

**МИНИСТЕРСТВО ЦИФРОВОГО РАЗВИТИЯ,
СВЯЗИ И МАССОВЫХ КОММУНИКАЦИЙ РОССИЙСКОЙ ФЕДЕРАЦИИ**

**ФЕДЕРАЛЬНОЕ ГОСУДАРСТВЕННОЕ БЮДЖЕТНОЕ ОБРАЗОВАТЕЛЬНОЕ
УЧРЕЖДЕНИЕ ВЫСШЕГО ОБРАЗОВАНИЯ
«САНКТ-ПЕТЕРБУРГСКИЙ ГОСУДАРСТВЕННЫЙ УНИВЕРСИТЕТ
ТЕЛЕКОММУНИКАЦИЙ ИМ. ПРОФ. М.А. БОНЧ-БРУЕВИЧА»
(СПбГУТ)**

КАФЕДРА ТЕЛЕВИДЕНИЯ И МЕТРОЛОГИИ

2024

Свиньина О. А.

Методические указания
к выполнению лабораторной работы по дисциплине
«Физические основы акустики»

Лабораторная работа [АНТ]
Тональная пороговая аудиометрия по воздушной проводимости

Лабораторная работа «Тональная пороговая аудиометрия по воздушной проводимости» предназначена для изучения такого свойства слухового анализатора человека, как абсолютный порог слышимости (АПС).

Перед выполнением лабораторной работы необходимо изучить раздел «Слух и восприятие акустических сигналов» [1] и раздел «Слух и восприятие звуковых сигналов» [2].

Лабораторная работа выполняется с использованием персонального компьютера (ПК) установленным бесплатным программным обеспечением **Audacity** (Прил. 1) и головных телефонов.

Содержание

Содержание	2
1. Абсолютный порог слышимости	3
2. Формирование тональных испытательных сигналов	4
3. Настройка воспроизводящего оборудования	5
3.1. Цифровая шкала dBFS	5
3.2. Определение уровня цифрового сигнала, соответствующего уровню 0 dB SPL	6
4. Выполнение тональной аудиометрии	7
4.1. Измерение на восходящих сигналах	7
4.2. Измерение на нисходящих сигналах	7
5. Обработка и анализ результатов исследования	8
5.1. Получение результатов измерения АПС и ПМ для учебной группы/потока	8
5.2. Обработка результатов проведения измерения АПС и ПМ для учебной группы/потока	9
5.3. Построение графиков частотных зависимостей АПС и ПМ	9
5.4. Анализ результатов исследования	10
5.5. Требования к содержанию отчета	10
6. Список использованных источников	10
Приложение 1 Программное обеспечение	11
Приложение 2 Таблицы для заполнения протокола и отчета	12

1. Абсолютный порог слышимости

Порог слышимости — это минимальное звуковое давление, при котором еще существует слуховое ощущение. Наличие порога слышимости определяется строением слуховой системы человека. Этот порог характеризует чувствительность уха к интенсивности звуковой энергии. Величина порога слышимости зависит от характера используемых звуковых колебаний и условий измерений.

Порог слышимости называют **абсолютным** при измерении его на тональном звуке в полной тишине. Обычно абсолютный порог слышимости выражают в шкале **dB SPL** (**dB Sound Pressure Level**) по отношению к стандартной величине звукового давления $p_0 = 2 \cdot 10^{-5}$ Па.

Границы воспринимаемого слухом частотного диапазона довольно широки: обычно **от 20 до 20000 Гц**. Реально для большинства людей в молодом возрасте воспринимаемый слухом частотный диапазон составляет **от 30–35 Гц до 16–18 кГц**. В области **частот от 2 до 5 кГц** чувствительность слуха максимальна (на этих частотах АПС меньше $2 \cdot 10^{-5}$ Па); она медленно ухудшается в сторону низких частот и заметно быстрее — в сторону верхних частот. Те спектральные компоненты полезного сигнала, которые лежат ниже абсолютного порога слышимости, на слух не воспринимаются.

