы и частотных характеристик.
- Анализ полученных данных.

**Занятие 6. Расчет параметров и характеристик реальных п/элементов. Учет элементов конструкций (2 час.)**

1. Расчет резонансного размера пьезоэлемента.

2. Расчет остальных геометрических параметров
3. Учет накладок, согласующих слоев и демпфера на эквивалентных схемах.
4. Анализ частотных характеристик преобразователя с учетом реальных элементов конструкции
5. Оформление документации в соответствии со стандартами ЕСКД, ЕСТД,

### **Занятие 7. Расчет параметров и характеристик конденсаторного микрофона (2 час.)**

1. Конструкции конденсаторных микрофонов.
2. Эквивалентные схемы конденсаторного микрофона – приемника давления
3. Расчет параметров схемы. Упрощения и допущения.
4. Расчет частотной характеристики чувствительности.
5. Анализ частотной характеристики и выработка рекомендаций по корректировке параметров.

### **Занятие 8. Определение входного электрического сопротивления и КПД электродинамического громкоговорителя (2 час.)**

1. Конструкция ЭДП громкоговорителя.
2. Эквивалентная схема преобразователя в режиме излучения на низких, средних и высоких частотах.
3. Учет акустического оформления на схеме для области низких и средних частот.
4. Анализ выражения для частотной характеристики входного электрического сопротивления громкоговорителя.
5. Анализ выражения для частотной характеристики КПД громкоговорителя.
6. Способы улучшения работы громкоговорителя на высоких частотах.

### **Занятие 9. Контроль степени формирования компетенций ОПК-5, ПК-3 (2 час.).**

1. Выступления студентов с презентациями на выбранные темы.
2. Анализ и обсуждение выступлений.

### **Лабораторные занятия (18 час.)**

Лабораторные занятия проводятся с целью закрепления знаний, полученных при изучении теоретической и практической частей курса.

#### **Лабораторная работа 1. Определение параметров пьезокерамических стержней и дисков. (4 час.)**

Цель работы: освоение стандартной методики измерения параметров пьезокерамических элементов в динамическом режиме (по измерению частот резонанса и антирезонанса). Измерение частот резонанса и антирезонанса для заданных пьезоэлементов. Определение упругих, диэлектрических и пьезоэлектрических констант пьезоматериала.

#### **Лабораторная работа 2. Определение параметров пьезоэлектрических пластин (4 час.).**

Цель работы: освоение стандартной методики измерения параметров пьезокерамических элементов в динамическом режиме. Измерение частотной характеристики проводимости заданных пьезоэлементов вблизи частоты резонанса. Построение круговой диаграммы полной проводимости преобразователя. Определение эквивалентных параметров преобразователя, упругих, диэлектрических и пьезоэлектрических констант пьезоматериала.

#### **Лабораторная работа 3. Исследование работы электродинамического вибровозбудителя (4 час.).**

Цель работы: изучение работы электродинамического преобразователя в режиме излучения. Изучение особенностей конструкции. Определение частотных характеристик виброускорения. Приобретение навыков проведения акустических измерений.

#### **Лабораторная работа 4. Акустическое оформление громкоговорителей (4 час.).**

**Цель работы:** исследование влияния акустического оформления (плоский экран конечного размера; ящик с открытой задней стенкой, ящик с закрытой задней стенкой, фазоинвертор, лабиринт) на частотные характеристики громкоговорителя на низких частотах. Определение частот механического и электромеханического резонансов. Определение параметров преобразователя по результатам измерений.

#### **Итоговое занятие (2 час.)**

**Цель занятия:** подведение итогов формирования компетенций ПК-3, ОПК-5.

Защита отчетов по лабораторным работам как метод активного обучения.

## **6. УЧЕБНО-МЕТОДИЧЕСКОЕ ОБЕСПЕЧЕНИЕ САМОСТОЯТЕЛЬНОЙ РАБОТЫ ОБУЧАЮЩИХСЯ**

Учебно-методическое обеспечение самостоятельной работы обучающихся по дисциплине «Электроакустические преобразователи» представлено в Приложении 1 и включает в себя:

план-график выполнения самостоятельной работы по дисциплине, в том числе примерные нормы времени на выполнение по каждому заданию;

характеристика заданий для самостоятельной работы студентов и методические рекомендации по их выполнению;

требования к содержанию и оформлению курсовой работы;

критерии оценки курсовой работы;

требования к представлению и оформлению результатов самостоятельной работы;

критерии оценки выполнения самостоятельной работы.

## **7. КОНТРОЛЬ ДОСТИЖЕНИЯ ЦЕЛЕЙ КУРСА**

№ п/п	Контролируемые модули/разделы / темы дисциплины	Коды и этапы формирования компетенций	Оценочные средства – наименование	
			текущий контроль	промежуточная аттестация
1	Модуль 1	ОПК-5: способность обрабатывать и представлять данные экспериментальных исследований ПК-3: способность к проведению измерений и исследованию различных объектов по заданной методике	3, 5, 7, 9, 11 недели – блиц-опрос на лекции (УО), 2,4,6,8,10 недели контроль выполнения ИДЗ, 16 неделя – защита реферата (Приложение 1)	Экзамен Вопросы 1,2,5-7,12-26, 29,30, 32-37,41,42, 44-47,49-52,54,57
2	Модуль 2	ОПК-5: способность обрабатывать и представлять данные экспериментальных исследований ПК-3: способность к проведению измерений и исследованию различных объектов по заданной методике	13, 14, 15, недели – блиц-опрос на лекции (УО), 12, 14, 16 недели - контроль выполнения ИДЗ, 17 неделя – презентации, подготовленные студентами (Приложение 1)	Экзамен Вопросы 3,4,10,11,27,28,31,38-40,43,53,55, 56
3	Модули 1,2	ОПК-5: способность обрабатывать и представлять данные экспериментальных исследований ПК-3: способность к проведению измерений и исследованию различных объектов по заданной методике	Выполнение курсовой работы 1-16 недели	Защита курсовой работы
4	Модули 1,2	ОПК-5: способность обрабатывать и представлять данные экспериментальных исследований ПК-3: способность к проведению измерений и исследованию различных объектов по заданной методике	Защита лабораторных работ	Экзамен Вопросы 22-25,32,37

Контрольные и методические материалы, а также критерии и показатели, необходимые для оценки знаний, умений, навыков и характеризующие этапы формирования компетенций в процессе освоения образовательной программы представлены в Приложении 2.

## **8. СПИСОК УЧЕБНОЙ ЛИТЕРАТУРЫ И ИНФОРМАЦИОННО-МЕТОДИЧЕСКОЕ ОБЕСПЕЧЕНИЕ ДИСЦИПЛИНЫ**

### **Основная литература**

1. Электроакустические преобразователи [Электронный ресурс]/ В.М. Шарапов [и др.].— Электрон. текстовые данные.— М.: Техносфера, 2013.— 296 с.— Режим доступа: <http://www.iprbookshop.ru/31881>.— ЭБС «IPRbooks», по паролю <http://www.iprbookshop.ru/31881.html>; <http://lib.dvfu.ru:8080/lib/item?id=chamo:790284&theme=FEFU> (5 экз.)

2. Сальникова, Е.Н. Акустические системы: учеб.пособие/ Е.Н.Сальникова, Л.Г. Стаценко; М: Проспект, 2015.-101с. <http://lib.dvfu.ru:8080/lib/item?id=chamo:791171&theme=FEFU> (5 экз.)

3. Электроакустические преобразователи [Электронный ресурс] / В.М. Шарапов [и др.] ; под ред. В.М. Шарапова. — Электрон. дан. — Москва: Техносфера, 2013. — 296 с. — Режим доступа: <https://e.lanbook.com/book/73543>. — Загл. с экрана

4. Шарапов В.М., Полищук Е.С., Кошевой Н.Д., Ишанин Г.Г., Минаев И.Г., Совлуков А.С. Датчики: справочник. - М.:Техносфера, 2012 -624с. Датчики [Электронный ресурс]: справочное пособие/ В.М. Шарапов [и др.].— Электрон. текстовые данные.— М.: Техносфера, 2012.— 624 с.— Режим доступа: <http://www.iprbookshop.ru/16974>.— ЭБС «IPRbooks», по паролю

<http://lib.dvfu.ru:8080/lib/item?id=chamo:790379&theme=FEFU> (3 экз.)

5. В.М.Шарапов, М.П.Мусиенко, Е.В.Шарапова. Пьезоэлектрические датчики /Под ред. В.М.Шарапова. –М.: Техносфера, 2006. – 632с.

<http://lib.dvfu.ru:8080/lib/item?id=chamo:357662&theme=FEFU>. (5 экз.)

6. Дж. Фрайден. Современные датчики. Справочник. М.: Техносфера, 2006. — 592с.

<http://lib.dvfu.ru:8080/lib/item?id=chamo:391340&theme=FEFU> (5 экз.)

7. Русанов, В.В. Микропроцессорные устройства и системы [Электронный ресурс] : учебное пособие / В.В. Русанов, М.Ю. Шевелев. — Электрон. дан. — Москва : ТУСУР, 2012. — 184 с. — Режим доступа: <https://e.lanbook.com/book/10931>. — Загл. с экрана.

8. Сонькин, М.А. Микропроцессорные системы. Применение микроконтроллеров семейства AVR для управления внешними устройствами [Электронный ресурс] : учебное пособие / М.А.

9. Сонькин, Д.М. Сонькин, А.А. Шамин. — Электрон. дан. — Томск : ТПУ, 2016. — 88 с. — Режим доступа: <https://e.lanbook.com/book/107726> Загл. с экрана

### Дополнительная литература

1. Г.М.Свердлин. Гидроакустические преобразователи и антенны. Л.: Судостроение.-1988.

2. Радиовещание и электроакустика: Учебник / Под ред. М.В.Гитлица.- М.: Радио и связь.- 1989.

3. Фурдуев В.В. Акустические основы вещания.- М., 1960.

4. Сапожков М.А. Звукофикация помещений. —М.:Связь.-1978.

5. Катунин Г.Л., Оболонин И.А. Магнитная запись звуковых сигналов: Учебное пособие./НЭИС, Новосибирск.-1993

6. М.А.Сапожков. Электроакустика.М.,Связь.-1978

А.В.Римский-Корсаков. Электроакустика.-М.: Связь.-1973.

7. Физическая акустика. Под/ред.У.Мэзона, т.1.ч.А., Мир.-1966.

8. Ультразвуковые преобразователи. Под/ред.Е.Кикучи .М., Мир.-1972.

9. В.А.Харкевич. Общая теория преобразователей.М., Наука. —1976.

10. Акустические подводные низкочастотные излучатели. А.В.Римский-Корсаков, В.С.Ямщиков, В.Н., Жулин В.И.,Рехман. Л.,Судостроение.-1984.
11. Г.М.Свердлин. Прикладная гидроакустика. Л.: Судостроение. –1990.
12. А.В.Харитонов. Теория электроакустических преобразователей. Учебное пособие.-Л.:ЛЭТИ.-1978.
13. Пьезокерамические преобразователи. Справочник. Под ред. С.И. Пугачева, Л.: Судостроение. –1984.
14. Подводные электроакустические преобразователи. Под ред. В.В. Богородицкого. Л.: Судостроение.-1984.
15. Справочник по гидроакустике. Под ред. Колесникова А.Е. Л.: Судостроение.-1984.
16. Убанский Б. Электроакустика в вопросах и ответах.-М.:Радио и связь, 1981.
17. Анерт В., Райхард В. Основы техники звукоусиления.-М.:Радио и связь, 1984.
18. Иофе В.К. и др. Справочник по акустике.- М.:Связь, 1979.
19. Ефимов А.Л., Никонов А.В. Акустика. Справочник.-М.:Радио и связь.-1989
20. Сидоров И.Н., Димитров А.А. Микрофоны и телефоны. Справочник.- М.: Радио и связь.-1993.
21. Методические указания к лабораторным работам для студентов специальности 1904. Изд-во ДВГТУ.
22. Г.М. Свердлин. Гидроакустические преобразователи и антенны. Л.:Судостроение.-1988.
23. Методические указания по выполнению курсовой работы для студентов специальности 1904. Изд-во ДВГТУ.
24. Бытовая электроакустическая аппаратура: Справочник/ И.А.Алдошина, В.Б.Бревдо, Г.Н.Веселов.-М.: КубК.-1996.
25. Акустика: Справочник./М.А.Сапожков, В.И.Шоров и др., М.: Радио и связь. – 1989.

26. Сальникова Е.Н. Методические указания по выполнению курсовой работы. Владивосток, изд-во ДВГТУ, 2008.-48 с.

27. Сальникова Е.Н. Методические указания по выполнению лабораторных работ. Владивосток, изд-во ДВГТУ, 2008.-48 с.

28. Журнал Приборы и техника эксперимента.  
[http://elibrary.ru/title\\_about.asp?id=7954](http://elibrary.ru/title_about.asp?id=7954)

29. [Акустика : учебник для вузов / Ш. Я. Вахитов, Ю. А. Ковалгин, А. А. Фадеев \[и др.\] ; под ред. Ю. А. Ковалгина.](#)

30 Радиовещание и электроакустика: Учебное пособие для вузов/ С.И.Алябьев и др.-М., 2010.

31 Джежора А.А. Электроемкостные преобразователи и методы их расчета [Электронный ресурс]: монография/ Джежора А.А.— Электрон. текстовые данные.— Минск: Белорусская наука, 2007.— 351 с.— Режим доступа: <http://www.iprbookshop.ru/10087>.— ЭБС «IPRbooks», по паролю <http://www.iprbookshop.ru/10087.html>

### Нормативно-правовые материалы

1. ГОСТ 2.102-2013 Единая система конструкторской документации. Виды и комплектность конструкторских документов;

2. ГОСТ 2.103-2013 Единая система конструкторской документации. Стадии разработки

### Перечень информационных технологий и программного обеспечения

Программное обеспечение, доступное студентам для выполнения задания по дисциплине, а также для организации самостоятельной работы:

Место расположения компьютерной техники, на котором установлено программное обеспечение, количество рабочих мест	Перечень программного обеспечения
Компьютерный класс кафедры приборостроения, Ауд. Е628,	– Microsoft Office Professional Plus 2016 – офисный пакет, включающий программное обеспечение для работы с различными типами документов;

21	<ul style="list-style-type: none"> <li>– 7Zip 9.20 - свободный файловый архиватор с высокой степенью сжатия данных;</li> <li>– ABBYY FineReader 11 - программа для оптического распознавания символов;</li> <li>– Elcut 6.3 Student - программа для проведения инженерного анализа и двумерного моделирования методом конечных элементов (МКЭ);</li> <li>– Adobe Acrobat XI Pro – пакет программ для создания и просмотра электронных публикаций в формате PDF;</li> <li>– AutoCAD Electrical 2015 Language Pack – English - трёхмерная система автоматизированного проектирования и черчения;</li> <li>– MATLAB R2016a - пакет прикладных программ для решения задач технических вычислений и одноимённый язык программирования, используемый в этом пакете</li> </ul>
----	---

## 5. МЕТОДИЧЕСКИЕ УКАЗАНИЯ ПО ОСВОЕНИЮ ДИСЦИПЛИНЫ

На изучение дисциплины отводится 72 часа аудиторных занятий и 117 часов самостоятельной работы.

На лекциях преподаватель объясняет теоретический материал. Изложение материала направлено на формирование общекультурных и профессиональных компетенций. На практических занятиях преподаватель дает методики расчёта параметров и характеристик преобразователей. Во второй части практического занятия студентам предлагается работать самостоятельно, выполняя численные расчеты параметров и характеристик электроакустических преобразователей, а также оформляя ряд документов. Преподаватель контролирует работу студентов, отвечает на возникающие вопросы, подсказывает ход и метод решения. Если полученных в аудитории знаний окажется недостаточно, студент может самостоятельно повторно прочесть лекцию или соответствующее пособие, просмотреть практикум с разобранными примерами.

Выполнение лабораторных работ способствует повышению степени формирования профессиональных компетенций ПК-3: способность проводить исследования, обрабатывать и представлять экспериментальные данные.

В рамках самостоятельного выполнения курсовой работы студенты предъявляют степень формирования профессиональной компетенции ПК-3: способность рассчитывать и проектировать элементы и устройства, основанные на различных физических принципах действия; и общепрофессиональной компетенции ОПК-5: способность обрабатывать и представлять данные экспериментальных исследований.

По данной дисциплине разработаны учебные пособия, которые доступны в фондах НБ ДВФУ в соответствующем разделе.

## 6. МАТЕРИАЛЬНО-ТЕХНИЧЕСКОЕ ОБЕСПЕЧЕНИЕ ДИСЦИПЛИНЫ

В специализированной лаборатории «Электроакустические преобразователи» ауд. Е629 установлено мультимедийное оборудование, стенды для выполнения лабораторных работ по дисциплине «Электроакустические преобразователи», а также плакаты и слайды, образцы и макеты электроакустической аппаратуры.

