

Министерство науки и высшего образования Российской Федерации

Томский государственный университет
систем управления и радиоэлектроники

С.Г. Еханин

ОПРЕДЕЛЕНИЕ СПЕКТРАЛЬНОЙ ХАРАКТЕРИСТИКИ СЛУХА

Методические указания к лабораторному занятию по дисциплине
"Биомедицинская электроника"

Томск
2021

УДК 534.75; 612.85

ББК 32.87-5

Е-93

Рецензент

Романовский М.Н., доцент кафедры конструирования узлов и деталей
РЭА, канд. техн. наук

Еханин Сергей Георгиевич

Е-93 Определение спектральной характеристики слуха: методические указания к лабораторному занятию по дисциплине «Биомедицинская электроника» / С.Г. Еханин. – Томск: Томск. гос. ун-т систем упр. и радиоэлектроники, 2021. – 16 с.

В методических указаниях кратко изложены теоретические основы аудиометрии, описаны устройство, принцип действия и компоненты аудиометра. Приводится описание электроакустической экспериментальной установки, методика измерений, порядок выполнения лабораторной работы, контрольные вопросы и список рекомендуемой литературы для студентов, магистрантов и аспирантов, интересующихся проблемами биомедицинской диагностики.

Одобрено на заседании каф. КУДР протокол № 229 от 31 августа 2021 г.

УДК 534.75; 612.85

ББК 32.87-5

© Еханин С.Г., 2021

© Томск. гос. ун-т систем упр. и радиоэлектроники, 2021

Оглавление

1 ВВЕДЕНИЕ	4
2 ТЕОРЕТИЧЕСКАЯ ЧАСТЬ.....	5
2.1 Определения	5
2.2 Физиологические характеристики слуха	6
2.3 Тугоухость	9
2.4 Факторы, способствующие потере слуха.....	10
3 ПРАКТИЧЕСКАЯ ЧАСТЬ	12
3.1 Описание установки.....	12
3.3 Построение графика зависимости уровня интенсивности от частоты на пороге слышимости	13
КОНТРОЛЬНЫЕ ВОПРОСЫ.....	15
СПИСОК РЕКОМЕНДОВАННОЙ ЛИТЕРАТУРЫ	16

1 ВВЕДЕНИЕ

Человек способен слышать звук в пределах от 16 Гц до 20 кГц при передаче колебаний по воздуху и до 220 кГц при передаче звука по костям черепа. Эти волны имеют важное биологическое значение, например, звуковые волны в диапазоне 100—4000 Гц соответствуют человеческому голосу. Считается, что средняя частота мужского голоса ~130 Гц, женского ~220 Гц, а детского ~265 Гц. Звуки выше 20 кГц имеют малое практическое значение, колебания ниже 60 Гц воспринимаются благодаря вибрационному чувству. Диапазон частот, которые способен слышать человек, называется *слуховым* или *звуковым диапазоном*; более высокие частоты называются *ультразвуком*, а более низкие — *инфразвуком*.

Способность различать звуковые частоты сильно зависит от особенностей конкретного человека: его возраста, пола, наследственности, подверженности заболеваниям органа слуха, тренированности и усталости слуха. Некоторые люди способны воспринимать звуки относительно высокой частоты — до 22 кГц, а, возможно, и выше.

У человека, как и у большинства млекопитающих, органом слуха является ухо. У ряда животных слуховая перцепция осуществляется благодаря комбинации различных органов, которые могут значительно отличаться по своему строению от уха млекопитающих. Некоторые животные способны воспринимать акустические колебания, не слышимые человеком (ультра- или инфразвук). Летучие мыши во время полёта используют ультразвук для эхолокации. Собаки способны слышать ультразвук, на чём и основана работа беззвучных свистков. Существуют свидетельства того, что киты и слоны могут использовать инфразвук для общения.

Человек может различать несколько звуков одновременно благодаря тому, что в ушной улитке одновременно может быть несколько стоячих волн.

Недавно было показано, что в человеческом мозге выделены специализированные нейроны, позволяющие оценить высоту звука вплоть до 0,1 тона. Животные, кроме летучих мышей, таким приспособлением не обладают, и для разных видов точность ограничена от 1/2 до 1/3 октавы.