Абсолютный порог слышимости аппроксимируется формулой:

$$N_{\text{АПС}} = 3,64 \cdot f^{-0,8} - 6,5 \cdot e^{-0,6 \cdot (f-3,3)^2} + 10^{-3} \cdot f^4 \quad (1)$$

где: $N_{\text{АПС}}$ — абсолютный порог слышимости, **dB SPL**; f — частота, **кГц**.

Данная аппроксимация широко используется в различных алгоритмах кодирования звуковых сигналов. Она включает в себя три составляющие: первая определяет уменьшение чувствительность слуха в области низких частот; вторая — повышение чувствительность в области частот около **3 кГц**; и третья составляющая определяет уменьшение чувствительности в области высоких частот. Низкочастотный спад чувствительности слуха, как правило, объясняется влиянием собственных шумов слуховой системы. В свою очередь два оставшихся компонента характеризуют неравномерность передаточной характеристики среднего уха.

Пороги слышимости для левого и правого уха даже у вполне здоровых людей различны. Кроме того, результаты измерений зависят оттого, что используется при измерениях: громкоговоритель или головные телефоны. При использовании головных телефонов получаемые значения абсолютного порога слышимости выше на **5–10 дБ**. С возрастом слух людей притупляется, быстрее всего на высоких частотах. Обычно на частоте **10 кГц** чувствительность уха у 60-летнего человека на **20 дБ** ниже, чем у 20-летнего.

Величина абсолютного порога слышимости зависит также и от длительности стимула. Слух человека инерционен, он интегрирует энергию воздействующего сигнала за определенный промежуток времени и только после того, когда накопленная энергия превышает некоторый порог, возникает ощущение присутствия звука.

Длительность воздействия звука при проведении измерений АПС должна составлять не менее **250 мс**. При меньших значениях величина абсолютного порога слышимости повышается. Например, уменьшение длительности воздействующего сигнала **с 200 до 20 мс** сопровождается повышением абсолютного порога на **10 дБ**. Очень короткие звуки воспринимаются как щелчок. Необходимо определенное время воздействия звукового стимула, чтобы можно было определить высоту тона. Длина этого минимального отрезка зависит от частоты: при частоте **50 Гц** она равна **60 мс**, при частоте **1000 Гц** — **10 мс**. Для точной оценки уровня громкости звука необходим временной интервал около **200 с**.

В случае, когда условие полной тишины не выполняется, получаемый порог слышимости называют **относительным**. **Относительный порог слышимости**, как правило, выше абсолютного. Данный факт объясняется эффектом маскировки.

2. Формирование тональных испытательных сигналов

Сформируйте 24 тональных испытательных сигнала с частотами, значения которых приведены в табл. 1 [3,4], в соответствии с методикой, описанной ниже.

Таблица 1

Значения частот испытательного сигнала для проведения измерения АПС и порогов маскировки

№	Частота f , Гц	№	Частота f , Гц	№	Частота f , Гц
1	100	9	630	17	4000
2	125	10	800	18	5000
3	160	11	1000	19	6300
4	200	12	1250	20	8000
5	250	13	1600	21	10000
6	315	14	2000	22	12500
7	400	15	2500	23	14000
8	500	16	3150	24	16000

Запустите ПО **Audacity** (Прил. 1). Откройте диалоговое окно настроек ПО **Audacity** с помощью пункта меню **Edit — Preferences**. В разделе настроек **Interface** установите диапазон измерителя уровней от 0 до минус 120 дБ. Сохраните настройки, нажав кнопку **Ok**.

В новом проекте с помощью пункта меню **Project Rate (Hz)** на панели **Selection Toolbar** установите частоту дискретизации равной 48000 Гц. Создайте монофоническую дорожку с помощью пункта меню **Tracks — Add New — Mono track** или нажав клавиши **Ctrl+Shift+N**. С помощью меню **Audio Track** на панели управления дорожкой установите разрешение квантования равным 32 бит/отсчет.