Для проведения исследований, связанных с выполнением задания по дисциплине, а также для организации самостоятельной работы студентам доступно следующее лабораторное оборудование и специализированные кабинеты, соответствующие действующим санитарным и противопожарным нормам, а также требованиям техники безопасности при проведении учебных и научно-производственных работ:

<b>Наименование оборудованных помещений и помещений для самостоятельной работы</b>	<b>Перечень основного оборудования</b>
Лаборатория электроакустических преобразователей кафедры приборостроения, ауд. Е 629	Частотомер Ф-551А; частотомер ЧЗ-34; Частотомер ЧЗ-32; Шумомер 00024; Генератор ГЗ-33, милливольтметр Ноутбук Lenovo ThinkPad X121e Black 11.6" HD(1366x768) AMD E300.2GB DDR3.320GB
Лаборатория Вычислительной техники кафедры приборостроения, ауд. Е 628	Частотомер ЧЗ-54; Прибор С1-76; Комплект оборудования №1; Лабораторный комплект основ разработки инженерных

	приложений и систем сбора данных NI USB-DAQ Bundle X-series; Учебно-исследовательский комплекс модульных приборов NI Modular Instruments Kit
Компьютерный класс, Ауд. Е628	Моноблок HP ProOne 400 All-in-One 19,5 (1600x900), Core i3-4150T, 4GB DDR3-1600 (1x4GB), 1TB HDD 7200 SATA, DVD+/-RW,GigEth,Wi-Fi,BT,usb kbd/mse,Win7Pro (64-bit)+Win8.1Pro(64-bit),1-1-1 Wty
Читальные залы Научной библиотеки ДВФУ с открытым доступом к фонду (корпус А - уровень 10)	Моноблок HP ProOne 400 All-in-One 19,5 (1600x900), Core i3-4150T, 4GB DDR3-1600 (1x4GB), 1TB HDD 7200 SATA, DVD+/-RW,GigEth,Wi-Fi,BT,usb kbd/mse,Win7Pro (64-bit)+Win8.1Pro(64-bit),1-1-1 Wty Скорость доступа в Интернет 500 Мбит/сек.
Мультимедийная аудитория	проектор 3-chip DLP, 10 600 ANSI-лм, WUXGA 1 920x1 200 (16:10) PT-DZ110XE Panasonic; экран 316x500 см, 16:10 с эл. приводом; крепление настенно-потолочное Elpro Large Electrol Projecta; профессиональная ЖК-панель 47", 500 Кд/м2, Full HD M4716CCBA LG; подсистема видеоисточников документ-камера CP355AF Avervision; подсистема видеокоммутации; подсистема аудиокоммутации и звукоусиления; подсистема интерактивного управления; беспроводные ЛВС обеспечены системой на базе точек доступа 802.11a/b/g/n 2x2 MIMO(2SS)



МИНИСТЕРСТВО ОБРАЗОВАНИЯ И НАУКИ РОССИЙСКОЙ ФЕДЕРАЦИИ  
Федеральное государственное автономное образовательное учреждение высшего образования  
**«Дальневосточный федеральный университет»**  
(ДФУ)

---

**ИНЖЕНЕРНАЯ ШКОЛА**

**УЧЕБНО-МЕТОДИЧЕСКОЕ ОБЕСПЕЧЕНИЕ САМОСТОЯТЕЛЬНОЙ  
РАБОТЫ ОБУЧАЮЩИХСЯ**

**по дисциплине «Электроакустические преобразователи»**

**Направление подготовки – 12.03.01 Приборостроение  
профиль «Акустические приборы и системы»**

**Форма подготовки очная**

**Владивосток**

**2018**

## План- график выполнения самостоятельной работы по дисциплине

№ п/п, тема работы	Дата/сроки выполнения	Вид СРС	Примерные нормы времени на выполнение	Форма контроля
Условие ограничения U0	Первая неделя семестра	ВАВ	0,5 час.	К, УО
Входное сопротивление ЭСП и ЭДП в заданном режиме работы	Вторая неделя семестра	ВАВ	0,5 час.	К, УО
Выполнение курсовой работы	Вторая-пятнадцатая неделя семестра	КР	16 час.	ЗКР
Лабораторная работа «Определение параметров пьезокерамических стержней и дисков»	третья неделя семестра	ПЗЛР	1 час.	ЗЛР
Лабораторная работа «Определение параметров пьезоэлектрических пластин»	Пятая неделя семестра	ПЗЛР	1 час.	ЗЛР
Лабораторная работа «Исследование работы электродинамического вибровозбудителя»	Седьмая неделя семестра	ПЗЛР	1 час.	ЗЛР
Лабораторная работа «Акустическое оформление громкоговорителей»	Девятая неделя семестра	ПЗЛР	1 час.	ЗЛР
ЕСКД	Первая неделя - восьмая неделя	ИД	2 час.	К, УО
ЕСТД	Девятая неделя— четырнадцатая неделя	ИД	2 час	К, УО
ЕСТПП	Пятнадцатая неделя- восемнадцатая неделя	ИД	2 час	К, УО
Подготовка к экзамену	сессия		9 час	Э

Принятые обозначения: К-конспект, УО- устный опрос, ЗКР- защита курсовой работы, ПЗЛР-подготовка к выполнению и защите, оформление лабораторной работы, ЗЛР- защита лабораторной работы, ЧР- численный расчет, ВАВ -вывод и анализ выражения, СОП- участие в игре «спроси, ответь, проверь», ИД- изучение документации, Э- экзамен.

### **Характеристика заданий для самостоятельной работы студентов**

В процессе изучения курса “Электроакустические преобразователи и аппаратура” студентам даются на самостоятельную проработку несколько тем, дополняющих лекционный курс. При выполнении индивидуальных заданий студенты должны найти и изучить дополнительную литературу, справочные материалы. В ходе обучения в семестре проводятся контрольные работы по основным разделам курса. По окончании семестра студенты должны подготовиться к экзамену.

Некоторые примеры заданий для ИДЗ приведены ниже.

1. Вывод и анализ условия ограничения максимальной величины поляризующего напряжения линеаризованного электростатического преобразователя, конструктивные ограничения.

2. Вывод и анализ условия линеаризации электромагнитного преобразователя. Анализ возможных конструктивных схем.

3. Вывод и анализ выражений для входного электрического (механического) сопротивлений электродинамического, электромагнитного, электростатического, пьезоэлектрического, магнитострикционного преобразователя в рабочем режиме. Определение основных параметров и характеристик.

Текущий контроль производится путем проведения контрольных работ (КР), оценки качества выполненных индивидуальных заданий. Контрольная работа представляет собою перечень вопросов по тематике изученного раздела, на который студенты отвечают письменно. Вопросы для контрольных работ

предоставляются студентам заранее. Разработаны тесты и вопросы для контрольных опросов по каждой теме

По дисциплине учебным планом предусмотрен экзамен в 6 семестре, которые сдают все студенты вне зависимости от рейтинга по результатам текущего контроля. К экзамену допускаются студенты, выполнившие и защитившие индивидуальные домашние задания. Экзамен проводится в письменной форме. Примеры экзаменационных вопросов прилагаются. Студентам доступен перечень вопросов, включаемых в экзаменационные билеты.

Рабочий учебный план предусматривает выполнение курсовой работы по теме «Частотные характеристики преобразователя заданного типа и заданного назначения». Курсовая работа предназначена для углубления и закрепления вопросов, изучаемых в теоретической и практической частях курса, а также вопросов, связанных с расчетом и анализом характеристик ЭАП. Эти вопросы являются наиболее важными при практическом применении знаний, получаемых при изучении данного курса.

Курсовая работа состоит из следующих разделов:

- выбор и обоснование типа электромеханического преобразования, материалов и вида колебательной системы;
- выбор и построение схемы-аналога;
- выработка алгоритма, составление и отладка программы расчета частотных характеристик ЭАП;
- анализ работы преобразователя разработанной конструкции;
- анализ влияния на частотные характеристики конструктивных элементов преобразователя, оптимизация частотных характеристик;
- сравнение частотных характеристик преобразователей различных конструкций;
- выводы.

Пояснительная записка включает введение, исходные данные, краткое изложение основных вопросов теории, вывод и обоснование

необходимых расчетных соотношений, описание методики расчета параметров и характеристик ЭАП, программу для ЭВМ и результаты расчета ЧХ, анализ расчетов и выводы, список использованной литературы. В качестве графической части материала представляются эскизы преобразователей и графики частотных зависимостей.

Список дополнительных вопросов по темам для самостоятельного изучения

1. Сирены и свистки как примеры необратимых излучателей звука.
2. Гидропневматический излучатель.
3. Гидравлично-поршневой акустический излучатель.
4. Электродинамический вибровозбудитель.
5. Взрывные импульсные источники звука в воде.
6. Импульсный электродинамический излучатель.
7. Аппаратура для воспроизведения граммзаписи.
8. Технология магнитной звукозаписи.
9. Стереограммофонная запись.
10. Оптическая запись звука.
11. Цифровая запись акустических сигналов.
12. Магнитная запись с высокочастотным подмагничиванием.
13. Структура записи и воспроизведения звука. Основные принципы и методы записи. Искажения при записи и воспроизведении звука.
14. Конструкции современных звукозаписывающих устройств.

Каждому студенту предоставляется возможность выбора темы для подготовки реферата и выступления с сообщением на студенческой конференции, проводимой кафедрой Приборостроения ежегодно в апреле – мае. Выступление с докладом на конференции позволяет студенту получить дополнительные баллы при балльно-рейтинговой системе оценки знаний.

## **Требования к выполнению, оформлению и защите лабораторной работы**

В течение семестра студенты выполняют четыре лабораторные работы. Все работы выполняются бригадами из 2-3 человек. Каждая работа рассчитана на 4 часа.

На первом занятии студенты знакомятся с правилами техники безопасности и поведения в лаборатории и с порядком выполнения лабораторных работ. Помните, что напряжение переменного и постоянного тока свыше 36 В является опасным для жизни. Перед началом работы следует проверить наличие и исправность защитного заземления или зануления приборов. Работа с электрическими схемами (подсоединении элементов, замена деталей, пайка) должна производиться при обесточенной установке. Приборы установки следует располагать так, чтобы при чтении их показаний исключалось опасное приближение к частям, находящимся под током. Перед началом каждого лабораторного занятия студенты должны пройти инструктаж по ТБ и расписаться в соответствующем журнале. Фамилия, имя и отчество пишутся полностью, без сокращений.

Перед каждым занятием студенты должны изучить теоретические основы работы, уяснить цель, содержание и порядок выполнения работы, заготовить формы таблиц измеряемых величин. В начале каждого занятия преподаватель проверяет готовность студентов к выполнению лабораторной работы в объеме контрольных вопросов, изложенных в конце описания каждой работы. Неподготовленные студенты к выполнению лабораторной работы не допускаются.

Включение лабораторных установок допускается только с разрешения преподавателя. В течение семестра в лаборатории проводятся несколько циклов лабораторных практикумов для студентов разных курсов обучения и разных образовательных программ. В связи с этим не разрешается включать и переносить приборы, не относящиеся к данной лабораторной установке, без разрешения преподавателя. После выполнения работы студенты

предъявляют преподавателю протоколы экспериментов для проверки, выключают установку и сдают рабочее место. Подписанные преподавателем протоколы прилагаются к отчету.

Отчеты оформляются каждой бригадой на листах формата А4 и предъявляются преподавателю в сброшюрованном виде. На титульном листе отчета должны быть указаны название вуза, института, кафедры, номер и название лабораторной работы, фамилии и инициалы студентов, выполнявших работу, их подписи, а также фамилия и инициалы преподавателя. В отчете приводятся краткие теоретические сведения, цель работы, описание лабораторной установки, схема, расчетные формулы и результаты измерений и расчетов. Обязательным элементом отчета должны быть выводы по проделанной работе. Оформление отчетов следует производить в соответствии с правилами оформления текстовых документов в ДВФУ.

Защита выполненных и оформленных работ проводится в виде индивидуального собеседования по её содержанию. Студенты, не получившие зачета по двум лабораторным работам, к выполнению последующих работ не допускаются. При балльно-рейтинговой системе контроля за своевременное выполнение, оформление и защиту лабораторной работы студент получает 5 баллов



МИНИСТЕРСТВО ОБРАЗОВАНИЯ И НАУКИ РОССИЙСКОЙ  
ФЕДЕРАЦИИ

Федеральное государственное автономное образовательное учреждение высшего образования

«Дальневосточный федеральный университет»

(ДФУ)

---

ИНЖЕНЕРНАЯ ШКОЛА

**ФОНД ОЦЕНОЧНЫХ СРЕДСТВ**

по дисциплине «Электроакустические преобразователи»

Направление подготовки – 12.03.01.»Приборостроение»

профиль «Акустические приборы и системы»

**Форма подготовки**

Владивосток

2018

## Паспорт ФОС

Код и формулировка компетенции	Этапы формирования компетенции	
<b>ОПК-5</b> способность обрабатывать и представлять данные экспериментальных исследований	Знает	Методы измерения основных параметров и характеристик электроакустических преобразователей
	Умеет	Правильно выбрать средства измерения для контроля конкретных параметров и характеристик, грамотно их эксплуатировать
	Владеет	Методами математического моделирования электроакустических преобразователей, навыками обработки результатов измерений
<b>ПК-3</b> способность к проведению измерений и исследования различных объектов по заданной методике	Знает	Способы описания, основные характеристики и методы анализа электроакустических преобразователей
	Умеет	Применять теоретические знания и справочные данные для выбора средств измерительной техники
	Владеет	Навыками самостоятельного поиска информации, необходимой для анализа характеристик конкретных преобразователей

№ п/п	Контролируемые модули/разделы / темы дисциплины	Коды и этапы формирования компетенций	Оценочные средства – наименование	
			текущий контроль	промежуточная аттестация
1	Модуль 1	ОПК-5: способность обрабатывать и представлять данные экспериментальных исследований ПК-3: способность к проведению измерений и исследованию различных объектов по заданной методике	3, 5, 7, 9, 11 недели – блиц-опрос на лекции (УО), 2,4,6,8,10 недели контроль выполнения ИДЗ, 16 неделя – защита реферата (Приложение 1)	Экзамен Вопросы 1,2,5-7,12-26, 29,30, 32-37,41,42, 44-47,49-52,54,57
2	Модуль 2	ОПК-5: способность обрабатывать и представлять данные	13, 14, 15, недели – блиц-опрос на лекции (УО), 12, 14,	Экзамен Вопросы 3,4,10,11,27,2

		экспериментальных исследований ПК-3: способность к проведению измерений и исследованию различных объектов по заданной методике	16 недели - контроль выполнения ИДЗ, 17 неделя - презентации, подготовленные студентами (Приложение 1)	8,31,38-40,43,53,55,56
3	Модули 1,2	ОПК-5: способность обрабатывать и представлять данные экспериментальных исследований ПК-3: способность к проведению измерений и исследованию различных объектов по заданной методике	Выполнение курсовой работы 1-16 недели	Защита курсовой работы
4	Модули 1,2	ОПК-5: способность обрабатывать и представлять данные экспериментальных исследований ПК-3: способность к проведению измерений и исследованию различных объектов по заданной методике	Защита лабораторных работ	Экзамен Вопросы 22-25,32,37

### Шкала оценивания уровня сформированности компетенций

Код и формулировка компетенции	Этапы формирования компетенции		критерии	показатели
<b>ОПК-5</b> способность обрабатывать и представлять данные экспериментальных исследований	Знает	Методы измерения основных параметров и характеристик электроакустических преобразователей	Знание основных методов и методик измерения параметров ЭАП	Знание соответствующих ГОСТ и др. нормативных документов
	Умеет	Правильно выбрать средства измерения для контроля конкретных параметров и	Умение разработать методику проведения параметров для конкретного ЭАП	Умение провести экспериментальное исследование

		характеристик, грамотно их эксплуатировать		
	Владеет	Методами математического моделирования электроакустических преобразователей, навыками обработки результатов измерений	Владение навыками обработки результатов эксперимента	Владение руководством по неопределенности измерения, расчет неопределенности и правильная интерпретация результатов эксперимента
<b>ПК-3</b> способность к проведению измерений и исследования различных объектов по заданной методике	Знает	Способы описания, основные характеристики и методы анализа электроакустических преобразователей	Знание нормативной базы и стандартных методик исследования	
	Умеет	Применять теоретические знания и справочные данные для выбора средств измерительной техники	Умение разработать методику проведения параметров для конкретного ЭАП	Умение провести экспериментальное исследование
	Владеет	Навыками самостоятельного поиска информации, необходимой для анализа характеристик конкретных преобразователей	Владение навыками обработки результатов эксперимента	Способен разработать методику проведения измерения, выполнить эксперимент, обработать результаты, провести анализ и дать рекомендации по оптимизации параметров

**Методические рекомендации, определяющие процедуры оценивания результатов освоения дисциплины**

**Оценочные средства для промежуточной аттестации**  
**Перечень вопросов, выносимых на экзамен по дисциплине**

1. Вывод и анализ выражения для входного электрического сопротивления электростатического преобразователя в рабочем режиме (при заданной нагрузке).
2. Вывод и анализ выражения для входного механического сопротивления электродинамического громкоговорителя.
3. Эквивалентные схемы электростатических микрофонов-приемников давления и градиента давления. Смысл всех параметров схем. Анализ работы преобразователей.
4. Конструкции электростатических приемника давления, градиента давления и комбинированного приемника. Методы сглаживания частотных характеристик.
5. Вывод выражения для условия линеаризации электростатического преобразователя. Чем ограничено максимальное значение напряжения поляризации?
6. Уравнения, конструктивные схемы и работа электростатического преобразователя.
7. Уравнения, конструктивные схемы и работа электродинамического преобразователя.
8. Конструкции электродинамических приемника давления, градиента давления и комбинированного приемника. Методы сглаживания частотных характеристик.
9. Вывод и анализ выражения КПД электродинамического громкоговорителя в рабочем режиме.
10. Вывод и анализ выражения входного механического сопротивления электродинамического микрофона - приемника давления в рабочем режиме (при заданной нагрузке).

11. Вывод и анализ выражения входного механического сопротивления электродинамического микрофона - приемника градиента давления в рабочем режиме (при заданной нагрузке).

12. Уравнения, конструктивные схемы и работа электромагнитного преобразователя.

13. Вывод условия линеаризации электромагнитного преобразователя. Чем ограничено максимальное значение  $\square_0$  ?

14. Докажите эквивалентность прямой и модернизированной схем емкостного преобразователя с использованием электромеханического трансформатора. Приведите примеры использования этих схем.

15. Докажите эквивалентность прямой и модернизированной схем индуктивного преобразователя с гиратором. Приведите примеры использования этих схем.

16. Докажите эквивалентность прямой и модернизированной схем индуктивного преобразователя с псевдотрансформатором. Приведите примеры использования этих схем.

17. Вывод и анализ выражения для чувствительности электромеханического преобразователя  $\frac{I}{F}$  через  $Y_{iF}$  в рабочем режиме (при заданной нагрузке).

18. Вывод и анализ выражения для чувствительности электромеханического преобразователя  $\frac{v}{U}$  через  $Z_{iF}$  в рабочем режиме (при заданной нагрузке).

19. Вывод и анализ выражения для входного сопротивления электромеханического преобразователя через  $Z_{iF}$  в рабочем режиме (при заданной нагрузке).

20. Анализ работы тонких пульсирующих пьезокерамического и магнитострикционного колец в режиме приема.

21. Четвертьволновый стержневой пьезопреобразователь. Эквивалентная схема, анализ работы.