Восприятие частотного диапазона 16 Гц – 20 кГц с возрастом изменяется — высокие частоты перестают восприниматься. Уменьшение диапазона слышимых частот связано с изменениями во внутреннем ухе (улитке) и развитием с возрастом нейросенсорной тугоухости.

Способность человека (и высших животных) определять направление на источник звука называется бинауральным эффектом. Как известно, бинауральный эффект в значительной степени зависит от восприятия ушами человека звуков высокой частоты.

Таким образом, определение спектральных характеристик слуха является одним из самых важных исследований показателей здоровья человека. Количественное изучение характеристик слуха проводят с помощью медицинского прибора – аудиометра.

2 ТЕОРЕТИЧЕСКАЯ ЧАСТЬ

2.1 Определения

Аудиометрия – широко используемый в медицине метод определения характеристик слуха.

Слух - одно из биологических дистантных ощущений, называемое также акустическим восприятием, обеспечивается слуховой сенсорной системой.

Звук – это продольные механические волны, воспринимаемые слуховым аппаратом человека. Звуковые волны могут распространяться в воздухе, жидкостях, твердых телах и не существуют в вакууме. Отметим основные *объективные* (физические) характеристики звуковых волн.

Частота (ν) определяет число колебаний частиц среды за единицу времени и измеряется в герцах (Гц). Звуковым волнам соответствуют колебания частиц упругих сред в диапазоне **от 16 до 20000 Гц**. Продольные механические волны с меньшей частотой называют инфразвуком, а с большей частотой – ультразвуком.

Энергетической характеристикой звуковой волны является интенсивность (I).

Интенсивность (сила) звука – средняя по времени энергия, переносимая звуковой волной через единичную площадку, перпендикулярную к направлению распространения волны, в единицу времени. Измеряется сила звука в Вт/м².

Для количественной оценки интенсивности используется понятие «Уровень интенсивности L_I », который равен десятичному логарифму отношению измеренной интенсивности к эталонной интенсивности $I_0=10^{-12}$ Вт/м²

$$L_I = \lg \frac{I}{I_0} \quad (2.1)$$

Значение I_0 приблизительно соответствует среднему порогу слышимости для людей с нормальным слухом для чистого тона с частотой 1000 Гц.

Существуют еще две пороговых точки, порог дискомфорта - I_d и порог боли I_b . При частоте 1000 Гц $I_d=10^{-2}$ Вт/м², $I_b=10$ Вт/м². Таким образом, числовые значения интенсивности для слуха человека изменяются на 13 порядков на частоте 1 кГц.

По формуле (1) уровень интенсивности выражается в белых (Б). Бел уровня интенсивности соответствует увеличению интенсивности по сравнению с эталонным значением в десять раз.

Таким образом, уровень интенсивности измеряется в белых (Б) или децибелах (дБ) – величинах в 10 раз меньших. Поэтому для частоты 1 кГц минимальный уровень интенсивности (порог слышимости) для человека равен:

$$L_{min} = \lg \frac{10^{-12}}{10^{-12}} = \lg 1 = 0 \text{ Б}, \quad (2.2)$$

а максимальный уровень интенсивности (порог боли) равен

$$L_{max} = \lg \frac{10}{10^{-12}} = \lg 10^{13} = 13 \text{ Б} = 130 \text{ дБ} \quad (2.3)$$

При распространении звуковой волны в участках сгущения частиц среды образуется добавочное звуковое или акустическое давление P , которое связано с интенсивностью I звука:

$$I = \frac{p^2}{2\rho v}, \quad (2.4)$$

причем акустическое давление P зависит от плотности ρ среды, амплитуды A , и круговой частоты ω колебаний частиц среды, а также скорости v звука в данной среде:

$$P = \rho A \omega v \quad (2.5)$$

Звуковые волны разделяются на тоны и шумы.

Тон – звук с периодическим процессом колебаний частиц среды. Если колебания происходят по гармоническому закону, то тон называют простым (получают с помощью камертона или звукового генератора). Сложный тон состоит из основного тона (гармонического колебания с наибольшей амплитудой) и кратных ему по частоте, но меньших по амплитуде обертонов или гармоник.