С помощью пункта меню **Transport — Cursor to — Project Start** установите курсор в начало временной оси проекта.

Сформируйте испытательный сигнал с помощью меню **Generate — Tones**; установите следующие параметры тонального сигнала:

- форма сигнала: синусоидальная;
- частота сигнала: f , Гц (см. табл. 1);
- амплитуда: 1;
- длительность: 30 с.

С помощью меню **Audio Track — Name** на панели управления дорожкой задайте имя дорожки: «**f Hz**», где **f** соответствует частоте испытательного сигнала в Гц.

Аналогичным образом создайте на отдельных звуковых дорожках испытательные сигналы для всех частот, приведенных в табл. 1.

Сохраните полученный проект с помощью пункта меню **File — Save Project — Save Project As**. Создайте две копии проекта, дав одной имя «АНТ_FadeUp», другой — «АНТ_FadeDown».

Откройте проект «АНТ_FadeUp».

Выделите все сформированные дорожки с помощью пункта меню **Select — All** или нажав клавиши **Ctrl+A**. Обработайте испытательные сигналы с помощью инструмента **Effects — Adjustable fade** для получения восходящих сигналов (сигналов, уровень которых нарастает с течением времени). Установите следующие значения параметров инструмента:

- **Fade Type:** Fade Up;
- **Mid-fade Adjust:** минус 100%;
- **Start/End As:** dB Gain;
- **Start (or End):** 0 дБ;
- **End (or Start):** минус 120 дБ.

Сохраните полученный проект с помощью пункта меню **File — Save Project — Save Project** или нажав клавиши **Ctrl+S**.

3. Настройка воспроизводящего оборудования

3.1. Цифровая шкала dBFS

При проведении исследования свойств слухового анализатора с помощью персонального компьютера все измерения проводятся в цифровой шкале **Full Scale**. Термин **Full Scale** буквально означает «полная шкала», и соответствует максимально возможной амплитуде сигнала.

В цифровых системах полная шкала определяется максимальной величиной разрядной сетки аналого-цифрового преобразователя для заданного числа уровней квантования. При выходе значения отсчета сигнала за пределы разрядной сетки происходит амплитудное ограничение (англ. *clipping*), что приводит к возникновению в сигнале нелинейных искажений.

Абсолютное значение амплитуды сигнала в линейной шкале **Full Scale** выражается числом от 0 до 1 или в процентах. Уровень сигнала в логарифмической шкале **Full Scale** выражается в **dBFS**.

Амплитуда и уровень сигнала в шкале **Full Scale** связаны выражениями:

$$N_{FS} = 20 \lg \left(\frac{A}{A_0} \right) \quad (2)$$

$$A = A_0 \cdot 10^{\frac{N_{FS}}{20}} \quad (3)$$

где N_{FS} — уровень сигнала в **dBFS**; A — амплитуда сигнала в линейной шкале **Full Scale**; $A_0 = 1$ — величина, принятая за базис (максимальное значение амплитуды сигнала).

В звуковых редакторах и в цифровых звуковых рабочих станциях, а также в аудиофайлах формата **WAV** используется арифметика с плавающей точкой, и диапазон шкалы **Full Scale** составляет от -1 до 1 [5]. В этом случае для расчета уровня сигнала в выражение (3) необходимо подставить значение амплитуды выпрямленного сигнала:

$$N_{FS} = 20 \lg \left(\frac{|A|}{A_0} \right) \quad (4)$$

Переход от значения уровня цифрового сигнала к значению уровня звукового давления, создаваемого громкоговорителем или головными телефонами, является относительным и зависит от передаточной функции цифро-аналогового преобразователя (ЦАП), а также от чувствительности воспроизводящего оборудования. Для установления точной связи между уровнем сигнала в шкале **dBFS** и уровнем звукового давления в шкале **dB SPL** необходимо произвести измерение последнего с помощью шумомера при подаче известного уровня цифрового сигнала на вход ЦАП.

