



ЭКСПЕРИМЕНТАЛЬНЫЙ ТУР

9^{ая} Азиатская физическая олимпиада
Уланбатор, Монголия (апрель 24, 2008)

ФИЗИКА ЗВУКОВЫХ ВОЛН (20 баллов)

Наше окружение наполнено различными звуками и звуковыми эффектами. Данная экспериментальная задача связана с ультразвуковыми и звуковыми эффектами и состоит из четырех частей. В первой части Вы ознакомитесь с характеристиками ультразвуковых микрофонных систем. Затем понаблюдаете и объясните явления интерференции, дальше будете изучать эффект Доплера, и в конце будете определять порог слышимости человеческого слуха и разрешающую способность.

Приборы и принадлежности

Об-ние	Название	К-во
A	Генератор (Function Generator)	1
B	Усилитель - переходник (Amplifier Adaptor)	1
C	Милливольтметр переменного тока (AC Millivoltmeter)	1
D	Частотомер (Frequency counter)	1
E	Источник регулируемого постоянного тока (variable DC Power Supply)	1
F	Ультразвуковой микрофон как источник (Красная метка)	1
G	Ультразвуковой микрофон как приемник (Синяя метка)	1
H	Держатель для источника	1
I	Держатель для приемника	1
J	Металлическое зеркало (отражатель)	1

Об-ние	Название	К-во
K	Держатель для зеркала со шкалой	1
L	Вращающийся диск	1
M	Моторчик, прикрепленный к оптической скамье	1
N	Соединительные коаксиальные кабеля	4
O	Вращающийся держатель с угловой шкалой	1
P	Стереонаушники	1
R	Оптическая скамья	1
S	Вогнутое зеркало	1
T	Переменное сопротивление (реостат)	1