22. Найдите отношение максимальных чувствительностей секционированного и монолитного пьезоколец одинаковых геометрических размеров.

23. КЭС как важная характеристика пьезоматериала. КЭС радиально поляризованного длинного тонкого пьезокерамического цилиндра. Вывод и анализ выражения.

24. Вывод выражения для коэффициента электромеханической трансформации секционированного пьезокольца.

25. Как отличаются размеры секционированного и монолитного пьезоколец, имеющих одинаковую частоту механического резонанса? Оцените количественно.

26. Электрическая проводимость пульсирующего пьезокольца. Анализ работы кольца в режиме излучения.

27. Работа сферического пьезоизлучателя.

28. Направленные свойства приемников давления и приемников градиента давления, комбинированных приемников.

29. Магнитострикционный цилиндрический преобразователь. Эквивалентная схема, уравнения, основные характеристики.

30. Уравнения и эквивалентная схема тонкой сферической оболочки из пьезокерамики.

31. Угольный микрофон как пример необратимого преобразователя. Схема включения, характеристики, параметры.

32. Пьезоэффект, пьезомагнетизм и магнитострикция- анализ физических эффектов, примеры конструкций преобразователей, работающих с использованием этих эффектов.

33. Уравнения трехстороннего электромеханического преобразователя в  $Z$  и  $Y$  формах записи. Соотношения взаимности. Эквивалентные схемы. Примеры.

34. Запишите местные уравнения пьезоэффекта для тонкой кварцевой пластинки  $X$ - среза, совершающей колебания по толщине.

35. Эквивалентная схема стержневого пьезопреобразователя и ее упрощения для различных диапазонов частот.
36. Входное сопротивление электромеханического двустороннего преобразователя. Определения. Вывод выражений.
37. КЭС как важнейшая характеристика пьезоматериала. Определение КЭС для различных мод колебаний пьезоэлементов.
38. Частотные зависимости чувствительности приемников давления и градиента давления индуктивного типа.
39. Анализ работы стержневого пьезопреобразователя в режиме излучения.
40. Работа приемника звука с электрической нагрузкой.
41. Эквивалентные схемы двустороннего электромеханического преобразователя индуктивного типа.
42. Добротность пьезопреобразователей различных конструкций.
43. Роль внешнего оформления громкоговорителя. Методы улучшения качества громкоговорителей прямого излучения на низких частотах.
44. Эквивалентные схемы трехсторонних электромеханических преобразователей индуктивного и емкостного типов.
45. Многосторонний обратимый линейный преобразователь. Основные соотношения.
46. Моды колебаний тонкого пьезокольца и их использование в технике.
47. Уравнения, эквивалентная схема, анализ работы пульсирующего монолитного пьезокольца.
48. Направленные свойства комбинированных приемников звука.
49. Анализ и вывод выражений для входного механического сопротивления пьезоэлектрического и магнитострикционного колец.
50. Чувствительность электромеханического двустороннего преобразователя в режиме двигателя и генератора.

51. Вывод уравнения, описывающего работу механической стороны кольцевого пьезопреобразователя.

52. Потенциальная и кинетическая энергия линейной механической системы с  $n$  степенями свободы. Поток энергии. КПД преобразователя. КПД двустороннего электромеханического преобразователя.

53. Методы улучшения частотных характеристик громкоговорителей в области высоких частот.

54. Многократный обратимый линейный преобразователь. Основные соотношения. Входное сопротивление. Входное сопротивление для двукратного преобразователя. Примеры.

55. Анализ работы стержневого пьезопреобразователя в режиме приема.

56. Основные характеристики и параметры громкоговорителей.

57. Магнитострикционный стержневой преобразователь. Эквивалентная схема, уравнения, основные характеристики.

**Образец экзаменационного билета**  
**МИНИСТЕРСТВО ОБРАЗОВАНИЯ И НАУКИ**  
**РОССИЙСКОЙ ФЕДЕРАЦИИ**  
Федеральное государственное автономное образовательное  
учреждение высшего образования  
«Дальневосточный федеральный университет»

2018-2019 учебный год весенний семестр

**ЭКЗАМЕНАЦИОННЫЙ БИЛЕТ**  
**№ 1**  
по дисциплине Электроакустические преобразователи

1. Вывод и анализ выражения для входного электрического сопротивления электростатического преобразователя в рабочем режиме (при заданной нагрузке).

2. Вывод и анализ выражения для чувствительности электромеханического преобразователя через  $YiF$  в рабочем режиме (при заданной нагрузке).

3. Магнитострикционный цилиндрический преобразователь. Эквивалентная схема, уравнения, основные характеристики.

Зав. кафедрой \_\_\_\_\_

Экзаменатор \_\_\_\_\_

Экзаменационный билет содержит 3 вопроса: два вопроса из модуля 1 (разделы 1 и 2), третий вопрос из модуля 2.

**Критерии выставления оценки студенту на экзамене по дисциплине  
«Электроакустические преобразователи»**

<b>Баллы (рейтингов ой оценки)</b>	<b>Оценка зачета/ экзамена</b>	<b>Требования к сформированным компетенциям</b>
	«зачтено» / «отлично»	Оценка «отлично» выставляется студенту, если он глубоко и прочно усвоил программный материал, исчерпывающе, последовательно, четко и логически стройно его излагает, умеет тесно увязывать теорию с практикой, свободно справляется с задачами, вопросами и другими видами применения знаний, причем не затрудняется с ответом при видоизменении заданий, использует в ответе материал монографической литературы, правильно обосновывает принятое решение.
	«зачтено»/ «хорошо»	Оценка «хорошо» выставляется студенту, если он твердо знает материал, грамотно и по существу излагает его, не допуская существенных неточностей в ответе на вопрос, правильно применяет теоретические положения при решении практических вопросов и задач, владеет необходимыми навыками и приемами их выполнения.

	«зачтено» / «удовлетворительно»	Оценка «удовлетворительно» выставляется студенту, если он имеет знания только основного материала, но не усвоил его деталей, допускает неточности, недостаточно правильные формулировки, нарушения логической последовательности в изложении программного материала, испытывает затруднения при выполнении практических работ.
	«не зачтено» / «неудовлетворительно»	Оценка «неудовлетворительно» выставляется студенту, который не знает значительной части программного материала, допускает существенные ошибки, неуверенно, с большими затруднениями выполняет практические работы. Как правило, оценка «неудовлетворительно» ставится студентам, которые не могут продолжить обучение без дополнительных занятий по соответствующей дисциплине.

### **Оценочные средства для текущей аттестации**

Ниже приведены основные задания к контрольным работам, тестам и экспресс опросам.

#### **1. Модуль 1.**

##### **Вариант 1**

1. Требование неискаженности преобразования означает (продолжите определение).

2. Коэффициент преобразования по току электродинамического преобразователя (запишите формулу, приведите определение всех параметров, укажите размерности)

3. Вывод выражения для входного механического сопротивления в режиме генератора

##### **Вариант 2**

1. К какому типу преобразователей можно отнести электродинамический?

Коэффициент преобразования по напряжению для электродинамического преобразователя (запишите формулу, приведите определение всех параметров, укажите размерности)

Нарисуйте конструкционную схему ленточного электродинамического микрофона. Поясните принцип работы, запишите законы, описывающие основной эффект.

### **Вариант 3**

1. Угольный микрофон можно отнести к: (выберите и обоснуйте правильный ответ)

- истинным преобразователям;
- параметрическим преобразователям

Поясните выбор.

2. Почему говорят, что электродинамический преобразователь инвертирует характер частотной зависимости? Что имеется в виду?

3. Что такое «режим генератора»? Приведите примеры работы преобразователей в этом режиме

### **Вариант 4**

1. Электродинамический преобразователь - преобразователь (выберите и обоснуйте правильный ответ)

- истинный индуктивного типа
- истинный емкостного типа

Параметрический индуктивный

Параметрический емкостной

2. Нарисуйте конструктивную схему электродинамического диффузорного громкоговорителя

3. Что такое «режим двигателя»? Приведите примеры работы преобразователей в этом режиме

### **Вариант 5**

1. Электростатический - преобразователь (выберите и обоснуйте правильный ответ)

- истинный индуктивного типа
- истинный емкостного типа

Параметрический индуктивный

Параметрический емкостной

2. Коэффициент преобразования по напряжению для электростатического преобразователя (запишите формулу, приведите определение всех параметров, укажите размерности)

3. Запишите выражения для входного механического сопротивления электростатического преобразователя

## **КР ПЕРЕД 2-Й АТТЕСТАЦИЕЙ**

### **Вариант 1**

1. Вывод выражения для входного механического сопротивления электродинамического преобразователя в рабочем режиме и его анализ.

2. Запишите в  $Z$ -форме уравнения двухстороннего линейного обратимого электромеханического преобразователя и все соотношения взаимности. Дайте определения всех параметров, входящих в уравнения.

3. Нарисуйте схему-аналог преобразователя индуктивного типа (с использованием гиратора), ее модификацию и докажете эквивалентность этих схем.

4. Опишите или изобразите, как будет деформироваться образец из кварца - пластина  $X$ -среза при приложении электрического поля вдоль оси  $X_1$ . Какие деформации будут выражены сильнее? Обоснуйте свой ответ.

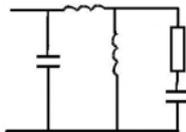
5. Какие конструктивные схемы электростатического преобразователя Вы знаете? Нарисуйте. Назовите основные области применения этих схем. Нарисуйте схему-аналог этого преобразователя.

6. Нарисуйте биполярную конструкцию электромагнитного преобразователя. Какое условие должно выполняться для линеаризации преобразования?

7. Как определить чувствительность преобразователя?

8. Назовите основные типы пьезоэлектрических преобразователей, используемых на частотах до 100 кГц.

9. Нарисуйте механическую схему соответствующую электрической вида:



## КР ПЕРЕД 2-Й АТТЕСТАЦИЕЙ

### Вариант 2

1. Вывод выражения для входного механического сопротивления электромагнитного преобразователя в режиме холостого хода и короткого замыкания электрической стороны и его анализ.

2. Запишите в  $Y$ -форме уравнения двухстороннего линейного обратимого электромеханического преобразователя и все известные Вам соотношения взаимности. Дайте определения всех параметров, входящих в уравнения.

3. Нарисуйте схему-аналог преобразователя индуктивного типа (с использованием псевдотрансформатора), ее модификацию и покажите эквивалентность этих схем.

4. Опишите или изобразите, как будет деформироваться образец из турмалина - пластина  $Y$ -среза при приложении электрического поля вдоль оси  $X_2$

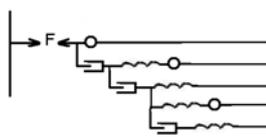
5. Какие конструктивные схемы электродинамического преобразователя Вы знаете? Нарисуйте. Назовите основные области применения этих схем. Нарисуйте схему-аналог.

6. Нарисуйте схему включения обратимого конденсаторного микрофона. Каковы требования к элементам схемы, к величине постоянного напряжения

7. Как определить КПД преобразователя?

8. Назовите основные технологические операции при изготовлении пьезокерамического преобразователя.

9. Нарисуйте электрическую схему соответствующую механической вида



## КР ПЕРЕД 2-Й АТТЕСТАЦИЕЙ

### Вариант 3

1. Вывод выражения для условия линеаризации электростатического преобразователя и его анализ.

2. Запишите уравнения двухстороннего линейного обратимого **электрохимического** преобразователя индуктивного типа и соотношения взаимности для него. Дайте определения всех параметров, входящих в уравнения.

3. Нарисуйте схему-аналог преобразователя емкостного типа, ее модификацию и покажите эквивалентность этих схем.

4. Опишите или изобразите, как будет деформироваться образец из пьезокерамики - пластина при приложении электрического поля вдоль оси остаточной поляризации.

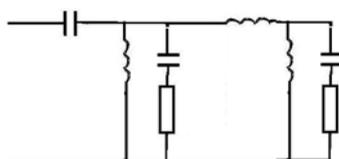
5. Вывод выражения для входного электрического сопротивления электромагнитного преобразователя в рабочем режиме и его анализ.

6. Какие конструктивные схемы электродинамических микрофонов Вам известны? Нарисуйте схему аналог, укажите размерности всех параметров.

7. Назовите основные типы пьезоэлектрических преобразователей, используемых на частотах от 500 кГц и выше.

8. Запишите связь между собственными сопротивлениями  $i$ -ой стороны линейного обратимого преобразователя, измеренными в режиме торможения и свободных колебаний другой стороны.

9. Нарисуйте механическую схему соответствующую электрической вида:



## КР ПЕРЕД 2-Й АТТЕСТАЦИЕЙ

### Вариант 4

1. Вывод выражения для условия линеаризации электромагнитного преобразователя и его анализ.

2. Запишите уравнения двухстороннего линейного обратимого **электромеханического** преобразователя емкостного типа и соотношения взаимности для него. Дайте определения всех параметров, входящих в уравнения.

3. Нарисуйте схему-аналог преобразователя индуктивного типа (с использованием псевдотрансформатора), ее модификацию и покажите эквивалентность этих схем.

4. Опишите или изобразите, как будет деформироваться образец из сегнетовой соли - пластина Y-среза при приложении электрического поля вдоль оси  $X_2$

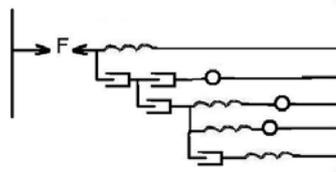
5. Вывод выражения для входного механического сопротивления электростатического преобразователя в рабочем режиме и его анализ

6. Какие конструктивные схемы электродинамических громкоговорителей Вам известны? Нарисуйте схему аналог, укажите размерности всех параметров

7. Какие пьезоэлектрические материалы Вам известны?

8. Приведите пример вентильного приемника звука. Нарисуйте конструкцию, поясните принцип работы

9. Нарисуйте электрическую схему соответствующую механической вида



## КР ПЕРЕД 2-Й АТТЕСТАЦИЕЙ

### Вариант 5

1. Вывод выражения для входного механического сопротивления электромагнитного преобразователя в рабочем режиме и его анализ.

2. Запишите в уравнения двухстороннего линейного обратимого электромеханического преобразователя вида  $F=f(U,v)$ ;  $I=f_1(U,v)$  и соответствующее соотношение взаимности. Дайте определения всех параметров, входящих в уравнения.

3. Нарисуйте схему-аналог электростатического преобразователя. Запишите выражение для входного электрического сопротивления.

4. Что такое коэффициент электромеханической связи?

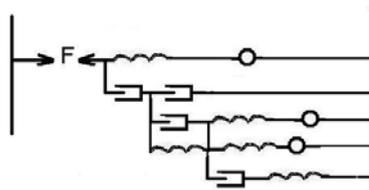
5. Опишите или изобразите, как будет деформироваться образец из кварца - пластина Z-среза при приложении электрического поля вдоль оси  $X_2$ .

6. Чему равен коэффициент преобразования по току для электродинамического громкоговорителя?

7. Нарисуйте схему-аналог преобразователя емкостного типа (с использованием электромеханического трансформатора), ее модификацию и покажите эквивалентность этих схем

8. Электрическая схема включения конденсаторного громкоговорителя. Требования к параметрам схемы.

9. Нарисуйте электрическую схему соответствующую механической вида



## КР ПЕРЕД 2-Й АТТЕСТАЦИЕЙ

## Вариант 6

1. Вывод выражения для входного механического сопротивления электродинамического преобразователя в рабочем режиме и его анализ.

2. Запишите в Y-форме уравнения трехстороннего линейного обратимого электромеханического преобразователя и соответствующие соотношения взаимности. Дайте определения всех параметров, входящих в уравнения.

3. Нарисуйте схему-аналог электродинамического преобразователя (с использованием псевдотрансформатора), ее модификацию и покажите эквивалентность этих схем.

4. Опишите или изобразите, как будет деформироваться образец из турмалина - пластина X-среза при приложении электрического поля вдоль оси  $X_3$ .

5. Нарисуйте схему-аналог электростатического громкоговорителя. Дайте определения всех параметров схемы, запишите единицы измерения

6. Условие линеаризации для электромагнитного преобразователя. Как практически осуществляется линеаризация? Цель линеаризации.

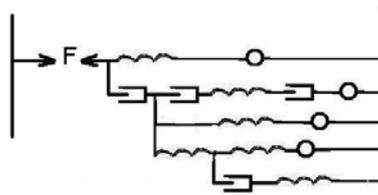
7. Угольный микрофон можно отнести к: (выберите и **обоснуйте** правильный ответ)

-истинным преобразователям; -параметрическим преобразователям.

Почему?

8. Требование неискаженности преобразования означает

9. Нарисуйте электрическую схему соответствующую механической вида



**КР ПЕРЕД 2-Й АТТЕСТАЦИЕЙ**

**Вариант 7**

1. Вывод выражения для условия линеаризации электростатического преобразователя и его анализ.

2. Запишите уравнения трехстороннего линейного обратимого электромеханического преобразователя вида  $F_1=F_1(v_1, v_2, U)$ ;  $F_2=F_2(v_1, v_2, U)$ ; ;  $I=I(v_1, v_2, U)$  и соответствующие соотношения взаимности. Дайте определения всех параметров, входящих в уравнения.

3. Нарисуйте схему-аналог преобразователя емкостного типа, ее модификацию и покажите эквивалентность этих схем.

4. К какому типу преобразователей можно отнести электродинамический?

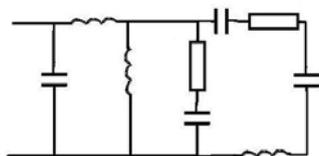
5. Запишите местные уравнения пьезоэффекта для пластинки из пьезокерамики, совершающей колебания по толщине в поле, параллельном ее толщине.

6. Вывод выражения для входного механического сопротивления электромагнитного преобразователя в режиме генератора, размерность

7. Нарисуйте конструкцию электростатического микрофона. Укажите назначение основных элементов. Из каких материалов их выполняют?

8. Нарисуйте схематическое изображение электретного преобразователя, опишите принцип действия.

9. Нарисуйте механическую схему соответствующую электрической вида



## **КР ПЕРЕД 2-Й АТТЕСТАЦИЕЙ**

### **Вариант 8**

1. Вывод выражения для условия линеаризации электромагнитного преобразователя и его анализ.