В рамках выполнения лабораторной работы переход между значениями уровней в указанных шкалах будет выполняться по упрощенной схеме: за нулевой уровень звукового давления, соответствующий минимальному различимому на слух звуковому давлению **20 мкПа**, будет приниматься уровень цифрового сигнала, соответствующий порогу слышимости чистого тона с частотой **2000 Гц**. Иными словами, связь между уровнем цифрового сигнала и уровнем звукового давления будет определяться равенством:

$$0 \text{ dB SPL} \equiv N_{FS}(2000 \text{ Гц}) \text{ dBFS} \quad (5)$$

где $N_{FS}(2000 \text{ Гц})$, **dBFS** — порог слышимости тонального сигнала с частотой **2000 Гц** при отсутствии мешающего шума. Например, уровень звукового давления **10 dB SPL** будет

соответствовать уровню цифрового сигнала ($N_{FS}(2000 \text{ Гц}) + 10$) dBFS в шкале **Full Scale**. Цена деления обеих шкал одинакова, так как и амплитуда цифрового сигнала, и звуковое давление является линейной величиной: увеличение амплитуды цифрового сигнала или звукового давления в два раза приведет к возрастанию соответствующего уровня на **6 дБ**.

Равенство (6) будет справедливо только при условии, что во время выполнения измерений **относительный уровень воспроизведения сигналов, установленный в настройках операционной системы или драйвера звуковой карты, остается постоянным**. В случае необходимости воссоздания условий проведения измерений уровень воспроизведения сигналов звуковой картой необходимо зафиксировать в протокол измерений. Если оборудование воспроизведения (громкоговоритель или головные телефоны) имеют регулировку уровня, установленное значение уровня сигнала также должно оставаться постоянным в течение выполнения лабораторной работы. Во избежание нарушения условий измерения рекомендуется использовать проводные головные телефоны без возможности регулировки уровня.

3.2. Определение уровня цифрового сигнала, соответствующего уровню 0 dB SPL

Подключите к компьютеру головные телефоны.

В ПО **Audacity** на панели управления устройствами ввода/вывода **Device Toolbar** выберите головные телефоны в качестве основного устройства вывода для ПО **Audacity**.

Откройте проект «АНТ_FadeUp».

С помощью пункта меню **View — Mixer Board** откройте окно микшера. Для повышения точности измерения уровня сигнала разверните окно микшера на весь экран.

Диапазон изменения порога слышимости (ПС) в зависимости от частоты составляет примерно **90 дБ** в полной тишине, а при проведении измерений в незаглушенном помещении (учебная лаборатория, жилое помещение) — порядка **60–70 дБ**. При использовании разрядности квантования **32 бит/отсчет** с плавающей точкой звуковой редактор **Audacity** позволяет измерять уровни сигнала от **–758 до 0 dBFS**¹ [6].

Измерения порога слышимости необходимо начинать с той частоты, на которой он имеет значение, близкое к **0 dB SPL**, т. е. с **2000 Гц**.

Найдите в окне микшера дорожку с наименованием «**2000 Hz**», содержащую испытательный сигнал с частотой **2000 Гц**. Для прослушивания только одной звуковой дорожки «**2000 Hz**» нажмите на панели управления этой дорожкой кнопку **Solo**; при этом все остальные дорожки будут отключены, что соответствует нажатию кнопки **Mute** на панели управления каждой из дорожек.

С помощью пункта меню **Transport — Cursor to — Project Start** установите курсор в начало временной оси проекта.

Наденьте головные телефоны. Запустите воспроизведение испытательного сигнала, нажав кнопку **Play** на панели **Transport Toolbar** или клавишу «пробел». При появлении первых признаков слышимости звукового сигнала остановите воспроизведение, нажав кнопку **Pause** на панели **Transport Toolbar** или клавишу **P**.