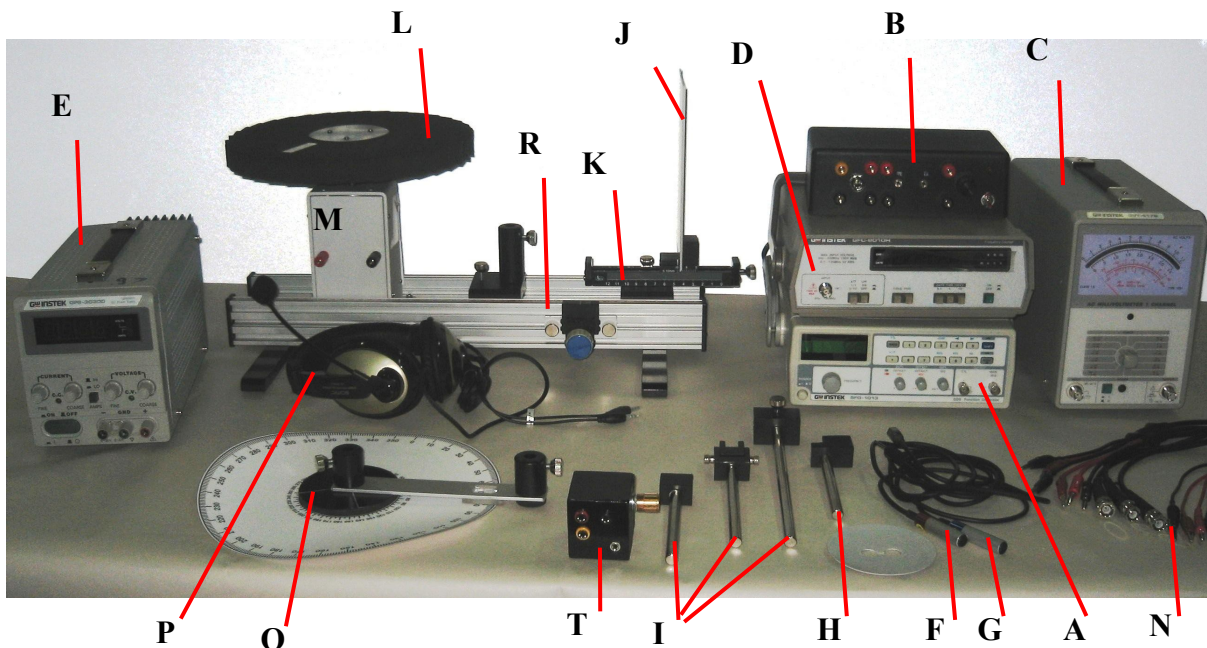
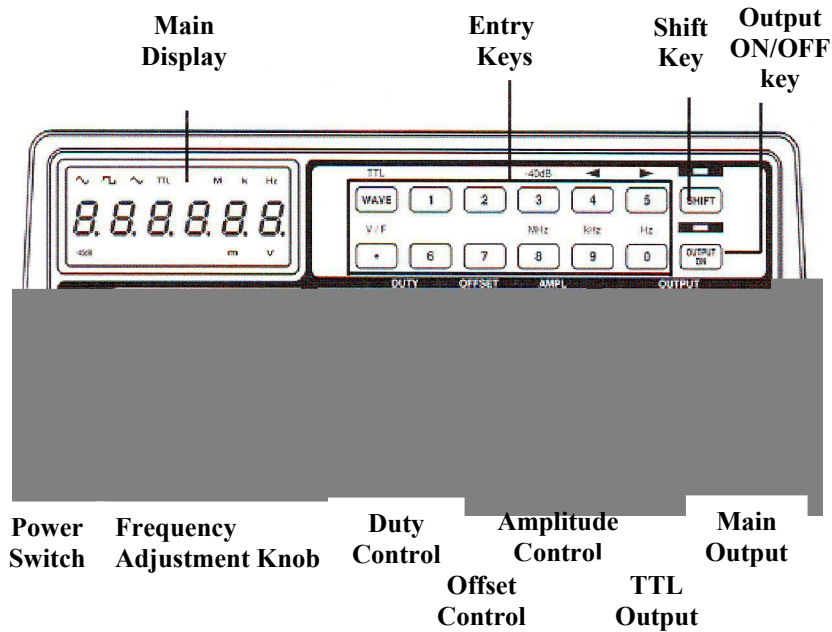
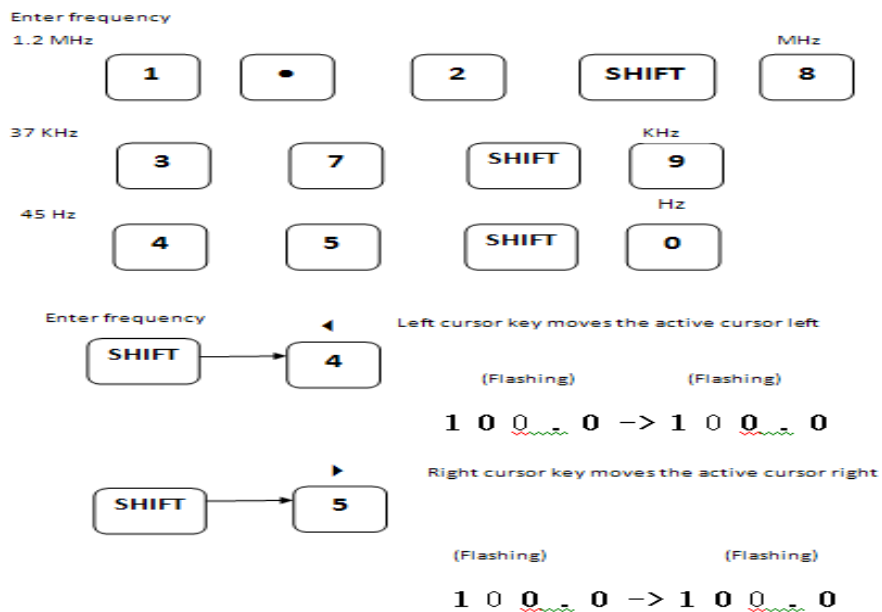


Рис.1 Приборы и принадлежности

1. Генератор (на Рис.1 обозначен буквой «А») (Function Generator)

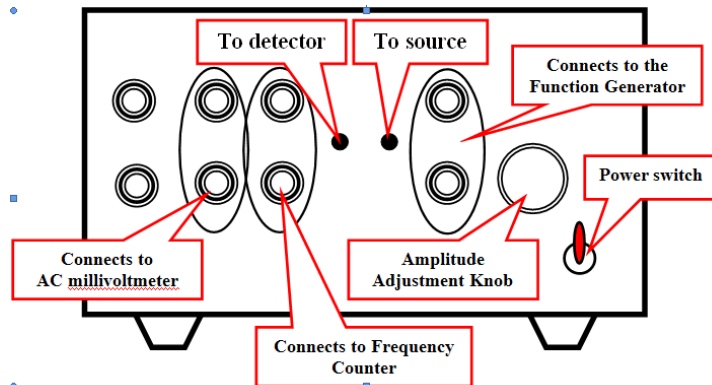


- ³⁵₁₇ Кнопка питания Power включается нажатием («ON»), при этом горит соответствующий световой индикатор, а следующее нажатие выключает ее («OFF»);
- ³⁵₁₇ Выбор значения частоты: для выбора значения частоты сигнала необходимо каждый раз нажимая кнопку SHIFT, далее с помощью кнопок «4» или «5» двигая курсор по дисплею влево или вправо дойти до нужной цифры, которую собираетесь поменять, далее изменить его с помощью ручки Frequency Adjustment;
- ³⁵₁₇ Значение частоты высвечивается на дисплее. А значение амплитуды выходного сигнала можно посмотреть нажав кнопку SHIFT, затем нажав кнопку «V/F»;
- ³⁵₁₇ Амплитуду выходного сигнала Вы можете менять с помощью ручки Amplitude Control;
- ³⁵₁₇ Вы должны включить кнопку «Output ON/OFF key», при этом горит световой индикатор, иначе не будет выходного сигнала для микрофона.

