

**Федеральное агентство связи**

**Федеральное государственное образовательное бюджетное учреждение  
высшего профессионального образования**

**ПОВОЛЖСКИЙ ГОСУДАРСТВЕННЫЙ УНИВЕРСИТЕТ  
ТЕЛЕКОММУНИКАЦИЙ И ИНФОРМАТИКИ**

**ЭЛЕКТРОННАЯ  
БИБЛИОТЕЧНАЯ СИСТЕМА**

**Самара**

Федеральное государственное образовательное бюджетное учреждение  
высшего профессионального образования  
Поволжский государственный университет телекоммуникаций и информатики

Кафедра радиосвязи, радиовещания и телевидения

**Горчаков Б.М., Нагорная М.Ю.**

### **МЕТОДИЧЕСКАЯ РАЗРАБОТКА**

к лабораторной работе №2 «Исследование акустических характеристик  
телевизионных студий и концертных залов»  
по учебной дисциплине «Электроакустика и звуковое вещание» для  
специальности 210405 «Радиосвязь, радиовещание и телевидение»,  
бакалавриата 210700 «Инфокоммуникационные технологии и системы связи»,  
210400 «Радиотехника»

Самара  
2012

## 1. Цель работы

Целью работы является изучение студентами особенностей акустики студий звукового и телевизионного вещания и концертных залов, определяющих высокое качество звучания музыки и речи, ознакомление с одной из современных программ акустического проектирования помещений «Odeon 10.0 Combined».

## 2. Литература

1. Электроакустика и звуковое вещание / Под ред. Ю.А. Ковалгина. – М.: Горячая линия-Телеком, 2007. – 872 с.
2. Акустика: Учебник для вузов / Вахитов Ш.Я., Ковалгин Ю.А., Фадеев А.А. и др. – М.: Горячая линия-Телеком, 2009. – 660 с.
3. Радиовещание и электроакустика / Под ред. Ю.А. Ковалгина. – М.: Радио и связь, 2002. – 792 с.
4. Анерт В., Штеффен Ф. Техника звукоусиления. – М.: ООО «ПКФ «Леруша», 2003. – 416с.

## 3. Контрольные вопросы

При подготовке к работе студенты должны изучить влияние времени реверберации помещения на параметры высококачественного звучания и методы измерения времени реверберации, используя данную методическую разработку (раздел «Вопросы теории») и учебники /1/, /2/ и /3/.

Необходимо знать ответы на следующие контрольные вопросы:

1. Чем характеризуется диффузное звуковое поле?
2. Поясните процессы поглощения и отражения звука в помещении.
3. Какие субъективные оценки характеризуют параметры высококачественного звучания?
4. Что такое отзвук?
5. Какие характеристики отзвука влияют на слуховые ощущения при прослушивании музыки?
6. Как выглядит и как влияет на слуховые ощущения спектр собственных частот помещения?
7. Из каких соображений выбирают размеры концертных залов и музыкальных студий?
8. Приведите графики нарастания и спада плотности звуковой энергии в помещении.
9. Как влияют процессы нарастания и спада плотности звуковой энергии в помещении на слуховое восприятие?
10. Что называется временем реверберации?
11. Что называется временем оптимальной реверберации?
12. Как средний коэффициент звукопоглощения связан с коэффициентами звукопоглощения отдельных поверхностей?
13. Как поглощение связано с коэффициентом звукопоглощения? Назовите единицу измерения поглощения.

14. Что такое среднестатистическое расстояние свободного пробега звукового луча?

15. Что такое время свободного пробега звукового луча? Какая часть звуковой энергии, накопленной в помещении, поглощается за время свободного пробега?

16. Как зависит время оптимальной реверберации от размеров и назначения помещения?

17. Приведите схему измерения времени реверберации.

18. Какие сигналы могут использоваться при измерении времени реверберации?

#### 4. Порядок выполнения лабораторной работы

1. Установить demo–версию программы «ODEON 10.0 Combined Demo» на компьютере (файл “Setup.exe”), и далее следуя указаниям программы установки.