Шум – звук со сложной, неповторяющейся временной зависимостью (скрип, шум прибора, пламени газовой горелки и т. п.).

Достаточно наглядно звуковые волны описываются с помощью *акустического спектра*, который указывает набор частот (ν) и соответствующих им амплитуд (или интенсивностей) колебаний, образующих данную звуковую волну. На рис. 2.1 представлены примеры акустических спектров шума и некоторых звуковых волн с одинаковой частотой основного тона. Легко заметить, что спектр сложного тона линейчатый, а спектр шума – сплошной.

Сложные тоны с одинаковой основной частотой могут иметь различные акустические спектры, а, значит, будут отличаться друг от друга по форме колебаний (рис. 2.2).

2.2 Физиологические характеристики слуха

Оценка звуковых колебаний с помощью звуковых ощущений получила название *субъективных* (физиологических) характеристик. Отметим основные субъективные характеристики звука и их связь с объективными характеристиками звуковой волны.

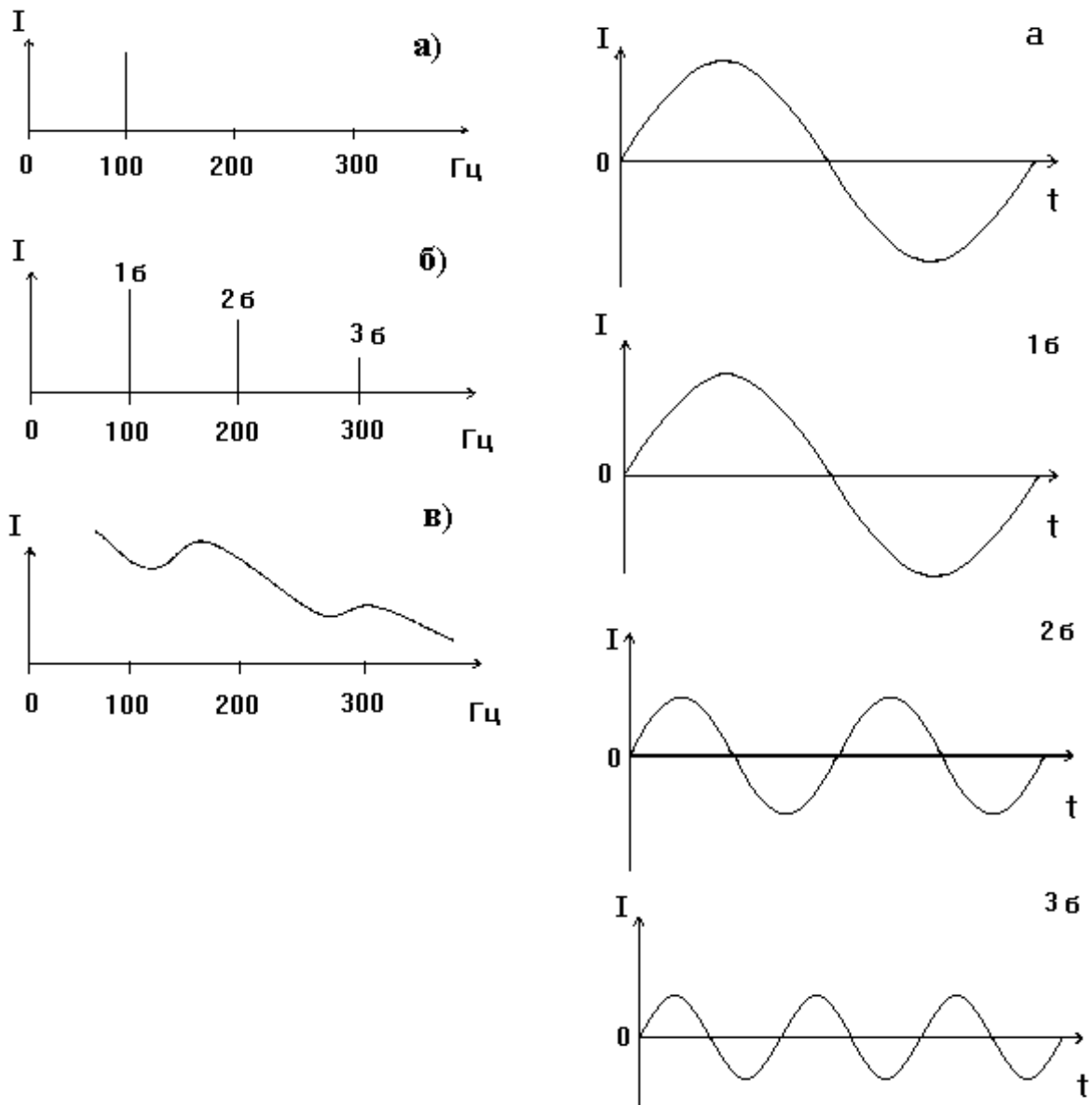


Рисунок 2.1 – Акустический спектр простого (а), сложного (б) тонов и (в) шума (в правой части рисунка даны графики гармонических колебаний, образующих данный тон)

Высота звука зависит от частоты колебаний звуковой волны: чем больше частота колебаний, тем более высоким воспринимается звук.

Различие звуков одной тональности, создаваемых разными источниками (окраска звука), определяется *тембром*. Тембр зависит от акустического спектра звука – от частот обертонов и их интенсивностей (рис. 2.2).