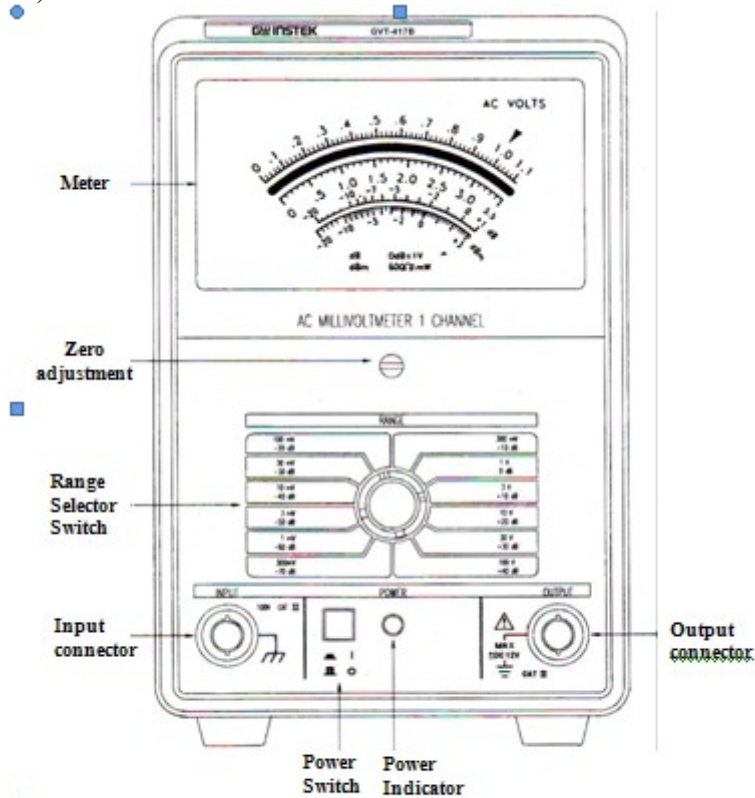


2. Усилитель переходник (на Рис.1 обозначен буквой «В») (*Amplifier Adaptor*)

Этот прибор в данной работе никакой усилительной функции не выполняет, он используется как переходник для различных соединений



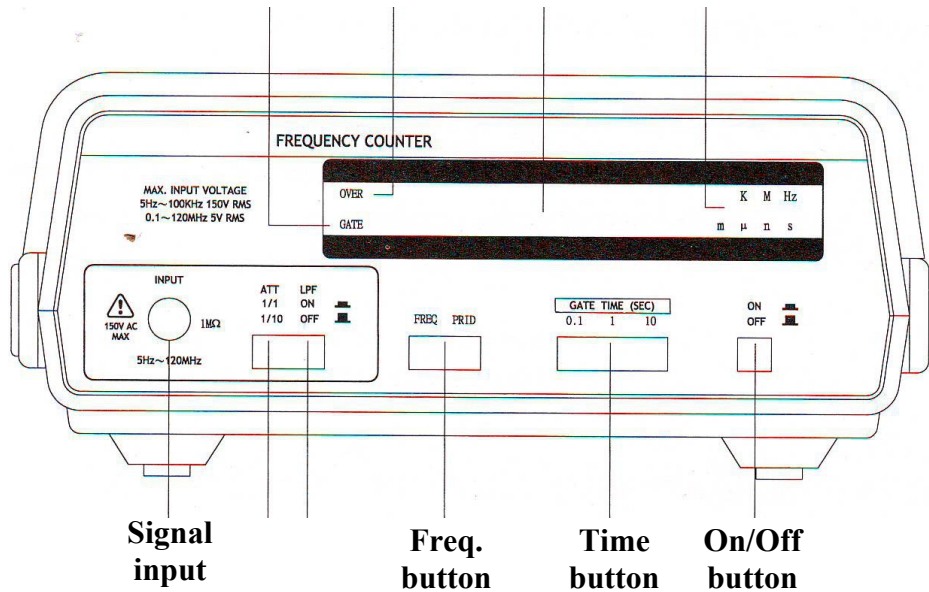
3. Милливольтметр для переменного тока (на Рис.1 обозначен буквой «С») (*AC Millivoltmeter*)



Connect BNC type cable from Amplifier Adaptor to INPUT terminal.
Set the RANGE to 100 V and switch on the power.