2. Запишите уравнения трехстороннего линейного обратимого электромеханического преобразователя для которого справедливы

следующие

соотношения

взаимности:

$$\left(\frac{F_1}{v_2}\right)_{I=v_1=0} = \left(\frac{F_2}{v_1}\right)_{I=v_2=0}; \left(\frac{F_1}{I}\right)_{v_1=v_2=0} = \left(\frac{F_2}{I}\right)_{v_1=v_2=0}$$

и допишите еще одно. Дайте

определения всех параметров, входящих в уравнения.

3. Нарисуйте схему-аналог преобразователя индуктивного типа (с использованием псевдотрансформатора), ее модификацию и покажите эквивалентность этих схем.

4. Опишите или изобразите, как будет деформироваться образец из кварца - пластина Z-среза при приложении электрического поля вдоль оси  $X_1$

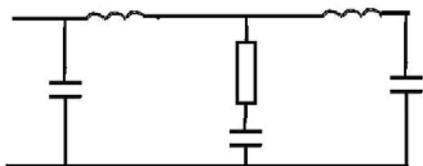
5. Какие конструктивные схемы электростатического преобразователя Вы знаете? В чем их недостатки и достоинства? Основные области применения.

6. Запишите выражение для КПД электродинамического громкоговорителя.

7. Вывод выражения для входного механического сопротивления электродинамического преобразователя в рабочем режиме, размерность

8. К какому типу преобразователей можно отнести электростатический?

9. Нарисуйте механическую схему соответствующую электрической вида



## КР ПЕРЕД 2-Й АТТЕСТАЦИЕЙ

### Вариант 9

1. Запишите уравнения двухстороннего линейного обратимого электромеханического преобразователя вида  $F=f(U,v); I=f_1(U,v)$  и соответствующее соотношение взаимности. Дайте определения всех параметров, входящих в уравнения.

2. Какие конструктивные схемы электростатического преобразователя Вы знаете? В чем их недостатки и достоинства? Нарисуйте схемы включения электростатических приемников, укажите их достоинства, недостатки, области применения.

3. Вывод условия линеаризации для электромагнитного преобразователя.

4. Что такое «коэффициент электромеханического преобразования по току»? Чему равен для электростатического преобразователя? Для электродинамического преобразователя?

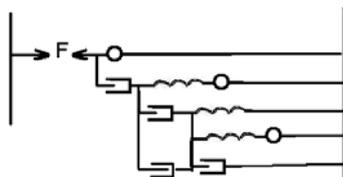
5. Вывод выражения для входного механического сопротивления электростатического преобразователя в рабочем режиме и его анализ

6. Запишите уравнения электромеханического трансформатора

7. Опишите или изобразите, как будет деформироваться образец из кварца - пластина У-среза при приложении электрического поля вдоль оси  $X_1$

8. Запишите выражение для чувствительности электродинамического излучателя

9. Нарисуйте электрическую схему соответствующую механической вида



## КР ПЕРЕД 2-Й АТТЕСТАЦИЕЙ

### Вариант 10

1. Вывод выражения для входного механического сопротивления электромагнитного преобразователя в рабочем режиме и его анализ.

2. Запишите уравнения трехстороннего линейного обратимого электромеханического преобразователя вида  $F_1=F_1(v_1, v_2, U)$ ;  $F_2=F_2(v_1, v_2, U)$ ; ;  $I=I(v_1, v_2, U)$  и соответствующие соотношения взаимности. Дайте определения всех параметров, входящих в уравнения.

3. Запишите выражение для чувствительности электростатического преобразователя в рабочем режиме (нагрузка на механической стороне).

4. Опишите или изобразите, как будет деформироваться образец из пьезокерамики - пластина  $Y$ -среза при приложении электрического поля вдоль оси  $X_2$

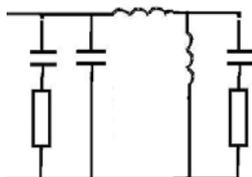
5. Вывод выражения для входного электрического сопротивления электростатического преобразователя в рабочем режиме и его анализ

6. Нарисуйте конструкционную схему ленточного электродинамического микрофона. Поясните принцип работы, запишите законы, описывающие основной эффект

7. Почему говорят, что электродинамический преобразователь инвертирует характер частотной зависимости? Что имеется в виду?

8. Что такое «режим двигателя»? Приведите примеры работы преобразователей в этом режиме

9. Нарисуйте механическую схему соответствующую электрической вида



## КР ПЕРЕД 2-Й АТТЕСТАЦИЕЙ

### Вариант 11

1. Вывод выражения для входного механического сопротивления электродинамического преобразователя в режиме холостого хода и короткого замыкания электрической стороны и его анализ.

2. Запишите в  $Y$ -форме уравнения трехстороннего линейного обратимого электромеханического преобразователя и соответствующие соотношения взаимности. Дайте определения всех параметров, входящих в уравнения.

3. Запишите выражение для КПД электромагнитного преобразователя в рабочем режиме. Нагрузка на электрической стороне.

4. Опишите или изобразите, как будет деформироваться образец из сегнетовой соли - пластина Z-среза при приложении электрического поля вдоль оси  $X_3$

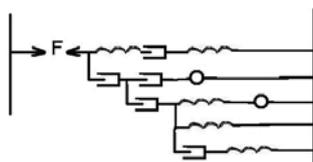
5. Нарисуйте известные Вам конструктивные схемы электромагнитных преобразователей, укажите их достоинства и недостатки.

6. Запишите выражения для коэффициента электромеханической связи продольного пьезоэффекта.

7. Чему равен коэффициент преобразования по напряжению для электростатического преобразователя?

8. Запишите уравнения электромеханического псевдотрансформатора

9. Нарисуйте электрическую схему соответствующую механической вида



## КР ПЕРЕД 2-Й АТТЕСТАЦИЕЙ

### Вариант 12

1. Запишите вывод выражения для входного сопротивления двухстороннего линейного обратимого электромеханического преобразователя в режиме свободных колебаний второй стороны. Дайте определения всех параметров, входящих в выражения.

2. Запишите уравнения трехстороннего линейного обратимого электромеханического преобразователя. Дайте определения всех параметров, входящих в уравнения.

3. Нарисуйте схему-аналог электростатического микрофона. Дайте определения всех параметров схемы, запишите единицы измерения.

4. Нарисуйте конструкционную схему ленточного электродинамического микрофона. Поясните принцип работы, запишите законы, описывающие основной эффект.

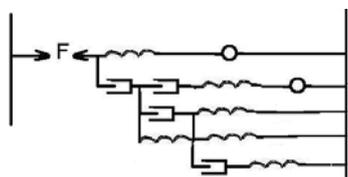
5. Запишите связь между механическими сопротивлениями электростатического преобразователя, измеренным в режиме холостого хода и короткого замыкания электрической стороны

6. Опишите или изобразите, как будет деформироваться образец из пьезокерамики - пластина Z-среза при приложении электрического поля вдоль оси  $X_1$

7. Нарисуйте эквивалентную схему электромагнитного преобразователя. Укажите все размерности, дайте определения параметров схемы

8. Вывод условия линейаризации электростатического преобразователя и его анализ.

9. Нарисуйте электрическую схему соответствующую механической вида



## **КР ПЕРЕД 2-Й АТТЕСТАЦИЕЙ**

### **Вариант 13**

1. Вывод выражения для входного механического сопротивления электродинамического преобразователя в рабочем режиме и его анализ.

2. Запишите в Y-форме уравнения двухстороннего линейного обратимого электромеханического преобразователя и все известные Вам соотношения взаимности. Дайте определения всех параметров, входящих в уравнения.

3. Нарисуйте схему-аналог преобразователя емкостного типа, ее модификацию и покажите эквивалентность этих схем.

4. Опишите или изобразите, как будет деформироваться образец из сегнетовой соли - пластина X-среза при приложении электрического поля вдоль оси  $X_1$

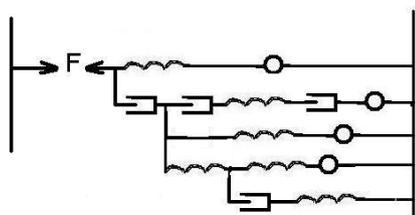
5. Что такое коэффициент электромеханической связи?

6. Условие линеаризации для электромагнитного преобразователя. Как практически осуществляется линеаризация? Цель линеаризации.

7. Нарисуйте конструкцию электростатического микрофона. Укажите назначение основных элементов. Из каких материалов их выполняют?

8. К какому типу преобразователей можно отнести электростатический?

9. Нарисуйте электрическую схему соответствующую механической вида



## КР ПЕРЕД 2-Й АТТЕСТАЦИЕЙ

### Вариант 14

1. Запишите уравнения двухстороннего линейного обратимого электромеханического преобразователя вида  $F=f(U,v); I=f_1(U,v)$  и соответствующее соотношение взаимности. Дайте определения всех параметров, входящих в уравнения.

2. Вывод выражения для входного механического сопротивления электромагнитного преобразователя в рабочем режиме и его анализ.

3. Запишите выражение для чувствительности электромагнитного преобразователя в рабочем режиме (нагрузка на механической стороне).

4. Опишите или изобразите, как будет деформироваться образец из сегнетовой соли - пластина Y-среза при приложении электрического поля вдоль оси  $X_2$

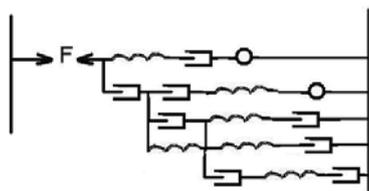
5. Нарисуйте известные Вам конструктивные схемы электромагнитных преобразователей, укажите их достоинства и недостатки.

6. Чему равен коэффициент преобразования по току для электродинамического громкоговорителя? Для электростатического преобразователя?

7. Как определить КПД преобразователя?

8. Назовите основные технологические операции при изготовлении пьезокерамического преобразователя.

9. Нарисуйте механическую схему соответствующую электрической вида



Ниже приведены тесты, используемые для проверки освоения учебного материала темы 2 первого раздела первого модуля..

### **Тема «Пьезоэлектрические материалы»**

#### **Тест № 1**

1. В пьезоэлектрическом материале взаимно связаны:

- а) электрическое и магнитное поле.
- б) магнитное и упругое поле.
- в) электрическое и упругое поле.
- г) электрическое, магнитное и упругое поля.
- д) ничего из приведенного выше.

2. Компоненте  $u_6$  шестимерного вектора относительных деформаций соответствует компоненты тензора относительных деформаций

- а)  $u_{13}, u_{31}$ .
- б)  $u_{12}, u_{21}$ .
- в)  $u_{23}, u_{32}$ .
- г)  $2u_{13}, 2u_{31}$ .
- д)  $2u_{12}, 2u_{21}$ .
- е)  $2u_{23}, 2u_{32}$ .

3. Компоненте  $\sigma_{13}$  тензора механических напряжений соответствует компонента шестимерного вектора механических напряжений

- а)  $\sigma_4$ .
- б)  $\sigma_5$ .
- в)  $\sigma_6$ .
- г)  $2\sigma_4$ .
- д)  $0,5\sigma_4$ .
- е)  $0,5\sigma_5$ .

4. Пьезомодуль  $d_{31}$  измеряется в

- а) Кл/м.
- б) В м/Н.
- в) Кл/м<sup>2</sup>.
- г) Н/Кл.
- д) В/м.
- е) Кл/Н.

5. К хорошим пьезоэлектрикам относятся

- а) кварц.
- б) турмалин.
- в) сегнетова соль.
- г) никель.
- д) все перечисленное выше.

е) ничего из перечисленного выше.

6. Численные значения пьезомодуля  $d$  обычно лежат в пределах

а)  $10^6$ - $10^{10}$ .

б)  $10^4$ - $10^8$ .

в)  $10^0$ - $10^4$ .

г)  $10^{-1}$ - $10^{-4}$ .

д)  $10^{-3}$ - $10^{-6}$ .

е)  $10^{-8}$ - $10^{-12}$ .

ж) другое.

7. Пьезоэффект может быть обнаружен в кристаллах

а) обладающих центром симметрии.

б) не обладающих центром симметрии.

в) принадлежащих к тригональной сингонии.

г) принадлежащих к тетрагональной сингонии.

д) другое – запишите Ваш ответ.

8. Компоненты вектора механического напряжения измеряются в

а) В/м.

б) Н/м<sup>2</sup>.

в) Па.

г) безразмерная величина.

д) другое – запишите Ваш ответ.

9. Компоненты вектора относительных деформаций измеряются в

а) В/м.

б) Н/м<sup>2</sup>.

в) Па.

г) безразмерная величина.

д) другое – запишите Ваш ответ.

10. В качестве независимых переменных в местные уравнения пьезоэффекта должны входить

а) только обобщенные силы. Запишите вид местных уравнений пьезоэффекта, соответствующий такому выбору.

б) только обобщенные смещения. Запишите вид местных уравнений пьезоэффекта, соответствующий такому выбору.

в) одна из переменных должна иметь размерность обобщенной силы, а другая – размерность обобщенного смещения. Запишите вид местных уравнений пьезоэффекта, соответствующий такому выбору.

г) Выбор независимых переменных обусловлен особенностями применения пьезоэлемента. Укажите, какими именно, приведите пример местных уравнений пьезоэффекта, соответствующий такому выбору.

### **Тема «Коэффициент электромеханической связи пьезоэлектрика»**

#### **Тест № 2**

1. Квадрат коэффициента электромеханической связи – это:

а) отношение способной к преобразованию запасенной электрической энергии ко всей подведенной к пьезоэлектрическому телу механической энергии.

б) отношение способной к преобразованию запасенной механической энергии ко всей подведенной к пьезоэлектрическому телу электрической энергии.

в) отношение механической энергии, отдаваемой в нагрузку, к полной подведенной к преобразователю энергии.

г) Это разность электрической и механической энергий, подводимых к пьезоэлектрическому телу.

д) ничего из приведенного выше.

2. Эффективность работы пьезоматериала в составе длинного тонкого стержня, колеблющегося по длине в поле, перпендикулярном его длине, оценивается КЭС:

а)  $k_{33}$ .                                      б)  $k_{31}$ .

в)  $k_h$ .    г)  $k_p$ .

д)  $k_{15}$ .

е) алгебраической комбинацией коэффициентов  $k_{31}$  и других параметров пьезоэлектрика: запишите соответствующую формулу.

Для полного ответа изобразите колебательную систему, укажите направления осей координат, условия для компонент электрического и упругого поля

3. Эффективность работы пьезоматериала в составе длинного тонкого стержня, колеблющегося по длине в поле, параллельном его длине, оценивается КЭС:

а)  $k_{33}$ .                                      б)  $k_{31}$ .

в)  $k_h$ .    г)  $k_p$ .

д)  $k_{15}$ .

е) алгебраической комбинацией коэффициентов  $k_{31}$  и других параметров пьезоэлектрика: запишите соответствующую формулу.

Для полного ответа изобразите колебательную систему, укажите направления осей координат, условия для компонент электрического и упругого поля

4. Эффективность работы пьезоматериала в составе длинного тонкого пульсирующего радиально поляризованного цилиндра оценивается КЭС:

а)  $k_{33}$ .                                      б)  $k_{31}$ .

в)  $k_h$ .    г)  $k_p$ .

д)  $k_{15}$ .

е) алгебраической комбинацией коэффициентов  $k_{31}$  и других параметров пьезоэлектрика: запишите соответствующую формулу.

Для полного ответа изобразите колебательную систему, укажите направления осей координат, условия для компонент электрического и упругого поля

5. Планарный коэффициент электромеханической связи определяется выражением:

а)  $k_p = \frac{d_{31}}{\sqrt{\varepsilon_{33}^{\sigma} s_{11}^E}}$ .

б)  $k_p = \frac{d_{31}}{\varepsilon_{33}^{\sigma} s_{11}^E} \sqrt{\frac{2}{1-\nu^E}}$ .

в)  $k_p = \frac{d_{33}}{\varepsilon_{33}^{\sigma} s_{33}^E}$ .

г)  $k_p = \frac{d_{15}}{\varepsilon_{11}^{\sigma} s_{55}^E}$ .

д) ничего из перечисленного выше. Запишите свой вариант формулы

6. Коэффициент  $k_{31}$  можно определить по формуле:

а)  $k_{31} = 1 - \frac{\varepsilon_{33}^{\sigma p}}{\varepsilon_{33}^{u p}}$     б)  $k_{31} = 1 - \frac{\varepsilon_{11}^{\sigma p}}{\varepsilon_{33}^{u p}}$ .

в)  $k_{31} = \sqrt{1 - \frac{\varepsilon_{33}^{u p}}{\varepsilon_{33}^{\sigma p}}}$ .

г) ничего из перечисленного выше. Запишите свой вариант формулы

7. Коэффициент  $k_{33}$  можно определить по формуле:

а)  $\frac{d_{31}}{\sqrt{\varepsilon_{33}^{\sigma} s_{11}^E}}$     б)  $\frac{d_{33}}{\sqrt{\varepsilon_{33}^{\sigma} s_{33}^E}}$ .

в)  $\frac{d_{15}}{\sqrt{\varepsilon_{11}^{\sigma} s_{55}^E}}$     г) ничего из перечисленного выше. Запишите свой вариант формулы.

8. Коэффициент электромеханической связи при гидростатическом сжатии определяется по формуле:

а)  $\frac{d_{31}}{\varepsilon_{33}^{\sigma} s_{11}^E}$     б)  $\frac{d_{33}}{\varepsilon_{33}^{\sigma} s_{33}^E}$ .

- в)  $\frac{d_{15}}{\varepsilon_{11}^{\sigma} s_{55}^E}$ .      г) ничего из перечисленного выше. Запишите свой

вариант формулы.

9. Коэффициент  $k_{15}$  можно определить по формуле:

а)  $\frac{d_{31}}{\varepsilon_{33}^{\sigma} s_{11}^E}$ .      б)  $\frac{d_{33}}{\varepsilon_{33}^{\sigma} s_{33}^E}$ .

- в)  $\frac{d_{15}}{\sqrt{\varepsilon_{11}^{\sigma} s_{55}^E}}$ .      г) ничего из перечисленного выше. Запишите свой

вариант формулы.

10. Коэффициент электромеханической связи:

- а) имеет численные значения  $0 \leq k \leq 1$ .
- б) может быть отрицательным.
- в) всегда положительный.
- г) может принимать любые численные значения
- д) Другой вариант ответа.