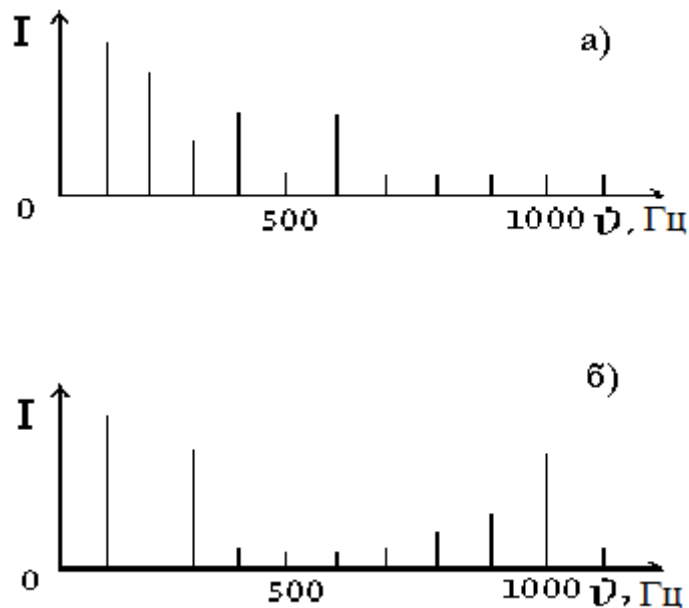


Рисунок 2.2 – Акустические спектры одной и той же ноты, взятой на рояле (а) и на кларнете (б), основная частота тона 100 Гц

Громкость зависит от интенсивности звука: чем больше интенсивность, тем больше громкость. Громкость можно оценить количественно, сравнивая слуховые ощущения от двух источников. Восприятие громкости подчиняется психофизическому закону Вебера – Фехнера: увеличение раздражения I в геометрической прогрессии вызывает возрастание ощущения E в арифметической прогрессии. Т. е., если интенсивность звука имеет значения: I_i, I_i^2, I_i^3 , то соответствующие им ощущения громкости звука будут восприниматься как $E_i, 2E_i, 3E_i$. Следовательно, громкость звука пропорциональна логарифму интенсивности звука, а закон Вебера – Фехнера выражается формулой:

$$E = k \lg \frac{I_x}{I_0}, \quad (2.6)$$

где k – коэффициент пропорциональности, зависящий от частоты и интенсивности звука,

I_0 – интенсивность порога слышимости,

I_x – интенсивность исследуемого сигнала.

Звуки с одинаковой интенсивностью, но с разной частотой, субъективно воспринимаются с разной громкостью (рис. 2.3).

Принимают, что шкалы громкости и интенсивности звука совпадают при частоте 1 кГц, т. е. в формуле (2.6) $k=1$ и единицы уровня интенсивности (дБ) совпадают с единицами громкости (фон).