Пользуясь шкалой измерителя уровня на дорожке «**2000 Hz**», определите уровень $N_{FS}(2000 \text{ Гц})$, dBFS, который сигнал имел в момент выключения. Убедитесь, что уровень $N_{FS}(2000 \text{ Гц})$ составляет не менее **минус 80 дБ** и не более **минус 70 дБ**. Если полученное значение $N_{FS}(2000 \text{ Гц})$ выходит за пределы указанного диапазона, то необходимо изменить уровень сигнала звуковой картой в настройках операционной системы и драйвера звуковой карты или положение регулятора уровня на устройстве воспроизведения и повторить измерение. Необходимо добиться того, чтобы значение ПС, получаемое для частоты **2000 Гц**, лежало в диапазоне **от –80 до –70 dBFS**.

¹ Динамический диапазон аудиофайла зависит от разрядности цифрового сигнала. Для разрядности 16 бит/отсчет (с фиксированной точкой) динамический диапазон сигнала в шкале dBFS составляет 96 дБ; 24 бит/отсчет (с фиксированной точкой) — 144 дБ; 32 бит/отсчет (с плавающей точкой) — 758 дБ.

***Примечание.** При выполнении дальнейших измерений не изменяйте уровень сигнала в настройках операционной системы или драйвера звуковой карты, а также положение регулятора уровня на устройстве воспроизведения!*

4. Выполнение тональной аудиометрии

4.1. Аудиометрия на восходящих сигналах

Откройте проект «АНТ_FadeUp».

Найдите в окне микшера дорожку с наименованием «100 Hz», содержащую испытательный сигнал с частотой 100 Гц. Для прослушивания только одной звуковой дорожки «100 Hz» нажмите на панели управления этой дорожкой кнопку **Solo**; при этом все остальные дорожки будут отключены, что соответствует нажатию кнопки **Mute** на панели управления каждой из дорожек.

С помощью пункта меню **Transport — Cursor to — Project Start** установите курсор в начало временной оси проекта.

С помощью пункта меню **View — Mixer Board** откройте окно микшера. Для повышения точности измерения уровня сигнала разверните окно микшера на весь экран.

Наденьте головные телефоны. Запустите воспроизведение испытательного сигнала, нажав кнопку **Play** на панели **Transport Toolbar** или клавишу «пробел». При появлении первых признаков слышимости звукового сигнала остановите воспроизведение, нажав кнопку **Pause** на панели **Transport Toolbar** или клавишу **P**.

***Примечание.** Будьте внимательны! В области высокой чувствительности слуха (от 500 Гц до 5 кГц), где порог слышимости минимален, воспроизведение испытательного сигнала с уровнем, близким к $-15...0$ dBFS, может привести к чрезмерному возрастанию уровня громкости и возникновению неприятных ощущений в ушах! Остановите воспроизведение испытательного сигнала, не допуская возрастания громкости более, чем в 2–4 раза по сравнению с порогом слышимости (т. е. возрастания уровня сигнала не более, чем на 10–20 дБ)!*

Пользуясь шкалой измерителя уровня в микшере на дорожке «100 Hz», определите уровень $N_{\text{восх FS}}(100 \text{ Гц})$, dBFS, который сигнал имел в момент выключения. Занесите полученное значение в табл. П.1 отчета (Прил. 2) в соответствующую ячейку столбца «Уровень восходящего сигнала $N_{\text{восх FS}}$, dBFS».

Аналогично повторите измерения значения АПС для всех частот, приведенных в табл. 1.

В случае, если лабораторную работу выполняют несколько студентов, повторите измерения АПС для остальных членов бригады. Число снятых частотных зависимостей порога слышимости должно соответствовать числу студентов, выполняющих данную лабораторную работу.

4.2. Аудиометрия на нисходящих сигналах

Откройте проект «АНТ_FadeDown».

Обработайте каждый испытательный сигнал с помощью инструмента **Effects — Adjustable fade** для получения нисходящих сигналов (сигналов, уровень которых убывает с течением времени). Установите следующие значения параметров инструмента:

- **Fade Type: Fade Down;**
- **Mid-fade Adjust: минус 100%;**
- **Start/End As: dB Gain;**
- **Start (or End): $[N_{\text{восх FS}}(f) + 10]$ дБ,** где f — частота испытательного сигнала, Гц.