- ³⁵₁₇ Клемму INPUT милливольтметра соедините с усилитель-переходником с помощью коаксиального кабеля;
- ³⁵₁₇ Вращая ручку предела измерения RANGE поставьте ее (в ручке имеется мало заметная линия) на 100 В и включите питание прибора;
- ³⁵₁₇ После включения прибора вращая ручку предела измерения RANGE добейтесь, чтобы стрелка показала $\geq 1/3$ части полной шкалы. Значение измеряемой величины легко определяется, так как максимальному отклонению стрелки соответствует установленный предел измерения.

4. Частотомер (на Рис.1 обозначен буквой «D») (*Frequency counter*)



- 35 Соедините сигнальный кабель к входу «Signal input»;
 17
 35 Включите кнопку «ON» частотомера;
 17
 35 Нажмите кнопки «Freq.button» и «Time button»;
 17

Тогда частотомер будет готов к измерению частоты входного сигнала.

Предупреждение: Убедитесь, что питание оборудования отключено перед тем как будете включать или выключать коннекторы, иначе Вы повредите оборудование или сенсоры.

ЧАСТЬ 1. Характеристики микрофонов (3 балла)

Введение

Пьезоэлектрические свойства обеспечивают удобную связь между механическими колебаниями кристалла, проявляющимися в очень узком диапазоне частот, и электрическими свойствами цепи, частью которой он является. Пьезоэлектрические материалы используются для преобразования электрических и звуковых сигналов друг в друга, но только в некотором узком диапазоне частот. Следовательно, в эксперименте Вы должны определить физические характеристики микрофона, сделанного из пьезоэлектрика.

Используемые в этой части приборы

1	Генератор (Function Generator) (FG)	5	Ультразвуковой микрофон как источник (Красная метка) (S) с держателем (H)
2	Усилитель (Amplifier Adaptor) (B)	6	Ультразвуковой микрофон как приемник (Голубая метка) (D) с держателем (I)
3	Милливольтметр переменного тока (AC Millivoltmeter) (MV)	7	Два коаксиальных кабеля (N)
4	Вращающийся держатель с угловой шкалой (O)	8	Калькулятор (X)

Описание эксперимента

Используйте два ультразвуковых микрофона, один из них как источник (помеченный красным), а второй как приемник (помеченный синим). Источник снимает электрический сигнал с генератора через усилитель и превращает его в звуковую волну. Приемник (назовем

его детектором) принимает звуковые волны, излучаемые источником и через усилитель превращает их обратно в электрический сигнал. Амплитуда выходного электрического сигнала измеряется с помощью милливольтметра.

Подсказки: Напряжение питания, подводимого к источнику должно быть около 1 В. Если оно превышает его, ультразвук сильно затухает, что может повлиять на результаты. Микрофоны помещающая на вращающиеся держатели и соединены с ультразвуковым усилителем. Расстояние между источником и детектором не должно меняться в течение эксперимента части 1. Убедитесь, что микрофоны поставлены параллельно основанию держателя и оси микрофонов лежат на одной линии.

1а. (1.5 балла) Изменяя частоту сигнала генератора, измерьте напряжение выходного сигнала, снимаемого детектором. Измерение проводите в диапазоне от 30 кГц до 50 кГц. Убедитесь, что измерения проводятся в данном диапазоне частот, **иначе Вы повредите микрофоны**. Установите напряжение 1 В. Данные занесите в таблицу 1А. Постройте график по данным таблицы. Постройте график действующего напряжения, снимаемого с детектора, в зависимости от частоты генератора, определите частоты f_1 и f_2 при которых действующее напряжение составляет $1/\sqrt{2}$ от максимального значения. Определите полосу пропускания $\Delta f \dagger f_2 \acute{H} f_1$. Определите рабочую частоту f_w (при котором напряжение, снимаемое с детектора максимально).

1б. (1.5 балла) Установите частоту генератора равной рабочей частоте. Определите угловую зависимость интенсивности выходного звукового сигнала от относительного положения источника и детектора. Данные занесите в таблицу 1В. Нарисуйте график зависимости отношения напряжений $A(\$/) / A(0)$ от угла $\$$, где $A(\$)$ и $A(0)$ - напряжение выходного сигнала при углах $\$$ и 0 соответственно. Направление $\$ \dagger 0^0$ дает максимальный сигнал и называется осью источника. Найдите углы, при которых напряжение выходного сигнала падает в 2 и 3 раза, соответственно.