Тесты необходимы как для контроля знаний в процессе текущей промежуточной аттестации, так и для оценки знаний, результатом которой может быть допуск к экзамену или выставление зачета.

При работе с тестами студенту предлагается выбрать один вариант ответа из трех – четырех предложенных. В то же время тесты по своей сложности неодинаковы. Среди предложенных имеются тесты, которые содержат несколько вариантов правильных ответов. Студенту необходимо указать все правильные ответы.

Тесты рассчитаны как на индивидуальное, так и на коллективное их решение. Они могут быть использованы в процессе и аудиторных занятий, и самостоятельной работы. Отбор тестов, необходимых для контроля знаний в процессе промежуточной и итоговой аттестации производится каждым преподавателем индивидуально.

Результаты выполнения тестовых заданий оцениваются преподавателем по пятибалльной шкале для выставления аттестации или по системе «зачет» – «не зачет». Оценка «отлично» выставляется при правильном ответе на более чем 90% предложенных преподавателем тестов. Оценка «хорошо» – при правильном ответе на более чем 70% тестов. Оценка «удовлетворительно» – при правильном ответе на 50% предложенных студенту тестов.

Рабочий учебный план предусматривает выполнение курсовой работы «Частотные характеристики преобразователя заданного типа и заданного назначения». Курсовая работа предназначена для углубления и закрепления вопросов, изучаемых в теоретической и практической частях курса, а также вопросов, связанных с расчетом и анализом характеристик ЭАП. Эти вопросы являются наиболее важными при практическом применении знаний, получаемых при изучении данного курса.

Курсовая работа состоит из следующих разделов:

- выбор и обоснование типа электромеханического преобразования, материалов и вида колебательной системы;
- выбор и построение схемы-аналога;
- выработка алгоритма, составление и отладка программы расчета частотных характеристик ЭАП;
- анализ работы преобразователя разработанной конструкции;
- анализ влияния на частотные характеристики конструктивных элементов преобразователя, оптимизация частотных характеристик;
- сравнение частотных характеристик преобразователей различных конструкций;
- выводы.

Пояснительная записка включает введение, исходные данные, краткое изложение основных вопросов теории, вывод и обоснование необходимых расчетных соотношений, описание методики расчета параметров и характеристик ЭАП, программу для ЭВМ и результаты расчета ЧХ, анализ

расчетов и выводы, список использованной литературы. В качестве графической части материала представляются эскизы преобразователей и графики частотных зависимостей.

**Список дополнительных вопросов по темам для самостоятельного изучения**

1. Сирены и свистки как примеры необратимых излучателей звука.
2. Гидропневматический излучатель.
3. Гидравлично-поршневой акустический излучатель.
4. Электродинамический вибровозбудитель.
5. Взрывные импульсные источники звука в воде.
6. Импульсный электродинамический излучатель.
7. Аппаратура для воспроизведения граммзаписи.
8. Технология магнитной звукозаписи.
9. Стереограммофонная запись.
10. Оптическая запись звука.
11. Цифровая запись акустических сигналов.
12. Магнитная запись с высокочастотным подмагничиванием.
13. Структура записи и воспроизведения звука. Основные принципы и методы записи. Искажения при записи и воспроизведении звука.
14. Конструкции современных звукозаписывающих устройств.



МИНИСТЕРСТВО ОБРАЗОВАНИЯ И НАУКИ РОССИЙСКОЙ ФЕДЕРАЦИИ  
Федеральное государственное автономное образовательное учреждение  
высшего образования  
«Дальневосточный федеральный университет»  
(ДФУ)

---

НАЗВАНИЕ ШКОЛЫ (ФИЛИАЛА)

**МЕТОДИЧЕСКИЕ УКАЗАНИЯ**  
**по дисциплине «Электроакустические преобразователи»**  
**Направление подготовки – 12.03.01 Приборостроение**  
**профиль «Акустические приборы и системы»**  
**Форма подготовки очная**

**Владивосток**

**2018**

# МЕТОДИЧЕСКИЕ УКАЗАНИЯ К ВЫПОЛНЕНИЮ ЛАБОРАТОРНЫХ РАБОТ

## ЛАБОРАТОРНАЯ РАБОТА № 1

### ОПРЕДЕЛЕНИЕ ПАРАМЕТРОВ ПЬЕЗОКЕРАМИЧЕСКИХ ЭЛЕМЕНТОВ В ДИНАМИЧЕСКОМ РЕЖИМЕ

#### 1. ЦЕЛЬ РАБОТЫ

Освоение стандартной методики измерения параметров пьезоэлементов в динамическом режиме работы.

#### 2. ТЕОРЕТИЧЕСКИЕ ОСНОВЫ РАБОТЫ

Для определения упругих, диэлектрических, пьезоэлектрических параметров пьезостержней и дисков удобно использовать местные уравнения пьезоэффекта, записанные в матричной форме, в которых независимыми переменными являются относительные деформации и напряженность электрического поля:

$$u_i = s_{ik}^E \sigma_k + d_{mi} E_m \quad (1)$$

$$D_n = d_{nk} \sigma_k + \varepsilon_{nm}^\sigma E_m \quad (2)'$$

где  $u_i, \sigma_k$  - компоненты шестимерных векторов относительных деформаций и механических напряжений,  $E_m, D_n$  - компоненты векторов напряженности и индукции электрического поля,  $s_{ik}^E$  компоненты матрицы (6x6) упругих податливостей, измеренные в режиме короткого замыкания электрической стороны ( $E = \text{const} = 0$ ),  $\varepsilon_{nm}^\sigma$  компоненты тензора диэлектрических проницаемостей, измеренные в режиме свободных колебаний (внешние силы отсутствуют,  $\sigma = 0$ ),  $d_{mi}$  пьезоэлектрические модули.

Наличие повторяющегося индекса («немого» индекса) означает суммирование по этому индексу для всех его возможных значений (индексы  $i, k=1\dots 6$ ,  $m, n=1\dots 3$ ). Механические напряжения измеряются в  $\text{Н/м}^2$ , напряженность электрического поля -  $\text{В/м}$ , индукция –  $\text{Кл/м}^2$ . Упругая податливость имеют размерность  $\text{м}^2/\text{Н}$ , диэлектрическая проницаемость –  $\text{Ф/м}$ , пьезоэлектрический модуль -  $\text{Кл/м}^2$  или  $\text{В/м}$ .

Уравнения (1) и (2) значительно упрощаются для длинного тонкого стержня, совершающего колебания по длине в поле, перпендикулярном его длине. При выполнении условий  $\ell \gg b, h, \lambda \gg b, h$ , где  $\lambda$  -длина волны,  $\ell, b, h$  -размеры стержня (см.рис.1), из шести компонент механических напряжений будет отличной от нуля лишь одна, действующая по длине  $\sigma_1 \neq 0$ .

Металлические электроды нанесены на две параллельные поверхности, вытянутые в направлении движения. Пьезокерамика является диэлектриком, и на поверхности раздела металл – диэлектрик не равна нулю только одна компонента вектора напряженности электрического поля, направленная нормально к поверхности электрода:  $E_3 \neq 0$ , компоненты  $E_1=E_2=0$ .

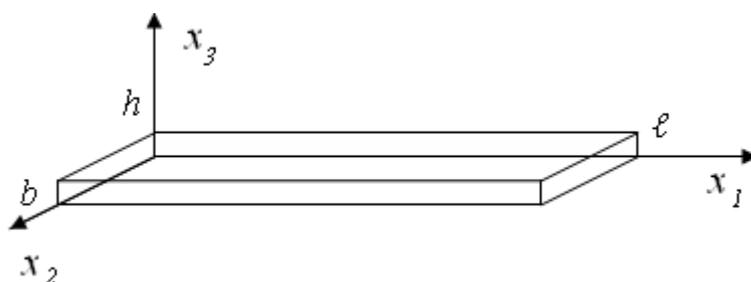


Рис.1 Тонкий стержень, колеблющийся по длине в поле, перпендикулярном его длине

Поскольку электроды представляют собой эквипотенциальные поверхности, и расстояние между электродами мало по сравнению с длиной волны,

компоненты напряженности электрического поля оказываются не зависящими от координаты  $x_1$ .

С учетом перечисленных обстоятельств уравнения пьезоэффекта для данной моды колебаний принимают вид

$$u_1 = s_{11}^E \sigma_1 + d_{31} E_3 \quad (3)$$

$$D_3 = d_{31} \sigma_1 + \epsilon_{33}^\sigma E_3 \quad (4)$$

Обобщенная матрица упругих, диэлектрических и пьезоэлектрических постоянных для пьезокерамики имеет вид /МЭЗОН т.1 ч.А/:

$$\begin{array}{cccccc|ccc}
 s_{11}^E & s_{12}^E & s_{13}^E & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & d_{31} \\
 s_{12}^E & s_{11}^E & s_{13}^E & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & d_{31} \\
 s_{13}^E & s_{13}^E & s_{33}^E & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & d_{33} \\
 0 & 0 & 0 & s_{44}^E & 0 & 0 & 0 & d_{15} & 0 \\
 0 & 0 & 0 & 0 & s_{44}^E & 0 & d_{15} & 0 & 0 \\
 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & s_{11}^E & 0 & 0 & 0 \\
 \hline
 0 & 0 & 0 & 0 & d_{15} & 0 & \epsilon_{11}^\sigma & 0 & 0 \\
 0 & 0 & 0 & d_{15} & 0 & 0 & 0 & \epsilon_{11}^\sigma & 0 \\
 d_{31} & d_{31} & d_{33} & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & \epsilon_{33}^\sigma
 \end{array}$$

Для получения уравнений, описывающих работу стержневого преобразователя, кроме местных уравнений пьезоэффекта, описывающих состояние пьезоэлектрика в «малом» объёме, необходимо использовать также некоторые соотношения теории электромагнитного поля. В качестве таковых используют связь между нормальной составляющей вектора электрической индукции  $D_n$  и плотностью свободных зарядов на электродах  $D_n = Q_{\text{пов}}$ , и между разностью потенциалов между электродами и напряженностью электрического поля между ними  $E = \int_L \vec{E} d\ell$ , где L-линия, соединяющая электроды.

Если расстояние между электродами мало по сравнению с длиной упругой волны, как в данном случае ( $\lambda \gg h$ ), электроды образуют

эквипотенциальные поверхности, вытянутые в направлении колебаний, поле  $E$  не зависит от координаты  $x_1$ , напряжение между электродами можно определить через напряженность поля  $V=hE_3$  (5). Для тока, протекающего через пьезоэлемент, в случае гармонических колебаний,

$$I = \int_S \frac{dQ}{dt} ds = j\omega \int_S D_3 ds = j\omega D_3 S_{эл}, \quad (6)$$

где  $S_{эл}$  – площадь электрода; в данном случае  $S_{эл} = b\ell$ .

Волновое уравнение выводят, применяя закон Ньютона к элементарному объему  $dx_1 dx_2 dx_3$

$$\rho \frac{\partial^2 \xi_1}{\partial t^2} dx_1 dx_2 dx_3 = \frac{\partial \sigma_1}{\partial x_1} dx_1 dx_2 dx_3.$$

Здесь  $\xi_1$ -смещение вдоль оси  $x_1$ . Выражая  $\sigma_1$  из (3)  $\sigma_1 = \frac{u_1 - d_{31}E_3}{s_{11}^E}$  и с учетом связи  $u_1 = \frac{\partial \xi_1}{\partial x_1}$  и  $\frac{\partial E_3}{\partial x_1}$  получим  $\frac{\partial^2 \xi_1}{\partial t^2} = \frac{1}{\rho s_{11}^E} \frac{\partial^2 \xi_1}{\partial x_1^2} = (v_1^E)^2 \frac{\partial^2 \xi_1}{\partial x_1^2}$ , где  $v_1^E = \frac{1}{\sqrt{\rho s_{11}^E}}$  скорость распространения продольных волн в стержне при постоянном электрическом поле  $E$ .

Для гармонических колебаний решение уравнения имеет вид

$$\xi_1 = [A \sin kx_1 + B \cos kx_2] e^{j\omega t},$$

где  $k$ - волновое число  $k = \frac{\omega}{v_1^E}$ ,  $\omega = 2\pi f$ . Коэффициенты  $A$  и  $B$  определяются из условия отсутствия механических напряжений на торцах стержня

$$X_1=0 \quad \sigma_1=0$$

$$X_1=\ell \quad \sigma_1=0$$

$$u_1 = \frac{\partial \xi_1}{\partial x_1} = kA \cos kx_1 - kB \sin kx_1,$$

$$\sigma_1 = \frac{u_1}{s_{11}^E} - \frac{d_{31}E_3}{s_{11}^E} = \frac{kA \cos kx_1 - kB \sin kx_1}{s_{11}^E} - \frac{d_{31}E_3}{s_{11}^E},$$

$$A = \frac{d_{31}E_3}{k}, \quad B = \frac{d_{31}E_3(\cos k\ell - 1)}{k \sin k\ell}.$$

Окончательно выражение для смещения принимает вид

$$\xi_1 = d_{31} \frac{v_1^E}{\omega} \left\{ \sin kx_1 + \frac{[\cos k\ell - 1] \cos kx_1}{\sin k\ell} \right\} E_3 \quad (7)$$

Здесь и далее опущен временной множитель  $e^{j\omega t}$ .

Полная комплексная проводимость стержня определится выражением

$$\begin{aligned} Y &= \frac{1}{Z} = \frac{I}{V} = \frac{bj\omega \int_0^\ell D_3 dx_1}{h \int_0^\ell E_3 dx_3} = \\ &= j\omega \frac{\ell b}{h} \varepsilon_{33}^\sigma \left\{ (1 - k_{31}^2) + k_{31}^2 \frac{\operatorname{tg}(\omega\ell/2v_1^E)}{\omega\ell/2v_1^E} \right\}, \end{aligned} \quad (8)$$

где  $k_{31}^2$  коэффициент электромеханической связи для поперечного пьезоэффекта, который для данной моды колебаний определяется через параметры пьезоматериала как  $k_{31} = d_{31} / \sqrt{\varepsilon_{33}^\sigma s_{11}^E}$ . Из (8), в частности, следует, что диэлектрическую проницаемость  $\varepsilon_{33}^\sigma$  свободного стержня можно непосредственно определить измерением импеданса на низкой частоте.

На резонансной частоте в отсутствие потерь проводимость ненагруженного стержня обращается в бесконечность, а на частоте антирезонанса – в ноль:

$$\begin{aligned} \operatorname{tg} \frac{\pi f_p \ell}{v_1^E} &= \infty, \\ \frac{\operatorname{tg} \left( \frac{\pi f_a}{2f_p} \right)}{\frac{\pi f_a}{2f_p}} &= \frac{k_{31}^2 - 1}{k_{31}^2} \end{aligned} \quad (9)$$

Очевидно, что определить  $k_{31}$  можно, экспериментально измерив частоты резонанса и антирезонанса  $f_p$  и  $f_a$ , а условие резонанса можно записать в виде:

$$f_p = \frac{v_1^E}{2\ell}(2n-1), \text{ или } \ell = (\lambda/2)(2n-1). \quad (10)$$

При этом основной моде колебаний соответствует условие  $f_p = \frac{v_1^E}{2\ell}$ , а преобразователь, работающий на этой моде, называют полуволновым.

Выражение (8) можно переписать в виде

$$Y = j\omega C_0 + j\frac{2n^2}{zS} \operatorname{tg}(k\ell/2), \quad (11)$$

где  $C_0$ - электрическая ёмкость «заторможенного преобразователя»,  $z$  – удельное акустическое сопротивление,  $S$  – площадь поперечного сечения стержня,  $k$  – волновое число,  $n$  – коэффициент трансформации электромеханического трансформатора (см. рис. 2):

$$C_0 = \epsilon_{33}^{\sigma}(1 - k_{31}^2) b\ell/h = \epsilon_{33}^{u1} b\ell/h, \quad z = v_1^E \rho, \quad S = bh,$$

$$n = d_{31} b / s_{11}^E.$$

Таким образом, определив экспериментально низшую из частот резонанса  $f_p$ , легко найти скорость звука  $v_1^E = 2f_p \ell$  (12), а взвесив образец и определив плотность материала, из которого выполнен стержень, определить упругую податливость  $s_{11}^E = \frac{1}{\rho(v_1^E)^2}$  (13) и действующий модуль Юнга  $E_{ю} = \rho(v_1^E)^2$ .

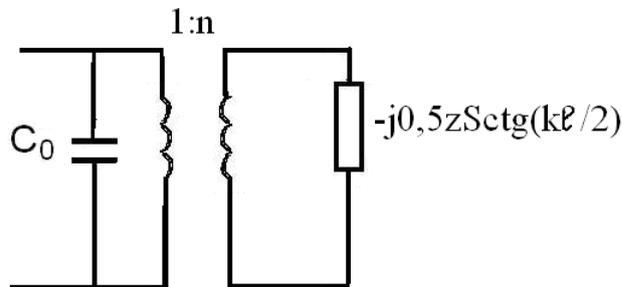


Рис. 2 Эквивалентная схема стержневого преобразователя без учета потерь

Диэлектрическую проницаемость свободного преобразователя определяют, измерив емкость  $C^\sigma$  на частотах, значительно меньших  $f_p$ , по формуле  $\epsilon_{33}^\sigma = C^\sigma h / (\ell b)$  (14). Диэлектрическую проницаемость «заторможенного» преобразователя можно определить, измерив проводимость пьезостержня на частоте  $f = 2f_p$ :  $Y = j\omega C^{u1}$ ,  $C^{u1} = \epsilon_{33}^{u1} b \ell / h$ .