2. Ознакомиться с руководством по работе с программой (файл “Manuel”).

3. Исследовать акустические характеристики телевизионной студии. Для этого, открыв программу «ODEON 10.0 Combined Demo» (файл “Odw.exe”), выбрать помещение (меню «File», команда “Open room” – «открыть комнату (помещение)» – ТВ студию в Германии “PTV Studio open curtains”.

4. Открыв изображение внутреннего вида помещения (кнопка “3D OpenGL” в главном меню программы), оценить внутренний вид телевизионной студии, а также вид помещения снаружи.

5. Пронаблюдать распространение звуковой волны в плоскостях XY, XZ и YZ (для этого нажать кнопку «3D Billiard» в главном меню программы), обращая внимание на длину пути (Path), пройденного звуковой волной и соответствующее время (Time). Пронаблюдать характер отражения звуковых волн от стен, потолка и других препятствий.

Пронаблюдать распространение звуковой волны в трёхмерном пространстве («3D Random») во время начального участка реверберационного процесса. При дальнейшем распространении звуковой волны определить интервал времени, через который звук в зале станет диффузным. Пронаблюдать характер звукового поля через 1с после излучения звукового импульса. Сделать выводы.

Повторить наблюдения для источников звука, расположенных в других точках помещения.

6. Открыв окно информации об основных параметрах телевизионной студии (кнопка “j” “Room information” в главном меню программы), записать параметры помещения (ширину, длину и высоту студии). Используя эти данные, рассчитать объём  $V$  студии и суммарную площадь  $S$  всех поверхностей (пола, потолка и четырёх стен).

7. Рассчитать среднестатистическое расстояние свободного пробега звукового луча:

$$l_{cp} = \frac{4V}{S}. \quad (4.1)$$

8. Пронаблюдать распространение звуковых лучей в том же помещении (кнопка «3D Investigate Rays tracing»).

Выбрать звуковой луч 501, 1001, 1501, или ... – (по заданию преподавателя) последовательно нажимая кнопку «Single Forward», записать значение расстояний («Distance»), пройденное звуковым лучом после 1, 2, 3 и 4 отражений («Reflection») и соответствующее время прохождения («Time»).

Меняя размер изображения зала, и, поворачивая изображение с помощью мыши, пронаблюдать путь лучей в пространстве зала. Определив расстояние, пройденное лучом после многочисленных отражений (не менее 50), рассчитать значение расстояния свободного пробега звукового луча  $l_{cp}$ :

$$l_{cp} = \frac{s}{n},$$

где  $s$  – суммарное расстояние, пройденное звуковым лучом;  
 $n$  – число отражений звукового луча.

Повторить последнее измерение для лучей с последующими двумя номерами (Ray 502, 1002, ...), (Ray 503, 1003, ...). Сравнить полученные значения с теоретическими среднестатистическими значениями, полученными по формуле (4.1).

9. Пронаблюдать и зарисовать графики уменьшения уровня плотности звуковой энергии во всех октавах со средними частотами от 63 до 8000 Гц (кнопка «Global Estimate»). По полученным графикам определить значения времени реверберации. Повторить указанные измерения 3 раза для различных значений используемых при расчёте звуковых лучей (в процессе моделирования указываются в таблице). Сравнить результаты и графики при разных измерениях.

10. Зарисовать графики частотных характеристик времени реверберации  $T$  студии, рассчитанные компьютерной программой по графикам затухания уровня плотности звуковой энергии при использовании для интерполяции графиков спада уровня звука на 30дБ (от –5дБ до –35дБ) и на 20дБ (от –5дБ до –25дБ).

Сравнить полученные значения с оптимальными для студии с объёмом  $V$ , используя графики, приведённые на рисунках 5.7, 5.8 и 5.9. Сделать выводы.

11. Пронаблюдать рассчитанную компьютерной программой гистограмму распределения значений расстояния свободного пробега  $l_{cp}$  для числа звуковых лучей, использованных в расчёте не менее 5000. Записать значения  $l_{cp}$  и числа лучей. Повторить данное наблюдение для других источников звука. Сравнить полученные значения с результатами расчётов, полученными при выполнении пунктов задания 7 и 8. Сделать выводы. Какие из полученных результатов ближе к истинным?