Сравнение громкости на частоте 1 кГц со слуховыми ощущениями на других частотах позволяет получить связь между громкостью и интенсивностью в исследуемом диапазоне частот – кривые равной громкости (линии с постоянной для всех частот громкостью) (рис. 2.3).

В современной медицине для полной количественной оценки слуха используют аудиометрию. В основе метода лежит определение точек кривой

порога слышимости при разных частотах. Потеря слуха определяется как разность между полученным значением и нормой.

Графическое представление разности исследуемого порогового и нормального ощущения на различных частотах называют *аудиограммой*.

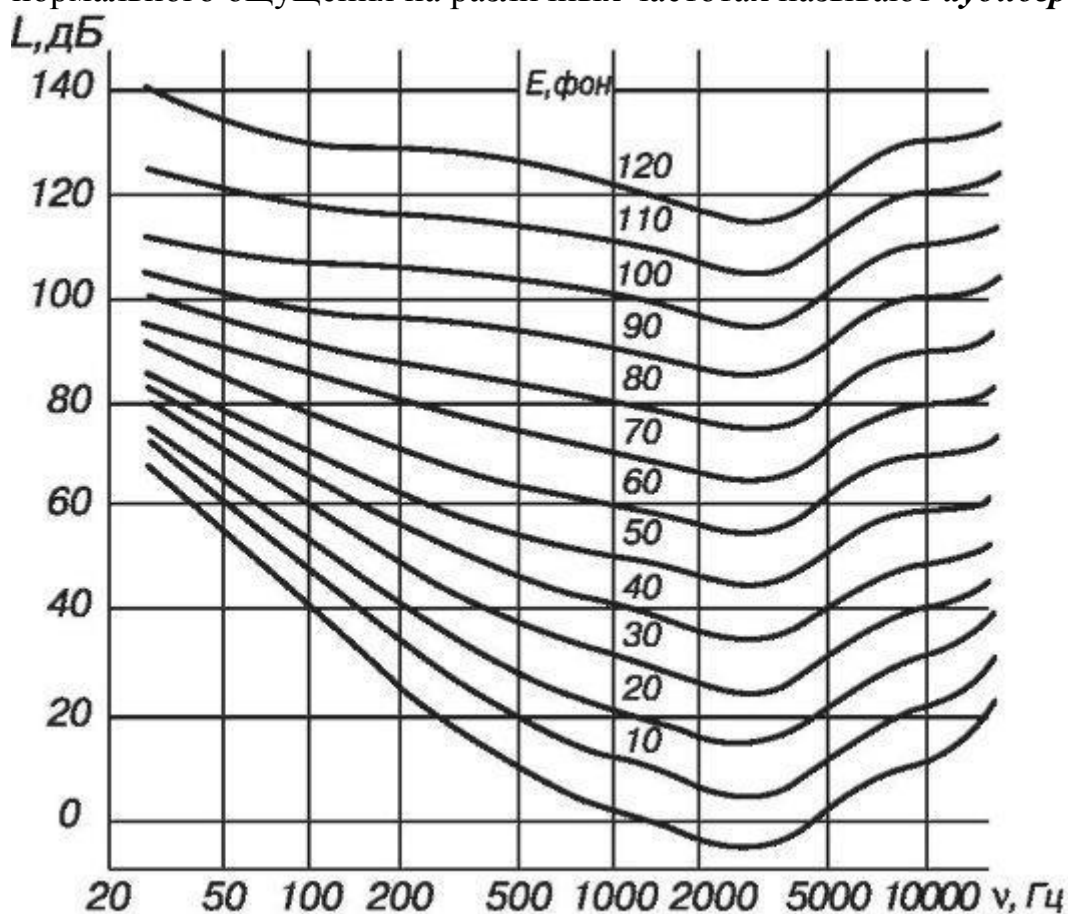


Рисунок 2.3 – Кривые равной громкости

2.3 Тугоухость

Тугоухость — ослабление слуховой функции — может быть лёгкой (порог слышимости звуков частотой 500—4000 Гц выше нормы на 50 дБ), средней (50—60 дБ) и тяжёлой (более 60—70 дБ). В первом случае восприятие разговорной речи происходит с расстояния 4—6 м, во втором — от 1 до 4 м, в третьем — 0,25—1 м. Ещё большая потеря слуха определяется как глухота. Иногда при повышении порога слышимости разговорной речи до 70—90 дБ говорят о глубокой тугоухости, более 90 дБ — о глухоте.