ЧАСТЬ 2. Интерференция волн

Введение

Стоячая волна это тип колебания создаваемой в среде интерференцией идущей от источника и отраженной от зеркало волнами. Волны интерферируют таким образом, что существуют точки в пространстве, в которых колебания отсутствуют. Эти точки называются **узлами**. Существуют и другие точки в среде, в которых колебания максимальны. Эти точки называются **пучностями**.

Используемые в этой части приборы

1	Генератор (Function Generator) (A)	5	Ультразвуковой микрофон как источник (Красная метка) (F) с держателем (H)
2	Усилитель (Amplifier Adaptor) (B)	6	Ультразвуковой микрофон как приемник (Голубая метка) (G) с держателем (I)
3	Милливольтметр переменного тока (AC Millivoltmeter) (C)	7	Два коаксиальных кабеля (N)
4	Вращающийся держатель с угловой шкалой (O)	8	Калькулятор (X)

Описание эксперимента

2а. Изучение интерференции волн (1.6 балла)

Используя приборы 1-8 из списка выше, соберите схему, показанную на рисунке 2.1 и изучите интерференцию волн. Для уменьшения нежелательной интерференции, помещайте

ненужные приборы подальше от детектора. Подсоедините генератор к источнику и установите частоту 40 кГц.

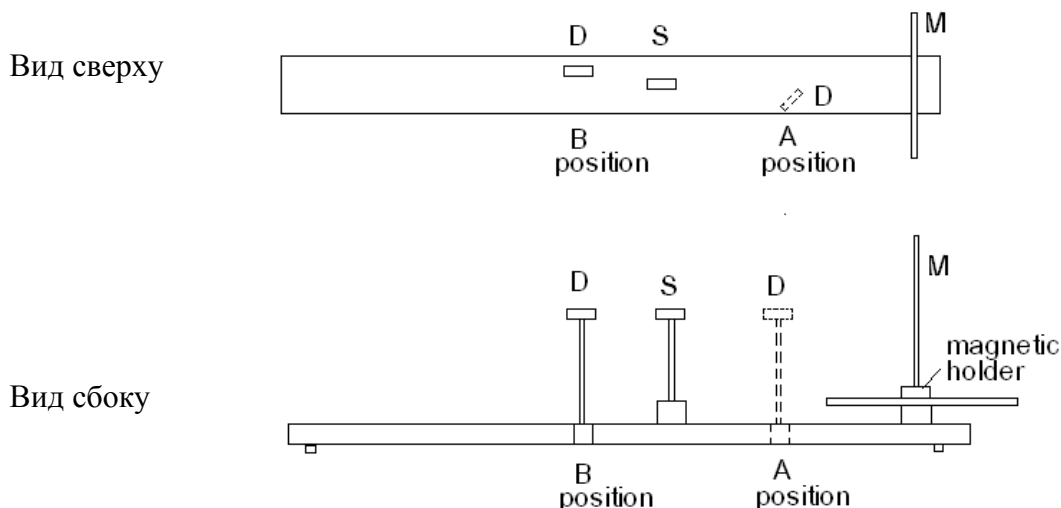


Рис.2.1. Изучение интерференции волн

Положения А: Детектор (D) расположен между источником (S) и зеркалом (M).

Положение В: Детектор (D) расположен за источником (S).

2а.1 Поместите детектор в положение А, показанное на рисунке 2.1 и наблюдайте зависимость принимаемого сигнала от положений S, M и D. Если детектор находится слишком близко к источнику, могут появиться нежелательные эффекты, поэтому не проводите измерения в непосредственной близости к источнику. Помните, что детектор имеет угловую чувствительность, так что ориентируйте его для проведения оптимальных измерений.

2а.2 Поместите детектор в положение В, показанное на рисунке 2.1 и наблюдайте зависимость принимаемого сигнала от положений M и D. Положения S не должно меняться.

2а.3 Измерение длины волны

Как и в пункте 2а.1, фиксируя положения S и D и перемещая M, экспериментально определите длину ультразвукового сигнала.

2б. Экспериментально найдите ответы на следующие вопросы (2.8 баллов)

Поставьте «√» для правильных утверждений или «×» для неправильных напротив соответствующих пунктов в Вашем листе ответов.

- Состоящая волна наблюдается между S и M (Рис.2.1). Эта стоячая волна появляется при любом расстоянии между S и M.
- Состоящая волна наблюдается между S и M. Стоячая волна появится только для расстояний между S и M, равных $n\lambda/2$, где n – целое число.
- В обоих положения А и В детектор обнаружит узлы и пучности стоячей волны. Это можно доказать, меняя положения S и M.
- Состоящая волна появится при любых расстояниях между S и M. Это может быть обнаружено изменением положения D. В положении В детектор обнаружит высокий уровень сигнала, когда расстояние между S и M равно $n\lambda/4$, где n – целое число.
- Положение узлов и пучностей не изменяется относительно лабораторной системы (скамьи) при изменении положений S и M.