Максимальный уровень испытательного сигнала должен быть на 10 дБ выше значения порога слышимости, измеренного для сигнала с частотой f в ходе выполнения измерений

на восходящих сигналах (п. 4.1). В случае, если выполняется неравенство $N_{\text{восх}} FS(f) + 10 \geq 0$, установите параметр «**Start (or End)**» равным **0 dBFS**;

– **End (or Start)**: **минус 120 дБ**.

Сохраните полученный проект с помощью пункта меню **File — Save Project — Save Project** или нажав клавиши **Ctrl+S**.

Найдите в окне микшера дорожку с наименованием «**100 Hz**», содержащую испытательный сигнал с частотой **100 Гц**. Для прослушивания только одной звуковой дорожки «**100 Hz**» нажмите на панели управления этой дорожкой кнопку **Solo**; при этом все остальные дорожки будут отключены, что соответствует нажатию кнопки **Mute** на панели управления каждой из дорожек.

С помощью пункта меню **Transport — Cursor to — Project Start** установите курсор в начало временной оси проекта.

С помощью пункта меню **View — Mixer Board** откройте окно микшера. Для повышения точности измерения уровня сигнала разверните окно микшера на весь экран.

Наденьте головные телефоны. Запустите воспроизведение испытательного сигнала, нажав кнопку **Play** на панели **Transport Toolbar** или клавишу «пробел». Как только звуковой сигнал перестанет быть слышен, остановите воспроизведение, нажав кнопку **Pause** на панели **Transport Toolbar** или клавишу **P**.

Пользуясь шкалой измерителя уровня в микшере на дорожке «**100 Hz**», определите уровень $N_{\text{нисх}} FS(100 \text{ Гц})$, **dBFS**, который сигнал имел в момент выключения. Занесите полученное значение в табл. П.1 отчета в соответствующую ячейку столбца «Уровень нисходящего сигнала $N_{\text{нисх}} FS$, **dBFS**».

Аналогично повторите измерения значения АПС для всех частот, приведенных в табл. 1.

В случае, если лабораторную работу выполняют несколько студентов, повторите измерения АПС для остальных членов бригады. Число снятых частотных зависимостей порога слышимости должно соответствовать числу студентов, выполняющих данную лабораторную работу.

5. Обработка и анализ результатов исследования

Переведите полученные значения АПС из **dBFS** в **dB SPL**, пользуясь равенством (5). Результаты расчета занесите в табл. П.1 отчета (Прил. 2) в соответствующие ячейки.

***Примечание.** Уровень 0 dB SPL определяется только один раз по результатам измерений, выполненных в ходе выполнения п. 3.2 и при обработке результатов измерения не изменяется.*

Для каждой частоты (табл. 1) рассчитайте среднее арифметическое значение АПС, полученного на восходящем сигнале и на нисходящем сигнале, в соответствии с выражением:

$$N_{\text{АПС}}(f) = \frac{N_{\text{восх}}(f) + N_{\text{нисх}}(f)}{2}. \quad (6)$$

Результаты расчета занесите табл. П.1 (Прил. 2) в соответствующие ячейки.

5.1. Получение результатов измерения АПС для учебной группы/потока

Для получения достоверных результатов измерения АПС, соберите со всех студентов Вашей группы/потока полученный во время выполнения данной лабораторной работы статистический материал, т. е. частотные зависимости значений АПС, полученные каждым студентом.

Полученный статистический материал необходимо занести в табл. П.2 (Прил. 2) для выполнения их последующего усреднения.

5.2. Обработка результатов проведения измерения АПС для учебной группы/потока

Выполните обработку результатов измерений частотных зависимостей в соответствии с методикой, описанной ниже.

Рассчитайте среднее значение порога слышимости $N_{\text{АПС ср}}(f)$, **dB SPL**, на основании данных табл. П.2 отчета для всех исследуемых значений частоты тонального сигнала.