12. Повторить исследования (пункты 5 – 11), проделанные при исследовании акустических характеристик ТВ студии в Германии “PTV Studio open curtains”, для других помещений: концертного зала ”Concert Hall” “Elmia Round Robin 2 detailed”, Byzantine church in Istanbul (Византийской церкви в Стамбуле), помещения исследовательского центра “Stud strup”. Помещения выбираются в

окне “Open room”. При расчётах использовать соответствующие данные о размерах конкретного помещения.

## **5. Вопросы теории**

### **5.1. Основные особенности акустического проектирования студий звукового и телевизионного вещания**

Если слушатель находится в концертном зале, звуковые волны приходят к ушам слушателя от каждого из музыкальных инструментов разными путями. Первой приходит прямая звуковая волна, так как она распространяется по кратчайшему пути. Вслед за ней поступают множество волн, отражённых от поверхностей помещения.

Совокупность отражённых звуковых волн образует реверберационный процесс в помещении, который имеет сложную спектральную, временную и пространственную структуру. Благодаря реверберации звучание инструментов и голосов кажется нам тембрально богаче, более объёмным и пространственным. Это звучание несёт также информацию об акустических особенностях помещения.

В студиях звукового и телевизионного вещания аналогично прямые и отражённые звуковые волны приходят в точки расположения микрофонов.

Длительность отзвука – время, в течение которого отзвук еще слышен. Длительность отзвука зависит от времени реверберации (свойство помещения), начального уровня сигнала, уровня помех, а также от порога чувствительности слуха и, следовательно, от частоты сигнала.

Время реверберации является главным критерием оценки акустических свойств помещения. Время реверберации рассчитывается на основе статистической теории реверберации, расчетные соотношения которой сравнительно простые и длительное время являлись основой инженерных расчётов при проектировании концертных залов.

Если время реверберации значительно отличается от оптимального значения, а частотная характеристика времени реверберации выходит за пределы допустимых значений, акустика зала слушателями и исполнителями будет оцениваться как плохая. Однако оптимальное время реверберации на всех частотах не гарантирует высокого качества звучания. Важную роль имеют первые отражения звукового сигнала, которые не могут быть рассчитаны на основе статистической теории.

Формы больших концертных телевизионных студий, малых и средних музыкальных студий, студий литературно-драматического блока весьма разнообразны. Их выбирают, исходя из архитектурно-строительных соображений и удобства размещения оркестрантов на игровой площадке студии. Для получения хороших акустических свойств стены и потолок студии должны иметь сложную форму (хорошо рассеивать отражаемую звуковую волну), а противоположные стены, пол и потолок не должны быть

параллельными. В результате современные студии имеют сложную форму, а неточность расчётов на основе статистической теории нередко приводила к необходимости дорогостоящих переделок после постройки студии, к так называемой «настройке» акустических характеристик.

Студии средних и малых размеров часто имеют форму прямоугольного параллелепипеда, стороны которого - длина  $l$ , ширина  $b$ , высота  $h$  - находятся в соотношении так называемого "золотого сечения":

$$\frac{l}{b} = \frac{b}{h} \quad \text{при} \quad l = b + h \quad (5.1)$$

Учитывая, что объем студии  $V = lbh$ , получаем:

$$h = 0,62\sqrt[3]{V}, \quad b = \sqrt[3]{V}, \quad l = 1,62\sqrt[3]{V} \quad (5.2)$$

Важен правильный выбор высоты студий  $h$ . Зависимость  $h = 0,62\sqrt[3]{V}$  совпадает с данными нормативных документов, которые составлены на основании опыта длительной эксплуатации залов. В больших концертных залах и музыкальных студиях допускается уменьшать высоту  $h$  на 10 — 20 % по сравнению с размером, получаемым из (5.2). Даже в самых крупных концертных залах и студиях с объемом более 10000 м<sup>3</sup> высота не должна превышать 14 м.