- f. Когда расстояние между S и M увеличивается, мощность отраженного сигнала в положении В будет периодически меняться.
- g. Стоячая волна появляется только между S и M, а позади источника будет наблюдаться отраженная волна.

2с. Изучение стоячей волны (1.6 баллов)

В положении В, если М смещается детектор будет обнаруживать максимальный/минимальный уровень принимаемого сигнала. В этих случаях определите будет ли на поверхности зеркала М или источника S узел или пучность. Если появляется узел, поставьте в таблице «N», а если пучность, то поставьте «A».

Условие	На поверхности зеркала	На поверхности источника
Максимум на детекторе		
Минимум на детекторе		

ЧАСТЬ 3. Эффект Доплера

Наблюдаемая и измеряемая частота сигнала зависит от относительного движения источника и наблюдателя. Это известно как эффект Доплера. Наблюдаемая частота дается формулами

$$f = f_o \frac{c - v_d}{c + v_s} \quad (\text{Источник и детектор удаляются}) \quad (1)$$

$$f = f_o \frac{c + v_d}{c - v_s} \quad (\text{Источник и детектор сближаются}) \quad (2)$$

где

f_o частота волны излучаемой источником

c скорость звука в воздухе

v_d скорость детектора

v_s скорость источника

Используемые в этой части приборы

1	Генератор (Function Generator) (A)	5	Ультразвуковой микрофон как источник (Красная метка) (F) с держателем (H)
2	Усилитель (Amplifier Adaptor) (B)	6	Ультразвуковой микрофон как приемник (Голубая метка) (G) с держателем (I)
3	Милливольтметр переменного тока (AC Millivoltmeter) (C)	7	Два коаксиальных кабеля (N)
4	Вращающийся держатель с угловой шкалой (O)	8	Калькулятор (X)

Описание эксперимента

Источник помещается таким образом, чтобы ультразвук был направлен на наклонную кромку вращающегося диска, а детектор ставится таким образом, чтобы снимать сигнал максимально эффективно. Источник подсоединен к выходу генератора, а детектор к милливольтметру для измерения интенсивности сигнала, как это сделано в части 1. Перед началом эксперимента, проверьте, вручную вращая диск вперед и назад, что уровень снимаемого сигнала меняется. Если эти изменения малы, измените положения источника и детектора надлежащим образом. Если Вы это не сделаете, появятся ошибки в измерениях интенсивности звука и его частоты.

³⁵₁₇ Включите двигатель, вращающий диск;

³⁵₁₇ Наблюдайте изменения в частоте звука осторожно увеличивая напряжение подаваемое на двигатель;

³⁵₁₇ В части 3 необходимо подготовить инструменты для измерения в соответствии с результатами частей 1 и 2. Для примера, установите частоту равной рабочей и т.д. Если Вы не смогли определить рабочую частоту, используйте 40 кГц. Убедитесь, что напряжении, подаваемое от генератора, не затухает.

3а. Формулы для доплеровского сдвига от вращающегося диска (1.5 балла)

³⁵₁₇ Излучаемая источником звуковая волна отражается от пилообразного зубца (Рис.1), появляется эффект Доплера. Обозначив через v скорость движения пилообразного зубца в радиальном направлении R , получите формулу для f через f_0 , c и v для этого случая. В экспериментальной установке угловой зависимостью надо пренебречь, углы падения и отражения должны быть менее 5° .

³⁵₁₇ Из полученного выражения, получите упрощенную формулу $\Delta f / f_0$ в зависимости от v/c , используя сокращения $\Delta f \approx f - f_0$ для случая $v/c \ll 1$, где f_0 – рабочая частота. Вся процедура получения должна быть приведена на листе ответов.

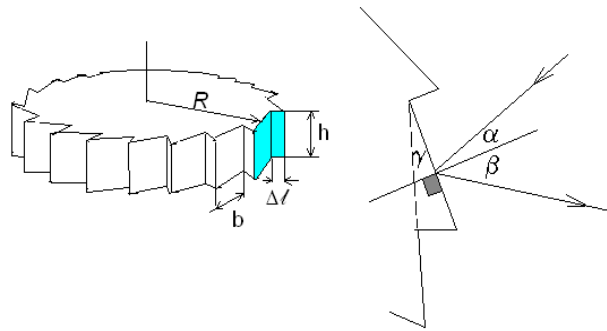


Рис.1 Пилообразный зубец вращающегося диска

3б. Вычисление Доплер эффекта от вращающегося диска (1.4 балла)

Получите выражение для радиальной скорости v центра пилообразного зубца через угловую скорость вращения диска Ω и Δl (Высота пилообразного зубца $\Delta l = 4.37 \pm 0.05$ мм)

3с. Зависимость Доплер эффекта от напряжения подаваемого к двигателю диска (2.8 балла)

Измерьте частоту звукового сигнала, принимаемого детектором, как функцию подаваемого к двигателю напряжения до 16 В. Постройте график $\Delta f / f_0$ от U . Из графика при больших U определите величину порогового напряжения U_t при котором диск начинает вращаться, а также наклон графика вместе с ошибками измерения.