Для этого сначала из полученного ряда значений порога слышимости для каждой частоты отбросьте крайние значения:

- для случая, когда в испытаниях принимают участие 4–6 слушателей, отбросьте максимальное и минимальное из полученных значений;
- для случая, когда в испытаниях принимают участие 10 и более слушателей, отбросьте по 2–3 наименьших и наибольших значений (в зависимости от общего количества оценок).

Для оставшихся значений рассчитайте среднее арифметическое значение по формуле (7) [7]:

$$N_{\text{АПС ср}}(f) = \frac{\sum_{i=1}^n N_{\text{АПС } i}(f)}{n} \quad (7)$$

где: $N_{\text{АПС } i}(f)$ — значение порога слышимости тонального сигнала с частотой f , **Гц**, отдельного слушателя; n — количество усредняемых значений (после исключения наименьших и наибольших значений); $N_{\text{АПС ср}}(f)$ — среднее арифметическое значение порога слышимости тонального сигнала с частотой f , **Гц**.

1) Для полученных усредненных значений $N_{\text{ср}}(f)$ рассчитайте среднеквадратическое отклонение $\sigma(f)$ по формуле (8), где $\tilde{D}(f)$ — дисперсия, рассчитываемая по формуле (9) [7]:

$$\sigma(f) = \sqrt{\frac{\tilde{D}(f)}{n}} \quad (8)$$

$$\tilde{D}(f) = \frac{\sum_{i=1}^n (N_i - N_{\text{ср}})^2}{n - 1} \quad (9)$$

2) Принимая гипотезу, что распределение статистического материала является нормальным, при доверительной вероятности $\beta = 0,9$ из следует, что значение величины $t_\beta = 1,643$. Величина t_β определяет для нормального закона число среднеквадратических отклонений, которое нужно отложить вправо и влево от центра рассеивания для того, чтобы вероятность попадания в полученный участок была равна β .

Для исследуемого статистического материала рассчитайте значения доверительного интервала по формуле (10) [7]:

$$I_\beta(f) = (N_{\text{ср}}(f) - t_\beta \cdot \sigma(f); N_{\text{ср}}(f) + t_\beta \cdot \sigma(f)) \quad (10)$$

Таким образом, для каждого исследуемого значения скорости цифрового потока рассчитайте доверительный интервал, в который с вероятностью 0,9 будут попадать значения порога слышимости, получаемые при проведении измерений.

Результаты расчета занесите в табл. П.3 (Прил. 2) отчета.

5.3. Построение графиков частотных зависимостей АПС и ПМ

Пользуясь любым доступным программным обеспечением, позволяющим строить графики зависимости одной величины от другой, на основании полученных результатов постройте на одной координатной плоскости графики следующих зависимостей:

- частотная зависимость среднего значения АПС и соответствующий доверительный интервал;
- частотная зависимость теоретической аппроксимации АПС (см. выражение (1), п. 1).

Для построения графика используйте логарифмическую или дробно-октавную шкалу частот и шкалу уровней в **dB SPL**; подпишите оси и оформите легенду.

5.4. Анализ результатов исследования

Проанализируйте полученные в ходе выполнения лабораторной работы результаты. Сделайте следующие выводы и обоснуйте их теоретически:

- 1) Соответствует ли полученная частотная зависимость АПС теоретической аппроксимации?
- 2) Чем обусловлены отклонения измеренного АПС от его теоретической аппроксимации (при их наличии)?
- 3) Как влияют условия проведения измерений на получаемые результаты аудиометрии?
- 4) Как влияют характеристики оборудования, использованного для проведения измерений, на результаты аудиометрии?

5.5. Требования к содержанию отчета

Лабораторная работа должна быть выполнена студентом самостоятельно. Сдавать на проверку отчет, подготовленный не самостоятельно, недопустимо.

Отчет должен быть оформлен в соответствии с Правилами подготовки и оформления электронных отчетов, сохранен **ИСКЛЮЧИТЕЛЬНО** в формате **PDF**.