Коэффициент электромеханической связи  $k_{31}$  определим из (9) после измерения частоты антирезонанса. Для определения пьезомодуля  $d_{31}$  можно также воспользоваться условием  $Y(\omega_a) = 0$ , откуда

$$-\frac{2n^2}{\omega_a C_0 z S} = \text{ctg}(k_a \ell / 2).$$

Так как частота антирезонанса незначительно превышает частоту резонанса и волновая длина стержня на этой частоте близка к  $\pi$ , можно воспользоваться разложением котангенса в ряд, ограничиваясь первыми двумя членами разложения:

$$\frac{1}{4} \left( \frac{\pi^2}{k_a \ell} - k_a \ell \right) = - \frac{2d_{31}^2 b^2 h}{(s_{11}^E)^2 \rho v_1^E b h 2\pi f_a \epsilon_{33}^{u1} S_{эл}}.$$

Из последнего выражения нетрудно получить

$$d_{31}^2 = \frac{\pi^2 s_{11}^E \epsilon_{33}^{u1}}{8} \left[ \left( \frac{f_a}{f_p} \right)^2 - 1 \right]. \quad (15)$$

Коэффициент электромеханической трансформации  $n$  определим по формуле

$$n = d_{31} b / s_{11}^E. \quad (16)$$

Для планарной моды колебаний тонкого диска (рис.3), у которой учитывается радиальное распределение смещений по ширине, удобно применять цилиндрическую систему координат, в которой положение точки в пространстве характеризуется радиус-вектором  $r$ , углом  $\theta$  и высотой  $Z$ . Для перехода к индексам 1,2,3 используем общее правило для пьезокерамики: направление приложения электрического поля, совпадающее в данном случае с направлением остаточной поляризации, обозначается  $X_3$  (ось  $Z$  цилиндрической системы координат); а индексам 1 и 2 будут соответствовать координаты  $r$  и  $\theta$  соответственно. Местные уравнения пьезоэффекта принимают вид

$$\left. \begin{aligned} u_{rr} &= s_{11}^E \sigma_{rr} + s_{12}^E \sigma_{\theta\theta} + d_{31} E_z \\ u_{\theta\theta} &= s_{12}^E \sigma_{rr} + s_{11}^E \sigma_{\theta\theta} + d_{31} E_z \\ D_z &= d_{31} (\sigma_{rr} + \sigma_{\theta\theta}) + \varepsilon_{33}^E E_z \end{aligned} \right\}. \quad (17)$$

Учитывая в уравнениях Ньютона, преобразованных в цилиндрической системе координат, условия  $\sigma_{zz} = \sigma_{r\theta} = \sigma_{rz} = \sigma_{\theta z} = 0$  и  $\xi_{\theta} = 0$ , получаем одномерное уравнение движения

$$\rho \frac{\partial^2 \xi_r}{\partial t^2} = \frac{\partial \sigma_{rr}}{\partial r} + \left( \frac{\sigma_{rr} - \sigma_{\theta\theta}}{r} \right). \quad (18)$$

Дифференциальное уравнение для смещения получим, подставляя в (18)  $\sigma_{rr}$  и  $\sigma_{\theta\theta}$  из (17)

$$\frac{1}{s_{11}^E (1 - \nu^2)} \left( \frac{\partial^2 \xi_r}{\partial t^2} + \frac{1}{r} \frac{\partial \xi_r}{\partial t} - \frac{\xi_r}{r^2} \right) = -\omega^2 \rho \xi_r, \quad (19)$$

где  $\nu = -s_{12}^E / s_{11}^E$  - коэффициент Пуассона,  $\xi_r = \xi_r e^{j\omega t}$ .

$$\frac{\partial^2 \xi_r}{\partial t^2} = \frac{1}{\rho s_{11}^E} \frac{\partial^2 \xi_1}{\partial x_1^2} = (\nu_1^E)^2 \frac{\partial^2 \xi_1}{\partial x_1^2}$$

## Методические указания к выполнению курсовой работы

### 1 ВВЕДЕНИЕ

Дисциплина “Электроакустические преобразователи” является базовой при подготовке бакалавров направления «Приборостроение» и инженеров специальности «Акустические приборы и системы».

Общеизвестно, что только звуковые волны могут распространяться в морской воде на очень большие расстояния и тем самым обеспечивать подводную локацию, связь, звуковидение и т.п. Организм человека по акустическим свойствам очень близок к воде. Именно поэтому ультразвуковые методы исследований нашли широкое применение как в диагностической, так и хирургической и терапевтической медицинской аппаратуре.

Основными элементами, начальным и конечным звеном приемопередающего тракта гидроакустической и медицинской ультразвуковой

аппаратуры являются электроакустические преобразователи (ЭАП), осуществляющие преобразование электрической энергии в акустическую, и/или акустической энергии в электрическую.

Широкое применение в диапазоне звуковых и ультразвуковых частот в настоящее время находят пьезоэлектрические ЭАП, так как именно они обеспечивают наибольшую эффективность аппаратуры при работе в режиме приема и излучения в различных диапазонах частот. Реже используются менее эффективные магнитострикционные ЭАП.

В режиме излучения в диапазоне инфразвуковых и низких звуковых частот нашли применение, наряду с пьезоэлектрическими, электромагнитные, электродинамические и гидравлические преобразователи.

Курсовая работа посвящена вопросам определения параметров и характеристик, а также анализу работы пьезоэлектрического преобразователя заданной конструкции. В настоящих методических указаниях излагается структура курсовой работы и рекомендации по её выполнению, рассмотрены примеры ЭАП.

## **2 ОБЩИЕ УКАЗАНИЯ ПО ВЫПОЛНЕНИЮ КУРСОВОЙ РАБОТЫ**

2.1. В соответствии с учебными планами направления 200100 объем самостоятельной работы над данной курсовой работой (включая ознакомление с соответствующей литературой) составляет 32 часа.

2.2. Исходя из этого времени и предельных сроков окончания работы, составлен календарный план выполнения этапов курсовой работы (приложение 1).

2.3. Исходные данные к курсовой работе выдаются студенту не позднее второй недели после начала семестра.

2.4. В процессе выполнения курсовой работы для студентов организуются консультации. В часы консультаций руководитель

рекомендует литературу по частным вопросам, контролирует выполнение календарного плана, проверяет правильность принятых решений и расчетов.

2.5. Законченная и оформленная курсовая работа сдается руководителю на проверку. Проверенная и подписанная работа допускается к защите.

### **3 ИСХОДНЫЕ ДАННЫЕ К КУРСОВОЙ РАБОТЕ**

3.1. Назначение ЭАП.

3.2. Резонансная частота  $f_0$ , кГц.

3.3. Ширина полосы пропускания  $\Delta f$  в процентах к  $f_0$ .

3.4. Режим работы: непрерывный, импульсный. Для импульсного режима длительность импульса посылки  $t_{\text{и}}$ , мс.

3.5. Глубина погружения ЭАП  $Z$ , м (для гидраакустических преобразователей).

3.6. Эффективное звуковое давление, создаваемое преобразователем на расстоянии  $r$  в направлении максимального излучения, Па.

3.7. Максимальное напряжение возбуждения  $U_{\text{э}}$ , В.

3.8. Максимально допустимая потребляемая электрическая мощность  $P_{\text{эл}}$ , Вт.

3.9. Минимальная чувствительность холостого хода (хх) на частоте электромеханического резонанса  $\gamma^{\text{ахх}}$ , мкВ/Па или чувствительность на низких частотах  $\gamma_{\text{нч}}$ .

### **4 ЗАДАНИЕ НА КУРСОВУЮ РАБОТУ**

4.1. В соответствии с исходными данными выбрать и обосновать:

4.1.1. Тип преобразователя.

4.1.2. Используемый для изготовления преобразователя материал.

4.1.3. Моду колебаний.

4.2. Выбрать и построить электрическую схему-аналог.

4.3. Определить параметры ЭАП на частоте механического и электромеханического резонансов.

4.4. Рассчитать частотные характеристики ЭАП в заданном диапазоне частот.

4.5. Провести анализ работы ЭАП.

4.6. Исследовать влияние изменения заданных конструктивных элементов на частотные зависимости излучаемой акустической мощности и чувствительности в режиме приема, а также другие характеристики ЭАП.

4.7. Дать рекомендации по применению рассчитанного преобразователя и сдать вывод о соответствии ЭАП назначению.

В качестве расчетных характеристик могут быть заданы излучаемая акустическая мощность  $P_a$ , чувствительность преобразователя в режиме холостого хода электрической стороны преобразователя  $\gamma_{ХХ}$  или заданной электрической нагрузки  $\gamma_{Н}$  (при этом указывается значение электрической нагрузки  $Z_H$ ), комплексное электрическое сопротивление  $Z$  или проводимость  $y$ , комплексное механическое сопротивление  $Z$  или проводимость  $y_m$ .

## 5 МЕТОДИЧЕСКИЕ УКАЗАНИЯ

5.1. Выбор типа преобразователя, моды колебаний и конструкции.

По способу преобразования электрической энергии в механическую (или обратно) современные ЭАП могут быть подразделены на пьезоэлектрические, электрохимические, гидравликоакустические, парогазоакустические, оптикоакустические и т.д. (1).

Анализируя задание на проектирование, исходя из назначения ЭАП, его резонансной частоты и режима работы, студенту необходимо выбрать наиболее приемлемый тип преобразования. Среди требований, предъявляемых к преобразователю, имеются и противоречивые, их надо решать на основе компромиссов. Чаще всего рассматривается несколько

вариантов решений и выбирается тот, который удовлетворяет заданным условиям с учётом себестоимости и трудоёмкости. В нашу задачу не входит рассмотрение экономических показателей, поэтому ограничимся чисто техническими характеристиками.

Как показано в (2), при работе активного элемента вне резонанса объективной характеристикой способа преобразования энергии является статический коэффициент электромеханической связи (КЭМС).

$$k = \frac{W_{эм}}{\sqrt{W_m \cdot W_э}},$$

где  $W_{эм}$  – плотность взаимной упругой (механической) и электрической энергии;

$W_m$  – плотность механической энергии;

$W_э$  – плотность электрической энергии.

В (3) приведено следующее определение: квадрат КЭМС – это отношение электрической (механической) работы, которая может быть при идеальных условиях, ко всей энергии, полученной от механического (электрического) источника.

При работе активного элемента на резонансе эффективность преобразования электрической энергии в механическую может быть охарактеризована с помощью значений удельной излучаемой мощности и механоэлектрического КПД  $\eta_{эм}$ .

Из (2) известно, что наибольшими значениями КЭМС, КПД и удельных излучаемых мощностей в настоящее время обладают ЭАП, активные элементы которых выполнены из пьезокерамики. Близкие к пьезокерамическим преобразователям значения  $k$ ,  $\eta_{эм}$  имеют магнитострикционные ферритовые преобразователи, однако они менее технологичны. Поэтому наибольшее применение в современной акустической практике находят именно пьезокерамические преобразователи.

Для обеспечения наибольшей эффективности активные элементы преобразователей в большей части случаев должны быть резонансными

системами. Для излучения высокой мощности при малых размерах преобразователей целесообразно использовать следующие формы колебаний:

- а) пульсирующие и осциллирующие и изгибные колебания тонких цилиндрических оболочек малой высоты;
- б) пульсирующие колебания тонких сферических оболочек;
- в) низшие формы продольных колебаний тонких длинных стержней;
- г) низшие формы изгибных колебаний опертых прямоугольных и круглых пластин.

Если заглубление системы не превышает 500 м, то можно использовать силовую конструкцию. При больших гидростатических давлениях необходимо корпус делать толстостенным либо использовать компенсированную конструкцию с жидкостным заполнением корпуса, в которой активный материал испытывает равномерное всестороннее сжатие забортного давления.

## 5.2. Выбор активного материала.

По назначению ГОСТ 13927-80 классифицирует пьезокерамические материалы на 4 функциональные группы (6,3 – с.41). Сравнительная оценка пьезоэлектрических материалов по эффективности приведена в (4, с.230-231, 8, с.156).

В зависимости от назначения ЭАП разработчик выбирает наиболее эффективный материал соответствующего класса.

К магнитострикционным материалам ЭАП предъявляют ряд требований, относящихся к их механическим, магнитным, магнитострикционным и электрическим свойствам. Сердечники изготавливают из магнитомягких материалов, характеризующихся малой коэрцитивной силой  $H_c$ .

Плотность и упругость материала сердечника определяют частоту преобразователя. Чем меньше скорость звука в материале, тем меньше размер сердечника для заданной частоты резонанса.

Удельное электрическое сопротивление  $\rho_{\text{Э}}$  определяет потери на токи Фуко. Эти потери также зависят от магнитной проницаемости  $\mu$ , так как при данной толщине пластины чем меньше отношение  $\mu/\rho_{\text{Э}}$ , тем меньше потери. Параметры магнитоэлектрических материалов, а также параметры эффективности преобразователей приведены в (5 – с. 169, 8 – с. 126-127).

5.3. Определение комплексного электрического сопротивления или проводимости преобразователя.

5.3.1. Выбор независимых переменных. Для описания состояния элементарного объёма пьезоэлектрика можно выбрать любую из четырёх форм записи местных уравнений пьезоэффекта:

$$\begin{cases} U_i = S_{ik} \delta_k + d_{ni} E_n \\ D_n = d_{n\delta} \delta + \epsilon_{nm} E_m \end{cases}$$

$$\begin{cases} \delta_k = C_{ik} U_i - e_{ni} E_n \\ D_n = e_{ni} U_i + \epsilon_{nm} E_m \end{cases}$$

$$\begin{cases} U_i = S_{ik} \delta_k + g_{ni} D_n \\ E_n = -g_{n\delta} \delta + \beta_{nm} D_m \end{cases}$$

$$\begin{cases} \delta_k = C_{ik} U_i - h_{ni} D_n \\ E_n = -h_{ni} U_i + \beta_{nm} D_m \end{cases}$$

где  $D_n$  – компоненты вектора электрической индукции;  $E_n$  – компоненты вектора напряжённости электрического поля;  $\delta_k$  – компоненты 6-мерного вектора механических напряжений;  $U_i$  – компоненты 6-мерного вектора относительных деформаций;

$S_{ik}$  – модули упругих податливостей, измеренные при  $E = \text{const}$  (символ  $E$ ) или  $D = \text{const}$  (символ  $D$ );  $\epsilon_{nm}^{\delta'u}$  – диэлектрические проницаемости свободного (символ  $\delta$ ) или зажатого (символ  $u$ ) пьезоэлектрика;  $d, g, e, h$  –

пьезоэлектрические модули. Индексы  $i, k$  принимают значения от 1 до 6, индексы  $m, n$  от 1 до 3.

Выбор независимых механических переменных ( $U$  или  $\delta$ ) определяется механическими условиями в направлениях, поперечных колебательному движению. В случае низкочастотных мод элементарный объем считается свободным ( $\delta=0$ ) в поперечном направлении и в качестве независимой механической переменной выбирают  $U$ . На высокочастотных модах элементарный объем зажат ( $U=0$ ) в поперечном направлении и независимой механической переменной является  $\delta$ .

Для выбора независимых электрических переменных оценивают электрические граничные условия в направлениях одномерного линейного или планарного колебательного движения. Электрические граничные условия определяются расположением поверхностей электродов и формой тела.

Для пьезомягких мод поверхности электродов перпендикулярны направлению колебаний  $E_1=E_2=0$ ,  $dE_3/dx_1=0$ . Независимой электрической переменной следует выбирать  $E$ . В этом случае мгновенное значение  $E$  будет определять мгновенное распределение функции  $D_3$  в направлении колебаний. Для пьезожестких мод поверхности электродов параллельны направлению колебаний,  $D_1=D_2=0$  и  $dD_3/dx_3=0$ , следовательно, в качестве независимой переменной следует выбирать  $D$ .

Механическими напряжениями вдоль малых поперечных размеров можно пренебречь и из 6 компонент механических напряжений ненулевой остается одна – вдоль длины стержня. Тогда для тонкого стержневого преобразователя из поликерамики колеблющегося по длине поля, перпендикулярно его длине, используют уравнения:

$$\begin{cases} U_i = S_{ij} E_j + d_{ik} E_k \\ D_i = d_{ik} \delta_k + \epsilon_{ij} E_j \end{cases}$$

Для такого же стержня, в диэлектрическом поле параллельно длине, используются уравнения

$$\begin{cases} UB = S^E \mathfrak{B} + d^E \mathfrak{E} \\ DB = d^E \mathfrak{B} + \epsilon^E \mathfrak{E} \end{cases}$$

При этом считается, что ось  $x_3$  для поликерамики совпадает с направлением остаточной поляризации.

Поляризованный (намагниченный) постоянным магнитным полем магнитострикционный материал и пьезомагнитная керамика ведет себя по отношению к малым переменным магнитным полям как истинный пьезомагнетик; уравнения состояния записываются также, как и уравнения (1-4), с той лишь разницей, что все электрические величины ( $E, D, \epsilon$ ) заменяются на магнитные ( $H, B, \mu$ ). Например уравнения вида (1) и (4) для пьезомагнитной керамики имеют вид (9):

$$\begin{cases} U_p = S^H p g \delta g + \lambda_{jp} H_j \\ B_j = \mu_{ij} H_j + \lambda_{ij} q \delta g \\ \delta p = C^B p g U g - \alpha_{jp} B_j \\ H_i = \gamma_{ij} B_j - \alpha_{ij} U g \end{cases}$$

где  $H_i$  и  $B_i$  – составляющие векторов напряженности и индукции магнитного поля;  $\mu_{ij}$  – компоненты тензора магнитной проницаемости;  $\gamma_{ij}$  – компоненты тензора магнитной непроницаемости;  $\lambda_{jp}$ ,  $\alpha_{jp}$  – компоненты прямоугольных матриц (3x6) пьезомагнитных коэффициентов. Остальные обозначения соответствуют введённым ранее. Следует подчеркнуть, что в уравнения (5) и (6) входят лишь малые переменные составляющие величин  $H, B, \delta, U$ , а не их суммарные значения  $H = H_0 + H_{\sim}$ ,  $B = B_0 + B_{\sim}$  и т.д. Необходимо также помнить, что параметры  $C_{pg}$ ,  $S_{pq}$ ,  $\mu_{ij}$ ,  $\gamma_{ij}$ ,  $\lambda_{ij}$ ,  $\alpha_{ip}$ , а также коэффициент электромеханической связи  $k_i^2 = 1 - \mu_{ip}^{up} / \mu_{ii}^{\delta p}$  определяется не только

свойствами, но и величиной поляризующего поля  $H_0$ . В справочнике приводится напряжённость  $H_0$  оптимального поля подмагничивания, и значения упругих, электрических, магнитоэлектрических констант при данном подмагничивающем поле.

Выбор независимых механических и магнитных переменных для магнитоэлектрических преобразователей аналогичен описанному для пьезоэлектрических преобразователей.