Подсказки: Убедитесь, что диск вращается по часовой стрелке и не меняет этого направления. Выберите положения детектора наиболее оптимально для стабильных измерений. Для экономии времени, Вы можете измерить электрический ток в части 3д, одновременно с измерением напряжения на двигателе вращающегося диска. Помните, что приборы, используемые в экспериментальной части, прокалиброваны и их спецификация дается на отдельном диске. Например, при 10 В приводится частота доплеровского сдвига. Используя эти экспериментальные результаты, прокалибруйте Вашу систему, или измерения будут неправильными.

3д. Линейная зависимость Ω от U (0.8 балла)

Из листа спецификации, найдите угловую скорость Ω , напряжение U и силу тока I вместе с экспериментальной ошибкой (для вращения по часовой стрелке) и вычислите числовые коэффициенты и ошибки для линейной зависимости Ω от U . Положите, что при больших напряжениях Ω приблизительно пропорционально напряжению. Запишите полученные из листа спецификации результаты на листе ответов.

3е. Скорость звука в воздухе по Доплеровскому эффекту (1.5 балла)

Используя зависимости $\Delta f / f_0$ от v и $\Delta f / f_0$ от U , найдите скорость звука в воздухе и ее погрешность. Используя экспериментальное и теоретическое значение скорости звука в воздухе, найдите относительную погрешность Вашего эксперимента $\frac{c_{\text{exp}} - c_{\text{theor}}}{c_{\text{theor}}} \cdot 100\%$,

где $c_{\text{theor}} \approx 343$ м/с

ЧАСТЬ 4. Порог слышимости и разрешающая способность человеческого уха (3 балла)

Порог слышимости – это интенсивность звука в Вт/м², при которой ухо едва слышит его. Она зависит от частоты звука. Порог слышимости при 2000 Гц равен 10⁻² Вт/м². Отношение $\log_{10}(I/I_0)$ называется интенсивностью звука и измеряется в Беллах, сокращенно Б. На практике удобнее использовать величину $10 \log_{10}(I/I_0)$, измеряемую в децибелах, дБ. Человеческое ухо может слышать звуки частоты от около 20 Гц до около 20000 Гц, называемой диапазоном слышимости.

Список используемых в этом пункте приборов (Рис.4.1)

1. Генератор (а);
2. Милливольтметр (b);
3. Соединительные кабеля (c,d);
4. Переменное сопротивление (реостат) (e);
5. Наушник (f)

Подготовка к эксперименту

1. Соедините приборы как показано на рисунке 4.2;
2. Включите питание милливольтметра и генератора;
3. Поверните кнопку ADJ и установите ее в среднее положение.

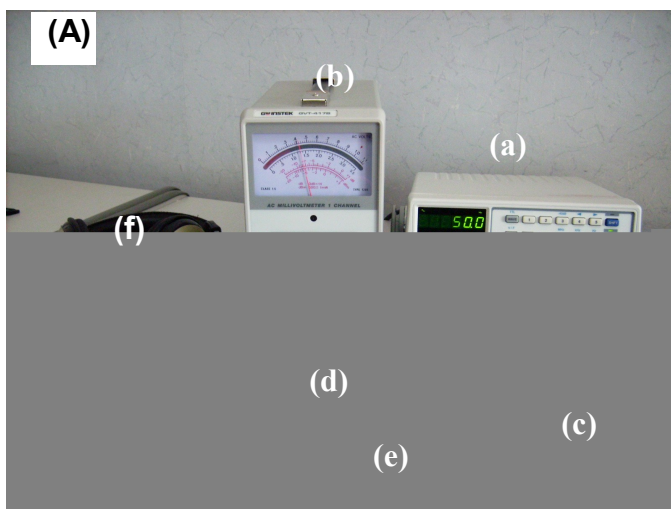


Рисунок 4.1 (А). Соединение приборов. **(В)** Подсоединение выводов к реостату: Воткните красный вывод генератора в красную розетку реостата, а черный в черную; воткните красный вывод реостата в желтую розетку и черный вывод в черную розетку; и воткните вывод наушников в разъем для наушников.