Размещаемые над оркестром звукорассеивающие конструкции следует подвешивать на высоте 6 — 8 м. В студиях небольшого объема выражение (5.2) приводит к недопустимо малой высоте, которая в любом случае не должна быть менее 3 м.

Объем концертных залов и музыкальных студий находится в прямой зависимости от максимального числа исполнителей. Удельный объем, приходящийся на одного оркестранта, должен быть не менее 10 — 18 м<sup>3</sup>, а на одного слушателя - не менее 10 м<sup>3</sup>. Площадь пола сцены, приходящаяся на одного исполнителя, должна быть не менее 1,8 — 3 м<sup>2</sup>.

Скученное расположение оркестра дезориентирует музыкантов, затрудняя исполнение и повышая психологическую нагрузку, что приводит к быстрой их утомляемости и потере контроля над качеством исполнения.

В таблицах 5.1 и 5.2 приведены основные требования к размерам музыкальных студий.

Таблица 5.1 – Основные типы музыкальных студий звукового и телевизионного вещания.

Наименование студии	Назначение	Оптимальное число исполнителей	Высота, м	Площадь пола, м <sup>2</sup>
Большая музыкальная	Музыкальные передачи крупных форм (классическая музыка в исполнении больших симфонических)	250	13	1000

	оркестров; хоровое пение и т.п.) с возможностью присутствия слушателей			
То же, но без слушателей	--	150	12	750
Средняя музыкальная	Симфоническая музыка (в исполнении средних по числу исполнителей оркестров)	40 - 65	8,5 - 10	350 - 450
	Запись эстрадной и джазовой музыки	35 - 60	8,5 - 10	350 - 450
Малая музыкальная	Запись небольших оркестров и хоров	30 - 35	8,0 - 8,3	250 - 300
Камерная	Исполнение камерной музыки, для солистов-вокалистов, музыкальных передач малых форм	10 - 15	6	150

Таблица 5.2 - Оптимальное соотношение сторон музыкальных студий

Объем студии, м <sup>3</sup>	Соотношение сторон		
	длина	ширина	высота
До 250	1,6	1,3	1
От 650 до 1250	2,5	1,5	1
От 2000 до 4000	3	2	1
От 4000 и больше	3,3	1,2	1

Параметры больших концертных залов аналогичны параметрам большой музыкальной студии с возможностью присутствия слушателей.

Форме речевых студий не придается большого значения в силу слабого влияния отражений на равномерность звукового поля в них. Однако этого нельзя сказать о музыкальных студиях и концертных залах. Значительно большее время реверберации музыкальных студий и их большие размеры могут привести к тому, что отражения от параллельных стен при значительной средней длине свободного пробега волны будут затухать медленнее других отражений, что приведет к заметной неравномерности поля. Придавая стенам



некоторую непараллельность, можно добиться уменьшения количества волн, звуковые лучи которых нормальны к плоскости стен, и поэтому имеющих наиболее упорядоченный характер. Такие волны могут создавать большую неравномерность звукового поля.

***Указанные выше соображения заставляют прибегать к трапецидальным и другим непрямоугольным формам музыкальных студий и концертных залов. Угол скоса стен таких помещений выбирается обычно до 10°. По той же причине пол и потолок в концертных залах и студиях делаются иногда наклонными с углом наклона около 5°. Ввиду неудобства планировки больших залов и студий с наклонными потолком и полом и скошенными стенами, стены часто делают ребристыми или придают форму усечённой пирамиды только той части помещения, где размещаются исполнители.***

Лучшая равномерность звукового поля может быть получена за счет оптимального распределения по поверхности студии звукопоглощающих материалов, а также за счет размещения вдоль стен и на потолке выпуклых отражающих поверхностей. Иногда, для создания хороших акустических условий, перераспределяют звукорассеивающие и звукопоглощающие материалы, сосредотачивая первые в той части студии, в которой размещается оркестр.