Как правило, нейросенсорная тугоухость обусловлена дефектами *сенсорно-эпителиальных (волосковых) клеток спирального (кортиева) органа* улитки внутреннего уха. Нечасто встречаются сенсоневральные нарушения слуха, связанные с повреждением преддверно-улиткового (VIII черепного) нерва или слуховых центров мозга. И крайне редко повреждения затронуты лишь центральные отделы слухового анализатора. При патологии последних *порог слуховой чувствительности* в

норме, но качество восприятия звуков настолько низкое, что невозможно понимать речь.

Чаще всего встречается сенсорная тугоухость, вызванная неправильным функционированием волосковых клеток, когда они либо изначально дефектны, либо были повреждены в течение жизни человека. В этиологии заболевания играют роль как внешние неблагоприятные факторы (акустическая травма, инфекция), так и внутренние отклонения (дефектные гены, приводящие к глухоте).

- Кроме того, нейросенсорная (сенсоневральная) потеря слуха может возникать как результат аномалии VIII черепного (слухового, преддверно-улиткового) нерва.

- Нейросенсорная тугоухость вследствие поражения центральных отделов слухового анализатора называется поражением слуха центрального генеза.

Этот тип тугоухости может также быть спровоцирован длительным воздействием очень интенсивного промышленного шума; или, например, прослушиванием громкой музыки через наушники на протяжении нескольких часов.

2.4 Факторы, способствующие потере слуха

- Акустические травмы — возникают из-за одномоментного интенсивных звуков или шумов.

- Продолжительное воздействие громкого шума (>80 дБ) вызывает снижение слуха сначала на высоких (4000 Гц), затем на речевых частотах (500, 1000, 2000 Гц).

- Механические травмы.
- Ототоксические лекарства:
 - антибиотики;
 - диуретики, *например*, фуросемид;
 - антимаболиты, *например*, метотрексат;
 - салицилаты, *например*, аспирин.
- Производственная интоксикация.
 - Вирусные инфекции: эпидемический паротит (свинка); корь; краснуха; герпес; грипп и прочие вирусы.
 - Заболевания бактериальной этиологии: скарлатина; сифилис.
 - Воспаление: гнойный лабиринтит; менингит; аденоиды.
- Аутоиммунные и аллергические заболевания
- Новообразования
- Отосклероз
- Пожилой возраст

Воздействие громкого шума — более 80 дБ— к примеру, нахождение вблизи работающего реактивного двигателя, может привести к прогрессирующей тугоухости. Кроме того, временная или хроническая

тугоухость может быть результатом однократного воздействия чрезмерно громкого шума (например, при взрыве). Наиболее частая причина акустической травмы — прослушивание слишком громких музыкальных выступлений. Как правило, тугоухость, вызванная шумовым воздействием, проявляется сначала в октавной полосе со среднегеометрической частотой 4000 Гц, захватывая в дальнейшем речевые частоты (500 -

Портативные аудиопроигрыватели, способны воспроизводить звук, достаточно мощный для того, чтобы спровоцировать развитие тугоухости. Как правило, громкость их звучания может превышать 115 дБ. В то же время имеются данные, что даже менее громкие звуки (70 дБ) могут привести к потере слуха.

3 ПРАКТИЧЕСКАЯ ЧАСТЬ

Цель работы:

1. Ознакомиться с работой аудиометра.
2. Освоить метод определения порога слышимости с помощью аудиометра.
3. Построить аудиограмму воздушной проводимости для левого и для правого уха.