Содержание отчета:

- 1) ФИО студента и номер учебной группы;
- 2) табл. П.1–П.3 (Прил. 2);
- 3) графики, полученные в ходе выполнения п. 4.3;
- 4) выводы по результатам анализа полученных результатов, обоснованные теоретически.

6. Список использованных источников

1. Ковалгин Ю.А. и др. Акустика: Учебник для вузов. Москва: Горячая линия – Телеком, 2009. 660 с.
2. Алдошина И.А. и др. Электроакустика и звуковое вещание: Учебное пособие для вузов. Москва: Горячая линия – Телеком, Радио и связь, 2007. 872 с.
3. ГОСТ Р ИСО 226-2009 Акустика. Стандартные кривые равной громкости. Москва: Стандартинформ, 2010. 20 с.
4. IEC 60645-1 Electroacoustics – Audiometric equipment – Part 1: Equipment for pure-tone audiometry. Geneva: IEC, 2012. 33 p.
5. Kabal P. Audio File Format Specifications [Электронный ресурс] — URL: <http://www-mmsp.ece.mcgill.ca/Documents/AudioFormats/WAVE/WAVE.html> (дата обращения: 06.09.2020).
6. 32-Bit Float Files Explained—Sound Devices [Электронный ресурс]. 2022. URL: <https://www.sounddevices.com/32-bit-float-files-explained/> (дата обращения: 19.03.2023).
7. Вентцель Е.С. Теория вероятностей. Москва: Наука, 1964.

Программное обеспечение

Задание выполняется с использованием персонального компьютера (ПК) с операционной системой **Windows, macOS** или **GNU/Linux**².

Для выполнения лабораторной работы установите на ПК бесплатный звуковой редактор **Audacity**³ (табл. П3). Во избежание проблем с установкой программного обеспечения, следуйте инструкциям разработчиков.

Перед выполнением практического задания рекомендуется ознакомиться с документацией **Audacity** (табл. П3).

Таблица П.1

Программное обеспечение

№	Программное обеспечение и электронный ресурс
1	Audacity (Windows, macOS, GNU/Linux) https://www.audacityteam.org/
2	Документация Audacity https://manual.audacityteam.org/

² В учебно-методическом пособии изложен порядок выполнения задания на ПК с операционной системой Windows.

³ В учебно-методическом пособии изложен порядок выполнения задания в Audacity версии 3.1.3.

Таблицы для заполнения протокола и отчета

Таблица П.2

Результаты измерения абсолютного порога слышимости

№	Частота тонального сигнала f , Гц	Порог слышимости тонального сигнала				
		$N_{\text{восх } FS}$, dBFS	$N_{\text{восх}}$, dBSPL	$N_{\text{нисх } FS}$, dBFS	$N_{\text{нисх}}$, dBSPL	$N_{\text{АПС}}$, dBSPL
1	100					
2	125					
3	160					
4	200					
5	350					
6	315					
7	400					
8	500					
9	630					
10	800					
11	1000					
12	1250					
13	1600					
14	2000					
15	2500					
16	3150					
17	4000					
18	5000					
19	6300					
20	8000					
21	1000					
22	12500					
23	14000					
24	16000					

Таблица П.3

Результаты измерения АПС в учебной группе/потоке

№	Фамилия ИО студента	Порог слышимости N , dBSPL, тонального сигнала с частотой сигнала f , Гц																							
		100	125	160	200	350	315	400	500	630	800	1000	1250	1600	2000	2500	3150	4000	5000	6300	8000	10000	12500	14000	16000
1																									
...																									
n																									

Таблица П.4

Средние значения АПС, полученные при анализе статистического материала для группы/потока

№	Параметр, dBSPL	Частота тонального сигнала f , Гц																							
		100	125	160	200	350	315	400	500	630	800	1000	1250	1600	2000	2500	3150	4000	5000	6300	8000	10000	12500	14000	16000
1	$N_{\text{АПС}}^{\text{CP}}$																								
2	σ																								
3	\tilde{D}																								
4	I_{β}																								