Для конкретизации уравнений состояния необходимо выявить отличные от нуля компоненты механических и электрических воздействий на элементарный объём.

Например, для магнитоэлектрических стержневых или кольцевых преобразователей, поперечные размеры которых малы по сравнению с длиной упругой волны в материале магнитопровода, можно пренебречь всеми напряжениями  $\delta_g$ , кроме напряжения  $\delta_z$ , действующего нормально к плоскости поперечного сечения стержня (кольца). Уравнения (5) при этом упрощаются и имеют вид

$$\begin{cases} UB = S^H_{33} \delta_z + \lambda_{33} H_z \\ B = \mu_{33}^{\delta} \delta_z + \lambda_{33} H_z \end{cases}$$

Ось  $x_3$  совпадает с направлением поляризующего поля  $H_0$ . (Часто в литературе (4, 8) опускают совпадающие индексы, т.к. технически используют только линейный магнитоэлектрический эффект, т.е. деформацию ферромагнитного тела в направлении силовых линий магнитного поля, в которое помещено это тело).

5.3.2. При анализе работы и расчете пьезоэлектрических преобразователей уравнения пьезоэффекта (1-4) должны быть дополнены некоторыми соотношениями теории электромагнитного поля. В частности, необходимо уравнение  $div \vec{D} = Q_{об}$ , где  $Q_{об}$  – объёмная плотность свободных

электрических зарядов в пьезоэлектрике, причём в большинстве случаев (исключая пьезополупроводниковые материалы) можно полагать  $Q_{об}=0$ .

Соотношение  $D_n=Q_{пов}$ , вытекающее из граничных условий на границах раздела диэлектриков, позволяет получить выражение для электрического тока  $I$ , протекающего через преобразователь,

$$I = \int_S \frac{dQ_n Q_n}{dt} dS = j\omega \int_S D_n dS, \quad (8)$$

где  $D_n$  – нормальная компонента вектора  $\vec{D}$  у поверхности электрода,  $Q_{пов}$  – поверхностная плотность свободных зарядов на электродах,  $S$  – площадь электрода.

Наконец, для равенности потенциалов между электродами имеем

$$v = \int_L \vec{E} d\vec{l}, \quad (9)$$

контурный интеграл взят вдоль линии  $L$ , соединяющей электроды.

Большинство используемых типов пьезопреобразователей работает на таких частотах, при которых расстояние  $d$  между электродами оказывается малым по сравнению с длиной упругой волны (пьезомягкие моды колебаний). Тогда электрическое поле  $\vec{E}$  зависит от пространственных координат, и (9) сводится к  $\mathbf{v}=\mathbf{E}d$ . Однако для пьезожёстких мод колебаний подобное упрощение несправедливо.

С помощью уравнения  $div \vec{D} = 0$  можно показать, что для пьезоэлектрических мод колебаний (а также сферических и коротких цилиндрических, преобразователей, совершающих радиальные колебания), электрическое смещение  $\vec{D}$  одинаково во всём объёме пьезоэлектрика. Это приводит к упрощению отношения (8) и позволяет записать его в виде  $I=j\omega D_n S$ .

Для решения задач, связанных с анализом и расчётом магнитострикционных преобразователей, необходимо, кроме уравнений пьезомагнетизма (5) - (6), а также привлечь уравнения электромагнитного поля. Обычно используют закон электромагнитной индукции и закон полного тока

$$v = -n \frac{d\Phi}{dt} \oint_L \vec{H} d\vec{l} = \int_S \vec{j}_{np} dS, \quad (10)$$

где  $\vec{j}_{np}$  - вектор плотности тока проводимости, определяемый током в обмотке преобразователя и вихревыми токами в магнитопроводе. Если преобразователь работает на достаточно низких частотах, при которых размеры поперечного сечения вибратора малы по сравнению с глубиной проникновения электромагнитного поля в материал магнитопровода, можно пренебречь вихревыми токами проводимости в магнитопроводе и неравномерностью распределения магнитного потока  $\Phi$  по его поперечному сечению. Тогда из (10) получим

$$v_{\text{инд}} = -j\omega n S B_3; \quad \oint_L \vec{H} d\vec{l} = nI, \quad (11)$$

где  $n$ ,  $I$  – число витков и ток в обмотке преобразователя,  $S$  – площадь поперечного сечения магнитопровода,  $L$  – замкнутый контур, образованный средней линией магнитного поля.

Для цилиндрического преобразователя, совершающего радиальные колебания, контур  $L$  совпадает со средней окружностью кольца, а поле  $H_3 = H_0$  не зависит от угловой координаты  $\theta$ , поэтому закон тока может быть записан в более простой форме:

$$nI = \oint_L \vec{H} d\vec{l} = \int_0^{2\pi} H_3 R d\theta = 2\pi R H_3, \quad (12)$$

где  $R$  – средний радиус кольцевого магнитопровода.

5.3.3. Дифференциальное уравнение для смещения элементарного объёма получают, подставляя в уравнение движения элементарного объёма

$$\rho \frac{\partial^2 \xi}{\partial t^2} = \frac{\partial \delta_i}{\partial x_i} \quad (13)$$

Значение механического напряжения  $\delta_i$  из уравнения состояния (1) – (4) для пьезоэлектрических преобразователей или (5) – (7) для магнотриксционных, где  $\rho$  – плотность материала,  $\xi$  – смещение. Полученное дифференциальное уравнение аналогично чисто механическому уравнению колебаний. Решая его относительно  $\xi$ , находим распределение смещения в колеблющемся преобразователе. Используя (8) или (9) для

пьезоэлектрических и (11) или (12) магнитострикционных преобразователей, определяем ток (для пьезомягких мод колебаний) или напряжение (для пьезожёстких мод) и, соответственно, проводимость  $U$  или сопротивление преобразователя  $Z$ .

5.3.4. В качестве примера решения электромеханической задачи для одномерных мод колебаний рассмотрим планирную моду колебаний пьезокерамического диска (рис. 1).

Рис.1.Цилиндрическая система координат, применяемая для описания мод тел вращения, у которых учитывается радиальное распределение смещения

Это пьезомягкая низкочастотная мода колебаний, следовательно, в качестве независимых переменных целесообразно выбрать напряжённость электрического поля и механические напряжения  $E, \delta$ , а уравнения состояния в форме (1).

Для пьезоэлектрической керамики ось  $x_3$  практически всегда выбирается по направлению остаточной поляризации и является осью симметрии бесконечного порядка. По характеру симметрии керамика относится к поперечно-изотопным средам, а соответствующая матрица упругих, диэлектрических и пьезоэлектрических модулей имеет вид

$$\begin{array}{cccccc|ccc}
 S_{11} & & S & S & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & d \\
 & & 12 & 13 & & & & & & 31 \\
 S_{12} & & S & S & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & d \\
 & & 11 & 13 & & & & & & 31 \\
 S_{13} & & S & S & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & d \\
 & & 13 & 33 & & & & & & 33 \\
 0 & & 0 & 0 & S & 0 & 0 & 0 & d & 0 \\
 & & & & & & & & & 44 \\
 0 & & 0 & 0 & 0 & S & 0 & d & 0 & 0 \\
 & & & & & & & & & 15
 \end{array}$$

0	0	0	0	0	0	S	0	0	0
0	0	0	0	d	0	0	ε	0	0
0	0	0	d	0	0	0	0	ε	0
d <sub>31</sub>	d	d	0	0	0	0	0	0	ε

$$S_{66}=2(S_{11}-S_{12})$$

При анализе работы цилиндрических, а также сферических пьезокерамических преобразователей необходимо помнить, что кристаллографические оси ориентированы в различных точках цилиндра (сферы) неодинаково. По существу это означает, что управления пьезоэффекта (1) – (4) для таких преобразователей связывают между собой не декартовы компоненты векторов E, D и тензорных величин U, δ, а их составляющие в цилиндрической или сферической системе координат. Индекс “3” соответствует координате Z цилиндрической системы координат, индекс “1” – координате r, “2” – координате θ.

Тогда местные уравнения пьезоэффекта записываются в виде:

$$\begin{cases} U_{rr} = S_{11}^E \delta_{rr} + S_{12}^E \delta_{\theta\theta} + d_3^E E_z \\ U_{\theta\theta} = S_{12}^E \delta_{rr} + S_{11}^E \delta_{\theta\theta} + d_3^E E_z \\ D_z = d_3^E (\delta_{rr} + \delta_{\theta\theta}) + \epsilon_{33}^E E_z \end{cases} \quad (14)$$

Учитывая в уравнениях Ньютона, преобразованных в цилиндрической системе координат, условия  $\delta_{22} = \delta_{2\theta} = \delta_{r\theta} = \delta_{\theta z} = 0, \xi_\theta = 0$ , получаем одномерное уравнение движения

$$\rho \frac{\partial^2 \xi_z}{\partial t^2} = \frac{\partial \delta_{rr}}{\partial r} + \frac{\delta_{rr} - \delta_{\theta\theta}}{r} \quad (15)$$

Дифференциальное уравнение для смещения получают подстановкой в (15)  $\delta_{rr}$  и  $\delta_{\theta\theta}$  через  $U_{rr}$  и  $U_{\theta\theta}$  из (14):

$$\frac{1}{S_{11}(1-\nu^2)} \left( \frac{\partial^2 \xi_r}{\partial r^2} + \frac{1}{r} \cdot \frac{\partial \xi_r}{\partial r} - \frac{1}{r^2} \xi_r \right) = \omega^2 \rho \xi_r,$$

где  $\nu = -S_{12}^E / S_{11}^E$  - коэффициент Пуассона,  $\xi_r = \xi_{rm} e^{j\omega t}$ .

Уравнение можно преобразовать к виду

$$r^2 \frac{\partial^2 \xi_r}{\partial r^2} + r \frac{\partial \xi_r}{\partial r} + \left( \frac{r^2 \omega^2}{\nu^2} - 1 \right) \xi_r = 0, \quad (16)$$

где  $\nu = \left[ \rho S_{11}^E (1 - \nu^2) \right]^{-1/2}$  - скорость распространения колебаний. Решение

этого уравнения записывается в виде

$$\xi_r = A J_1 \left( \frac{\omega r}{\nu} \right) e^{j\omega t}, \quad (17)$$

где,  $J_1(\omega r / \nu)$  - функция Бесселя первого рода первого порядка;  $A$  - постоянная интегрирования.

На границах ( $r=a$ ) свободно колеблющегося диска  $\delta_{rr}=0$ , следовательно,

$$A = \frac{d_{31} E (1 + \nu)}{B}, \quad (18)$$

где  $B = \frac{\omega}{\nu} J_0 \left( \frac{\omega a}{\nu} \right) - \frac{1 - \nu}{a} J_1 \left( \frac{\omega a}{\nu} \right)$ ,  $J_0 \left( \frac{\omega a}{\nu} \right)$  - функция Бесселя первого рода

нулевого порядка.

Окончательное выражение для смещения

$$\xi_r = \frac{d_{31} (1 + \nu)}{B} J_1 \left( \frac{\omega a}{\nu} \right) e^{j\omega t}. \quad (19)$$

Из (8) выражение для тока имеет вид

$$I = j\omega \int_0^{2\pi} d\theta \int_0^a Dzrdr. \quad (20)$$

Распределение  $Dz$  получают из (14) с учётом (19):

$$Dz = \left[ \varepsilon_{33}^{\delta} - \frac{2d_{31}^2}{S_{11}(1-\nu)} \right] E_z + \frac{d_{31}^2 (1 + \nu)}{S_{11}(1-\nu) \cdot B} \cdot \frac{\omega}{\nu} J_0 \left( \frac{\omega r}{\nu} \right) E_z. \quad (21)$$

Подстановка (21) в (20) и интегрирование дают

$$I = Ez \left[ j\omega \pi a^2 \varepsilon_{33}^{\delta} (1 - k_p^2) + j\omega \pi a^2 \varepsilon_{33}^{\delta} k_p^2 \cdot \frac{(1 + \nu) J_1\left(\frac{\omega a}{v}\right)}{Ba} \right], \quad (22)$$

где,  $k_p^2 = \frac{2d_{31}^2}{S_{11}(1 - \nu)\varepsilon_{33}^{\delta}}$  - планарный коэффициент связи материала.

Выражение для комплексной проводимости легко получить из (22).

$$Y = j\omega \frac{\pi a^2}{t} \varepsilon_{33}^{\delta} (1 - k_p^2) + j\omega \frac{\pi a^2}{t} \varepsilon_{33}^{\delta} k_p^2 \cdot \frac{(1 + \nu) \cdot J_1(\varphi)}{\varphi J_0(\varphi) - (1 - \nu) J_1(\varphi)}, \quad (23)$$

где  $\varphi = \omega a / v$ .

#### 5.4. Построение эквивалентной схемы преобразователя

Для анализа характеристик преобразователей во всех случаях решаются уравнения их движения с учётом уравнений состояния и реакции среды на движение активного элемента. Получение решения обычно отображаются в виде эквивалентных электромеханических схем, по которым могут быть определены все искомые акустические характеристики. Построение эквивалентных схем основано на использовании метода электромеханических аналогий (2).

5.4.1. В рамках первой системы электромеханических аналогий эквивалентной схемой n-стороннего преобразователя является электрический 2n-полюсник. Характерной особенностью эквивалентных схем является наличие идеального электромеханического трансформатора, связывающего механическую и электрическую стороны, для ёмкостных преобразователей, и для индуктивных – электромеханического гиратора (10).

Коэффициент трансформации равен коэффициенту электромеханической связи по напряжению  $K_V = (F/v)_{v=0}$ , т.е. отношению внешней статической силы к генерируемому его внешнему электрическому напряжению на преобразователе, зажатом в направлении колебаний рассматриваемого вида ( $v=0$ ). Коэффициент гирации равен коэффициенту электромеханической связи по току  $K_I = (F/I)_{v=0}$ , т.е. отношению статической

внешней силы к току, возникающему на электрической стороне преобразователя при торможении его механической стороны.

Схемы-аналоги для преобразователей ёмкостного и индуктивного типа с двумя механическими сторонами изображены на рис. 2 и 3.

Рис.2. Схема-аналог преобразователя емкостного типа.

Схема-аналог преобразователя индуктивного типа.

Преобразователи с двумя механическими сторонами в общем случае можно характеризовать следующими шестью параметрами:

- собственным электрическим сопротивлением  $Z_0$  (или проводимостью  $Y_0$ ) в режиме торможения механических сторон

$$Z_0 \equiv \frac{v}{I} | v_1 = v_2 = 0; Y_0 = 1/Z_0; \quad (24)$$

- коэффициентом электромеханической трансформации  $K_v$  (или  $K_I$ )

$$K_v = \frac{F_1}{v} | v_1 = v_2 = 0; K_I = \frac{F_1}{I} | v_1 = v_2 = 0; K_I = K_v \cdot Z_0; \quad (25)$$

- коэффициентом механической трансформации

$$N = \frac{F_2}{F_1} | v_1 = v_2 = 0; \quad (26)$$

собственными механическими сопротивлениями  $z_1, z_2, z_k$  (или  $z_x$ )

$$\begin{aligned} \mathfrak{Z}_k &= \frac{1}{N} \left( \frac{F_1}{v_2} \right)_{v_1} = v = 0; \quad \mathfrak{Z}_k = \frac{1}{N} \left( \frac{F_1}{v_2} \right)_{v_1} = I = 0; \\ \mathfrak{Z}_k + \mathfrak{Z}_1 &= \left( \frac{F_1}{v_1} \right)_{v_2} = v = 0; \quad \mathfrak{Z}_k + \mathfrak{Z}_2 = \frac{1}{N^2} \left( \frac{F_2}{v_2} \right)_{v_1} = v = 0; \\ \mathfrak{Z}_x + \mathfrak{Z}_1 &= \left( \frac{F_1}{v_1} \right)_{v_2} = I = 0; \quad \mathfrak{Z}_k + \mathfrak{Z}_2 = \frac{1}{N^2} \left( \frac{F_2}{v_2} \right)_{v_1} = I = 0. \end{aligned} \quad (27)$$

Соотношения (24) – (27) следует рассматривать как определения параметров преобразователя и использовать при расчётах параметров конкретных конструкций. Напомним, что параметры  $\mathfrak{Z}_k$  и  $\mathfrak{Z}_x$  связаны соотношениями (10)

$$\mathfrak{Z}_x = \mathfrak{Z}_k \pm K_v^2 / Y_0; \quad \mathfrak{Z}_k = \mathfrak{Z}_x \mp K_x^2 / Z_0$$

Верхний знак относится к преобразователям емкостного типа, а нижний – индуктивного. Эти соотношения позволяют построить модифицированные схемы-аналоги.

Среди преобразователей с двумя механическими сторонами наибольшее применение нашли симметричные преобразователи, причём речь идёт о симметрии конструкции преобразователя. При этом внешние механические стороны, могут быть совершенно различными. Примерами симметричных преобразователей являются стержневые магнитострикционные и пьезоэлектрические преобразователи, пьезоэлектрические пластины и т.д.

Для симметричных преобразователей схема-аналог также должна иметь симметричный вид. Для этого необходимо положить  $N=I$ ,  $\mathfrak{Z}_1 = \mathfrak{Z}_2 = \mathfrak{Z}$ .

Рис.4. Полная модифицированная схема-аналог симметричного преобразователя емкостного типа

Рис.5. Полная модифицированная схема-аналог симметричного преобразователя емкостного типа

Симметричные преобразователи имеют только четыре параметра: собственное электрическое сопротивление  $Z_0$  (или проводимость  $Y_0$ ), коэффициент электрической трансформации  $K_v$  (или гирации  $K_I$ ), собственные механические сопротивления  $\mathfrak{Z}$  и  $\mathfrak{Z}_x$  (или  $\mathfrak{Z}_x$ ).

Для учёта взаимодействия преобразователя с внешними электрическими цепями и механическими системами все рассмотренные схемы-аналоги должны быть дополнены эквивалентными электрическими и механическими генераторами. На рис. 4, 5 представлены полные схемы-аналоги преобразователя, учитывающие его взаимодействие с внешними

электрическими и механическими системами. При работе преобразователя в режиме приёма звуковых волн (механических колебаний) величина  $v_0 = 0$ , а в режиме излучения  $F_0=0=F_0'$ .