3.1 Описание установки

Исследование остроты слуха человека производится с помощью электроакустического прибора, называемого аудиометром или звукового генератора типа ГЗ-33 (ГЗ-34), представляющего собой источник синусоидальных электрических колебаний звуковых и ультразвуковых частот в диапазоне 20 – 200 000 Гц. Генератор снабжен аттенуатором - устройством для регулирования выходного напряжения (мощности) в заданное число раз, измеряемое обычно в дБ. Все необходимые при работе органы управления вынесены на панель прибора. На ней расположены:

- шкала «ЧАСТОТА Hz» и ручка плавной установки частоты – для установки частоты плавного диапазона;
- переключатель «МНОЖИТЕЛЬ» - для установки нужного диапазона частот;
- ручка «РЕГ. ВЫХОДА» - для плавной установки выходного напряжения;
- тумблер «Внутренняя нагрузка» для включения внутренней нагрузки 600 Ом;
- ручка «РАССТРОЙКА %» – для изменения частоты в пределах $\pm 1,5$ %;
- стрелочный прибор для контроля выходного напряжения;
- переключатель «ШКАЛА ПРИБОРА» – для переключения шкал прибора и контроля тока выходных ламп;
- переключатель «ВЫХ. СОПРОТИВЛЕНИЕ Ω » для переключения согласованных нагрузок «АТТ»;
- ручка «ПРЕДЕЛЫ ШКАЛ – ОСЛАБЛЕННЫЕ» - для введения затухания 0 – 100 дБ;
- тумблер «СЕТЬ» – для включения прибора;
- клемма для заземления.

3.2 Порядок выполнения работы

Включение генератора ГЗ-33.

1. Ручку «РЕГ 2. ВЫХОДА» без усилия поставить в крайнее левое положение.

2. Вилку шнура включить в сеть, тумблер включения поставить в положение «ВКЛ», дать прогреться генератору в течение 2-3 мин.

3. Переключатель «ВЫХ. СОПРОТИВЛЕНИЕ» поставить в положение АТТ (аттенюатор). Стрелка на лицевой панели генератора указывает на шкалу аттенюатора, проградуированную в десятках дБ.

4. Переключателем «ПРЕДЕЛЫ ШКАЛ – ОСЛАБЛЕНИЕ» установить на шкале аттенюатора нуль дБ.

5. Поворотом ручки «РЕГ. ВЫХОДА» установить на шкале дБ стрелочного прибора нуль дБ. В этом случае на гнездо «ВЫХОД» подается 0,78 В.

Определение границ воспринимаемых звуковых частот.

1. С помощью переключателя диапазонов и шкалы настройки установить частоту 20 кГц.

2. Надеть на обследуемого головные телефоны и плавно уменьшить частоту генератора до тех пор, пока не появится звук. Соответствующая этому звуку частота и является наибольшей частотой, которую воспринимает обследуемый.

3. Для более точного определения верхней граничной частоты опыт следует повторять несколько раз, подходя к ней со стороны более высоких и низких частот.

4. По наименьшим частотам определить среднее значение верхней границы воспринимаемого звука по формуле:

$$\nu_B = \frac{\frac{\nu_1 + \nu_3 + \nu_5}{3} + \frac{\nu_2 + \nu_4}{2}}{2}, \quad (3.1)$$

где частоты ν с нечетными индексами получены при уменьшении частоты генератора, с четными – при увеличении частоты.

5. Аналогичным способом найти нижнюю границу частот воспринимаемую звуки начиная с наименьшей частотой – 20 Гц.

3.3 Построение графика зависимости уровня интенсивности от частоты на пороге слышимости

1. При работе с генератором ГЗ-33 (ГЗ-34), у которого на шкале вольтметра имеется шкала дБ. Регулятором выхода установить стрелку вольтметра на нуль шкалы дБ. Переключить «ШКАЛЫ ПРИБОРА» установить в положение 1В.

2. Установить частоту 125 Гц. Включить наушники в гнезда «ВЫХОД». При нормальной работе генератора будет слышен звук.

3. Переключателем «ПРЕДЕЛЫ ШКАЛЫ ОСЛАБЛЕНИЯ» добиться минимальной слышимости звука.

4. Добавить к величине децибел аттенюатора $L1$ численное значение децибел (плюс или минус) шкалы вольтметра $L2$. Сумма $L\nu = L1 + L2$ указывает на сколько дБ ослаблено выходное напряжение по сравнению с начальным, равным 0,78 В, для звука с частотой 125 Гц.