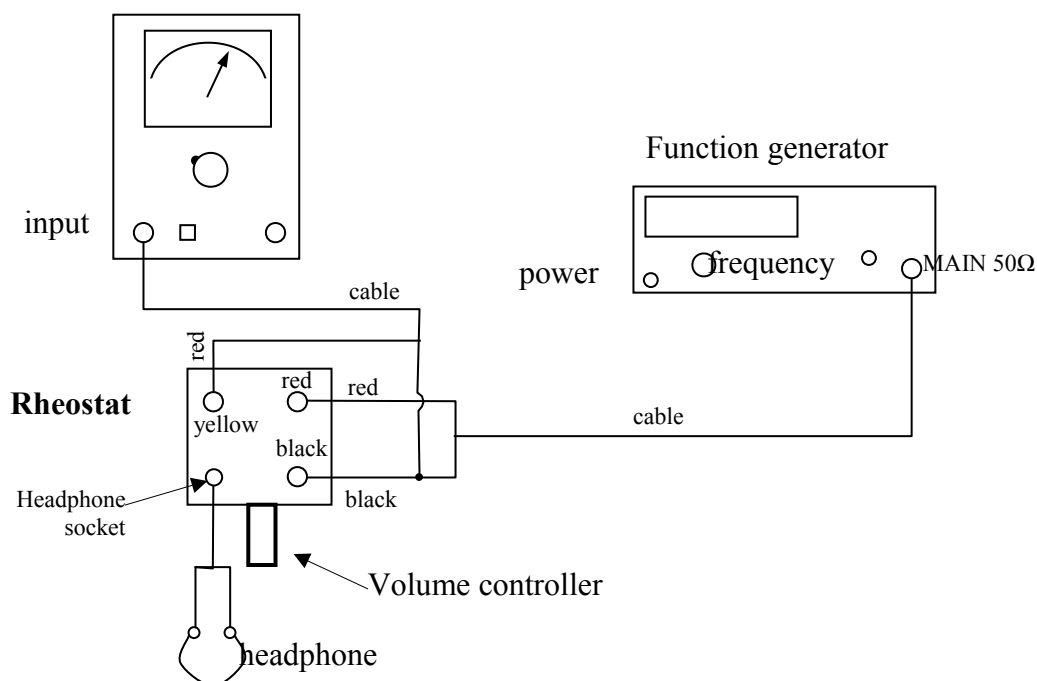


Рисунок 4.2. Схема соединения.

Измерение

4а. Частотный диапазон слышимости (0.5 балла)

А. Определение наименьшей слышимой частоты f_{low} ;

В. Определение наибольшей слышимой частоты f_{high} ;

1. Установите громкость наушников на максимум крутя ручку реостата;
2. Найдите частоту f_{low} . Для этого изменяйте и уровень звука и частоту. Для изменения частоты используйте кнопку частоты генератора. Для изменения уровня звука используйте реостат и AMPL ADJ КНОПКУ ГЕНЕРАТОРА;
3. Используйте ту же процедуру для нахождения f_{high} .

4б. Наиболее слышимый частотный диапазон (1 балл)

Снижайте уровень звука шаг за шагом. Для каждого шага найдите f_{low} и f_{high} . Найдите диапазон, в котором Вы можете слышать звук наименьшей интенсивности. Нижняя граница этого диапазона есть наименьшая частота наилучше слышимого частотного диапазона f_{th1} , верхняя граница того же диапазона есть наивысшая частота наилучше слышимого диапазона f_{th2} . Их среднее называется частотой наибольшей чувствительности $f_{th} \dagger \frac{f_{th1} \hat{G} f_{th2}}{2}$

4с. Разрешающая способность уха (R) при различных частотах звука (1 балл)

Разрешающая способность уха есть способность различать две близкие частоты.

1. Установите частоту генератора f_{th} ;
2. Слушая в наушники, измените интенсивность звука так, чтобы Вы хорошо его слышали;

3. Измените немного частоту. Если Вы не слышите разницу между f_{th} и измененной частотой, продолжайте ее изменять. Таким образом, найдите частоту, которую Вы можете определить как отличную от f_{th} . Разность между f_{th} и этой частотой есть разрешающая частота Вашего уха при f_{th} .
4. Вычислите разрешающую частоту (Δf) и разрешающую способность $R \uparrow f / \Delta f$ для f_{th} .

4d. Найдите минимальную скорость зеркала, которая дает Доплер эффект, обнаруживаемый человеческим ухом (0.5 балла)

Вычислите скорость зеркала и ее погрешность по формуле

$$\frac{\Delta f}{f} \uparrow \frac{2v}{c}$$

где $c=343$ м/с - скорость звука в воздухе при 20°C .

Используйте это значение только в части 4.