5.4.2. Использование схем-аналогов для расчёта характеристик конкретных преобразователей предусматривает предварительный теоретический расчёт или экспериментальное определение их параметров (11). Рассмотрим методику теоретического расчёта параметров преобразователя на примере пьезоэлектрической пластинки.

Пьезоэлектрический преобразователь-пластинка схематично изображён на рис. 6. Там же показана использованная в расчётах система координат  $x_1, x_2, x_3$ . Обозначим толщину, длину и ширину пластинки символами  $l, a$  и  $b$ , соответственно, причём полагаем  $a, b \gg l$

Рис. 6. Пьезоэлектрический преобразователь-пластинка

Рассмотрим работу преобразователя на достаточно высоких частотах, когда  $a, b \gg \lambda$ , где  $\lambda$  – длина упругой волны в материале пластинки. В этом случае обычно полагают, что все деформации пластинки, за исключением продольной деформации  $U_3$  малы и ими можно пренебречь. Из рисунка ясно также, что единственной отличной от нуля компонентой электрического поля внутри пластинки является  $E_3$ . Таким образом, уравнение пьезоэффекта для пластинки можно записать в виде

$$\begin{cases} \delta_3 = \mathcal{C}_{33} U_3 - e_{33} E_3, \\ D_3 = \mathcal{E}_{33} E_3 + e_{33} U_3. \end{cases} \quad (28)$$

В соответствии с (24) параметр  $Y_0$  определяется просто:

$$Y_0 = \frac{I}{v} \Big|_{v_1=v_2=0} = j\omega \frac{\varepsilon S}{l}; \quad S = a \cdot b, \quad (29)$$

где действующая диэлектрическая проницаемость  $\varepsilon$  должна быть найдена из уравнений (28) при условии  $v_1=v_2=0$ . Поскольку последнее условие  $U_3=0$ , находим  $\varepsilon = \varepsilon_{33}^U$ .

Параметр  $K_v$  легко получить на основе граничных условий на рабочих поверхностях пластины

$$F_{1,2} = -\delta_3 S,$$

которое при  $v_1=v_2=0$  (следовательно, и  $U_3=0$ ) с помощью первого из уравнений (28) сводится к виду

$$F_{1,2} = e_{33} E_3 S.$$

Учитывая далее, что при  $U_3=0$  напряжение  $v = E_3 l$ , получаем в соответствии с определением (25)

$$K_v = \frac{F_1}{v} \Big|_{v_1=v_2=0} = \frac{e_{33} S}{l}. \quad (30)$$

Прежде чем приступить к расчёту собственных механических сопротивлений, следует разобраться в вопросе о том, какой режим электрической стороны обеспечивает простоту и удобство расчёта. Вектор электрического смещения  $\vec{D}$  внутри пластинки должен удовлетворять условию (предполагается, что материал пьезопластинки является хорошим диэлектриком и не содержит свободных электрических зарядов)

$$\text{div } \vec{D} = \frac{\partial D_1}{\partial x_1} + \frac{\partial D_2}{\partial x_2} + \frac{\partial D_3}{\partial x_3} = 0. \quad (31)$$

Поскольку в рассматриваемом преобразователе все величины обычно считаются от координат  $x_1$  и  $x_2$ , из уравнения (31) следует независимость  $D_3$  от координаты  $x_3$ . Тогда из второго уравнения системы (28) вытекает, что поле  $E_3$  зависит от координаты  $x_3$ , так как при колебаниях пластинки деформация  $U_3$  изменяется вдоль её толщины. Таким образом, становится ясным, что режим короткого замыкания мало удобен для расчётов. В этом режиме выполняется соотношение (9), но не обеспечивается условие  $E_3=0$  и не упрощается уравнение (28). Иная ситуация в режиме холостого хода электрической стороны. Для рассматриваемого преобразователя  $D_3$  не

зависит от координат, поэтому  $I=j\omega D_3 S$  и, следовательно,  $D_3=0$  при  $I=0$ . Полагая  $D_3=0$  в уравнениях (28) и исключая из них поле  $E_3$ , находим соотношение типа закона Гука.

$$\delta_3 = \left( C_{33}^E + \frac{l_{33}^2}{\epsilon_{33} U} \right) U_3 = C_{33}^D U_3,$$

которое является уравнением состояния для пьезопластинки в режиме холостого хода. Другими словами, при работе в этом режиме пьезопластинка становится однородной по своим упругим свойствам, так как коэффициент пропорциональности  $C_{33}^D$  между напряжением  $\delta_3$  и деформацией  $U_3$  не зависит от координат.

Из теории толщинных колебаний однородных пластин, подчиняющихся закону Гука, известно, что

$$\frac{F_1}{v_1} \Big|_{v_1=0} = -j\rho C_{33} S \operatorname{ctg} kl; \quad \frac{F_1}{v_1} \Big|_{F_2=0} = j\rho C_{33} \operatorname{tg} kl, \quad (32)$$

где  $k=\omega/C_{zv}$  – волновое число;  $\rho$  – плотность пластинки, а скорость распространения упругих волн  $C_{33} = \sqrt{A/\rho}$ ;  $A$  – действующий модуль упругости. Применительно к данному случаю

$$A = C_{33}^D; \quad C_{33} = \left( C_{33}^D / \rho \right)^{1/2}.$$

С другой стороны, из схемы-аналога на рис.4 при  $I=0$  вытекает

$$\frac{F_1}{v_1} \Big|_{v_2=0} = \mathfrak{S} + \mathfrak{S}_k; \quad \frac{F_1}{v_1} \Big|_{F_2=0} = \mathfrak{S} + \frac{\mathfrak{S} \cdot \mathfrak{S}_x}{\mathfrak{S} + \mathfrak{S}_x}. \quad (33)$$

Объединяя соотношения (32) и (33), получаем систему уравнений для расчёта  $\mathfrak{S}$  и  $\mathfrak{S}_x$ :

$$\begin{cases} \mathfrak{S} + \mathfrak{S}_x = -j\rho C_{33} S \operatorname{ctg} kl \\ \mathfrak{S} + \frac{\mathfrak{S} \cdot \mathfrak{S}_x}{\mathfrak{S} + \mathfrak{S}_x} = j\rho C_{33} S \operatorname{tg} kl \end{cases}$$

Решение этой системы даёт следующие результаты:

$$\mathfrak{S} = j\rho C_{33} S \operatorname{tg} \frac{kl}{2}; \quad \mathfrak{S}_x = \frac{\rho C_{33} S}{j \operatorname{Sinkl}}. \quad (34)$$

Таким образом, схема-аналог преобразователя-пластинки с учётом конкретных выражений для его параметров приобретает вид, показанный на рис.7.

Рис.7. Схема-аналог и параметры пьезоэлектрического преобразователя-пластинки

5.4.3. В представленных эквивалентных системах для учёта потерь следует ввести комплексные константы  $S$ ,  $\epsilon$ ,  $d$  (3), либо, принимая силы, связанные с наличием механических потерь, пропорциональными колебательной скорости, последовательно с сопротивлениями  $\mathfrak{Z}$ , - эквивалентные сопротивления  $r_{mn}$ . Во втором случае для учёта электрических потерь следует ввести сопротивление электрических потерь  $R_0$ . Выражения для вычисления сопротивлений потерь имеют вид (12):

$$r_{mn} = \frac{\rho C_{33} \cdot S}{Q_M} \cdot \frac{kl}{4 \sin^2 \frac{kl}{2}}; \quad R_0 = \frac{1}{\omega C_0 \operatorname{tg} \delta}, \quad (35)$$

где  $Q_M$  – механическая добротность материала;  $C_0$  – ёмкость заторможенного преобразователя;  $\delta$  – угол диэлектрических потерь.

Выражения для сопротивлений электрических и механических потерь магнитострикционных преобразователей имеют аналогичный вид (11) с соответствующей заменой параметров.

5.5. Определение параметров ЭАП на частоте механического резонанса.

Упростим эквивалентную схему преобразователя с распределёнными параметрами (13). Рассмотрим участок схемы, изображённой на рис.7 (рис.8) (аналогичные преобразования будут справедливы и для других эквивалентных схем).

Определим, при каких соотношениях сопротивлений  $Z_1$ ,  $Z_2$  и  $Z_a$ ,  $Z_b$  обе схемы окажутся эквивалентными.

Режим холостого хода: сопротивление со стороны входа (клеммы 1-2)

$$Z_2 = \frac{1}{m^2}(Z_a + Z_b).$$

Рис.8. К пояснению метода упрощения эквивалентных схем

Сопrotивление со стороны выхода (клеммы 3-4)

$$Z_1 + Z_2 = Z_b.$$

Режим короткого замыкания (клеммы 3-4 замкнуты), сопротивление со стороны входа (клеммы 1-2)

$$\frac{Z_1 \cdot Z_2}{Z_1 + Z_2} = \frac{Z_a}{m^2}.$$

Сопrotивление со стороны входа (клеммы 1-2 замкнуты)

$$Z_1 = \frac{Z_a \cdot Z_b}{Z_a + Z_b}.$$

Полагая  $Z_1, Z_2$  известными, определим

$$Z_a = \frac{Z_1(Z_1 + Z_2)}{Z_2}, \quad m = \frac{Z_1 + Z_2}{Z_2}, \quad Z_b = \frac{Z_1(Z_1 + Z_2)}{Z_1};$$

при  $Z_1 = Z_2 = Z, Z_a = Z_b = 2Z$  и  $m = 2$ .

Таким образом, схема, изображённая на рис.7, может быть последовательно приведена к виду, показанному на рис.9.

Рис.9. К пояснению упрощения эквивалентной схемы

В области частот, ниже резонансной  $f_0$  примерно в 5 раз и более,  $kl/2$  мало, так что возможна замена

$$\operatorname{tg} \frac{kl}{2} \approx \frac{kl}{2}, \quad \operatorname{Sinkl} \approx kl.$$

Тогда в схеме рис.9

$$j\rho C_{33} \operatorname{Stg}\left(\frac{\operatorname{tg}}{2}\right) \approx j\rho C_{33} S \cdot \frac{\omega l}{2C_{33}} = j\rho\omega \frac{Sl}{2} = j\omega \frac{m}{2},$$

где  $m$  – масса пластинки;

$$j\rho \frac{C_{33} S}{\operatorname{Sinkl}} = -j \frac{C_{33} S^2 \rho}{\omega l} = -j \frac{1}{\omega C_m}.$$

где  $C_m$  – эквивалентная гибкость пластинки.

В результате Т-образное звено схемы, показанной на рис.7, упрощается вследствие введения эквивалентной массы и эквивалентной гибкости (рис.10).

Рис.10. Различные варианты упрощения эквивалентной схемы преобразователя

На частотах в области резонанса, когда колебательный размер стержня хотя и сравним, но остаётся меньше длины волны в материале, из которого сделан стержень, более точные результаты получаются в случае замены функции синус не аргументом, а двумя членами разложения её в ряд. Т-образное звено превращается в обозначенное на рис.10 б, в его общую ветвь последовательно добавляется ещё одна эквивалентная масса -  $j\omega \frac{m}{6}$ .

Вблизи основного резонанса для частот примерно  $f_0 \pm 0,7 f_0$  неплохие данные (с погрешностью не более 20%) получаются в результате расчёта с применением упрощения, показанного на рис.10в, - комбинация последовательного и параллельного соединения эквивалентных масс и гибкостей. В диапазоне указанных частот импеданс параллельного контура обычно достаточно велик в сравнении с импедансом механических нагрузок, поэтому в большинстве случаев им можно пренебречь.

Непременным условием применяемой теории расчёта преобразователей является одномерность их физических моделей. Предполагается, что резонансные (колебательные) размеры у преобразователей должны быть значительно больше остальных. Расчётные соотношения дают приемлемые результаты, Когда резонансный размер стержня превышает размеры поперечного сечения, по крайней мере, в 1,5-2 раза. Высота цилиндра должна быть также примерно в 1,5-2 раза меньше резонансного размера, а толщина его стенки составлять не более четверти диаметра. При несоблюдении соотношений размеров возможно возникновение значительных завязок между колебательными движениями в

различных направлениях, причём, подчёркивание нежелательных колебаний может обуславливаться анизотропией свойств материалов в различных направлениях: пьезомодулей, скоростей, упругих констант и т.д.

Рассматривая эквивалентную схему преобразователя, нагруженного на воду, в области частот, близких к резонансу (рис.11), можно легко записать выражение для колебательной скорости излучающей поверхности преобразователя

$$v = \frac{2K_v v}{\left[ r_{mn} + 2r_s - j2\rho C_{36} S \operatorname{ctg} \frac{kl}{2} + j \frac{4k_v^2}{\omega C_0} \right]} \quad (36)$$

Излучаемая акустическая мощность связана с колебательной скоростью соотношением

$$P_a = \frac{1}{2} |v|^2 r_s, \quad (37)$$

где  $r_s$  – сопротивление излучения преобразователя. Условие максимума излучаемой мощности (или максимальное значение колебательной скорости  $v$ ) позволяет получить выражение для определения резонансного размера ЭАП

$$\omega C_0 = 2K_v^2 \operatorname{tg}(\omega l / 2C_{36}) / \rho C_{36} S. \quad (38)$$

Рис.11. Эквивалентная схема пьезопреобразователя, нагруженного на воду

В случае использования поперечного пьезоэффекта

$$\operatorname{ctg} \frac{\omega l}{2C_{36}} = 0. \quad (39)$$

Уравнение (38) решается графически или численными методами. На рис.12 приведён график зависимости между резонансным размером  $l/\lambda$ , где  $\lambda = C_{3B}/f_0$ ,  $C_{36} = C_3^D$ , и коэффициент связи  $k_{33}$ .

Рис.12. Зависимость резонансного размера пьезоэлемента от коэффициента электромеханической связи при продольном (кривая 1) и поперечном (кривая 2) пьезоэффектах

Решениями уравнения (39) являются

$$\frac{\omega l}{2C_{36}} = \left( \frac{2n-1}{2} \right) \pi, \quad n=1,2,3\dots$$

т.е. резонанс наблюдается при резонансном размере ЭАП, кратном нечётному числу длин полуволн. Определив резонансный размер  $l$  преобразователя и выбрав материал, задаёмся остальными размерами ЭАП.

Акустическая мощность излучателя связана с звуковым давлением  $p$  в точке на акустической оси на расстоянии  $r$  соотношением

$$P_a = \frac{2\pi r^2 p^2}{(\rho c)_{cp} \Omega}, \quad (40)$$

где  $(\rho c)_{cp}$  – плотность и скорость звука окружающей среды,  $\Omega$  – коэффициент осевой концентрации излучателя (КОК). Решая уравнения (38), (39) и (40) совместно, можно определить электрическое напряжение  $U$ , которое необходимо подвести к преобразователю для создания звукового давления  $p$ .

Определение КОК, как правило, довольно сложно. В данной курсовой работе можно воспользоваться графиками рис. 13 и рис. 14.

Рис.13. Коэффициент осевой концентрации круглого поршня в экране (1) и без экрана (2)

Рис.14. Зависимость КОК прямоугольного поршня в бесконечном экране от волновых размеров

Рассчитанная по формуле (40) излучаемая акустическая мощность не должна превышать порог кавитации.

Порог кавитации характеризуется величиной удельной акустической мощности – интенсивностью  $I_{don}$ , при которой кавитация ещё не наступает. Порог кавитации тем выше, чем меньше длительность  $t_u$  излучаемого

импульса, больше гидростатическое давление (заглубление  $Z$  преобразователя) и выше частота излучения. Зависимость  $I_{доп}$  от  $t_u$  приведена в таблице.

Таблица

Допустимая удельная мощность излучения в зависимости от длительности импульса

$t_u$	100	20	10	5	2
$I_{доп}, \text{Вт/см}^2$	0,3	5	7-8	10-12	15-16

Зависимость  $I_{доп}$  от заглубления (при непрерывном сигнале) определяется эмпирической формулой

$$I_{доп} = 0,3(1 + 0,1Z)^2, \quad (41)$$

Где  $Z$  измеряется в метрах. По опытным данным, в диапазоне 4-15 кГц порог кавитации не зависит от частоты, в диапазоне 15-50 кГц увеличивается примерно на 30%.

Таким образом, мощность не должна превосходить значения

$$P_{ауд} = \frac{P_a}{S_{удл}} \leq I_{доп}$$

Поскольку в процессе работы ЭАП подвергаются как статическим, так и динамическим нагрузкам, необходимо проверить допустимость удельной мощности по механической прочности преобразователя. Количественной мерой статической прочности является предел прочности – максимальное напряжение растяжения  $\delta_p$ , которое данный материал выдерживает. Величина  $\delta_p$  у магнестрикционных материалов выше, чем у ферритов и пьезокерамики примерно на порядок. Особенность пьезокерамических составов заключается в том, что прочность  $\nu$  на сжатие на порядок выше прочности на растяжение. Следовательно, величина динамических напряжений, возникающих в пьезоэлектрической или пьезомагнитной керамике, не должна превышать соответствующего предела  $\delta_p$ . Очевидно, чем больше удельная акустическая мощность, тем большие механические

напряжения создаются в ЭАП. Связь между напряжением и удельной мощностью излучения для продольно колеблющегося элемента механической системы преобразователя имеет вид (8)

$$\delta m = \rho C_{зв} \sqrt{\frac{2P_{\text{изл}}}{(\rho C)_{cp}}} \quad (42)$$

Если напряжение  $U$ , рассчитанное из (38), (39), не удовлетворяет исходным данным, следует применять секционирование ЭАП (4); в некоторых случаях удаётся достичь желаемого изменением выбора типа пьезоэффекта.

Расчёт электрического импеданса на частоте резонанса проводим по отдельным составляющим. Активное сопротивление излучения для круглого поршня в бесконечном жёстком экране выражается формулой

$$r_s = (\rho C)_{cp} S_1 \left[ 1 - 2 \frac{I_1(2k_{cp} r_1)}{k_{cp} r_1} \right], \quad (43)$$

где  $S_1$  – площадь излучающей поверхности;  $k_{cp} = \omega / C_{cp}$  – волновое число жидкости;  $I_1(2k_{cp} r_1)$  – функция Бесселя 1 рода 1 порядка;  $r_1$  – радиус излучающей поверхности.