5. Аналогично определить пороговый уровень слышимости звука в

дБ для других частот, отличающихся на октаву: 250, 500, 1000, 2000, 4000, 8000.

6. Перед каждым новым измерением ручкой «РЕГ. ВЫХОДА» установить стрелку прибора на нуль дБ. Для большей точности измерения на всех частотах проводить трижды, определив затем среднее значение.

7. Вычислить пороговый уровень интенсивности звука (L_v пор) для каждой частоты по формуле:

$$L_{v \text{ пор}} = L_v - L_{1000} \quad (3.2)$$

где L_{1000} - среднее значение ослабления напряжения в дБ для звуков частотой 1000 Гц; L_v - среднее значение ослабления напряжения в дБ для звука с частотой v . Формула (3.2) получается следующим образом: пороговый уровень интенсивности звука с учетом того, что

$$\frac{J}{J_1} = \frac{U^2}{U_1^2} \quad (3.3)$$

определяется по формуле:

$$L_{v \text{ пор}} = 20 \lg \frac{U_v}{U_0} \quad (3.4)$$

где U_v – напряжение выходного сигнала на пороге слышимости для выбранной частоты, U_0 – для частоты 1000 Гц. Ослабление выходного напряжения U_v в дБ определяется по формуле:

$$L_v^- = 20 \lg \frac{U_v}{0,78} \quad (3.5)$$

где 0,78 В – напряжение выходного сигнала в вольтах, соответствующее нулю дБ на шкале стрелочного прибора и АТТ. Для частоты 1000 Гц эта формула имеет вид:

$$L_{1000}^- = 20 \lg \frac{U_v}{0,78} \quad (3.6)$$

Используя свойства логарифмов и, вычитая соответственно из (3.5) левую и правую части (3.6), получим формулу (3.2).

8. Все результаты занести в таблицу 3.1.

Таблица 3.1 – Результаты измерений

Lv, дБ	Частота, Гц						
	125	250	500	1000	2000	4000	8000
L_v^I							
L_v^{II}							
L_v^{III}							
L_v^-							
$L_{v \text{ пор}} = L_v - L_{1000}$							

9. По значениям, приведенным в таблице 3.1 построить график (аудиограмма) зависимости уровня интенсивности на пороге слышимости от частоты. По оси

абсцисс отложить частоту в логарифмическом масштабе ($\lg\nu$), а по оси ординат – уровень интенсивности в дБ в линейном масштабе.

КОНТРОЛЬНЫЕ ВОПРОСЫ

1. Что такое звук?
2. Классификация звуков. В каком диапазоне частот лежат звуки, воспринимаемые ухом человека? На какой частотный интервал приходится максимальная чувствительность уха?
3. Что называется интенсивностью звука? Единицы измерения интенсивности.
4. Перечислить физические характеристики звука и соответствующие им физиологические характеристики.
5. Дать определение порога слышимости, болевого порога. Указать их значение по интенсивности и звуковому давлению.
6. Какая существует зависимость между интенсивностью звука и звуковым давлением?
7. Что называется уровнем интенсивности звука?
8. В чем заключается относительный метод при составлении шкалы уровня интенсивности, шкалы уровня громкости?
9. В чем заключается сущность психофизического закона Вебера-Фехнера?
10. В каких единицах измеряется уровень интенсивности, уровень громкости?
11. Звуковые методы исследования в клинике.
12. Влияние инфразвука на биологические объекты

СПИСОК РЕКОМЕНДОВАННОЙ ЛИТЕРАТУРЫ

1. Ремизов А.Н. Медицинская и биологическая физика: Учеб. для вузов. / А.Н. Ремизов, А.Г. Максина, А.Я. Потапенко. – 4 изд., перераб. и дополн. – М.: Дрофа, 2003. – 560 с. – ил.
2. Федорова В.Н. Краткий курс медицинской и биологической физики с элементами реабилитологии. Лекции и семинары: Учебное пособие. / В.Н. Федорова, Л.А. Степанова. – М.: ФИЗМАТЛИТ, 2005. – 624 с.