Все перечисленные особенности не поддаются теоретическому расчёту на основе статистической теории. Поэтому раньше после акустического расчёта, определяющего частотную характеристику времени реверберации и некоторые другие параметры (акустическое отношение, радиус гулкосты), опытные проектировщики выбирали расположение выпуклых отражающих поверхностей, звукопоглощающих материалов исходя из своего практического опыта.

При этом возможны были неточности и ошибки, устранение которых приводило к дополнительным (иногда значительным) затратам. Поэтому всегда была актуальна задача разработки методов расчета, позволяющих на этапе проектирования произвести точный анализ первых отражений, влияния расположения звукорассеивающих и звукопоглощающих конструкций на различные акустические характеристики помещений.

Эта задача решается в современных программах акустического проектирования, рассчитанных на использование быстродействующих компьютеров с большой ёмкостью памяти. Одной из таких программ является программа «ODEON 10,0 Combined».

Для ознакомления студентов с основными особенностями и возможностями программы при проведении лабораторной работы можно воспользоваться демонстрационной версией программы «ODEON 10,0 Combined Demo».

## 5.2. Статистическая теория акустических процессов в помещениях

Анализ акустических характеристик помещения может производиться на основе волновой или статистической теории.

Для помещений простой формы применяется волновая теория анализа характеристик помещения. В инженерной практике чаще пользуются более простыми, хотя и менее строгими, методами расчёта, основанными на статистической теории анализа процессов затухания отзвука. Современные компьютерные программы позволяют производить расчёт акустических характеристик помещения точными методами волновой теории и для помещений сложной формы. Это позволяет производить более точные расчеты акустических характеристик концертных залов, которые, как правило имеют сложную форму.

При выключении источника звука процесс затухания отзвука происходит на собственных частотах помещения по закону (на каждой из частот)

$$p_m = p_{rm} \exp [(-\alpha_r + j\omega_r) t] ,$$

где  $p_m$  – мгновенное значение амплитуды колебаний звукового давления,  $p_{rm}$  – начальное значение амплитуды колебаний звукового давления в момент выключения источника звука,

$\alpha_r$  – показатель затухания, зависящий от среднего значения коэффициента отражения звуковой волны на частоте  $\omega_r$ .

Пример спектра собственных частот помещения с размерами 10 x 6 x 4 м в полосе частот от 0 до 100 Гц приведён на рисунке 5.1.

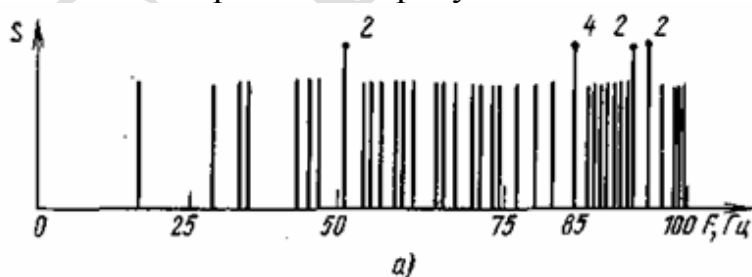


Рисунок 5.1

В области низких частот собственные частоты помещения отделены друг от друга сравнительно большими интервалами, и спектр собственных частот имеет дискретную структуру. В области более высоких частот спектр заметно уплотняется. В отдельных случаях собственные частоты в разных направлениях (по высоте помещения, длине, ширине, диагонали и так далее) могут совпадать. Такие спектральные составляющие на рисунке 5.6 показаны удлиненными линиями, над которыми указано число совпадающих спектральных составляющих. Такие совпадения являются нежелательными, так как при малых коэффициентах звукопоглощения поверхностей могут привести к тембральной окраске звучания.

Процесс затухания собственных колебаний в помещении называется реверберацией. Кривая затухания звука не будет монотонной из-за биений между собственными частотами. На рисунке 5.2 изображена временная структура ревербирующего сигнала. Уровень звукового давления  $N$  убывает примерно по линейному закону.

В начальной стадии затухания отзвука структура отражённых сигналов (первые отражения) дискретна. По мере возрастания времени отраженные сигналы практически (с учётом инерционности слуха) сливаются друг с другом.

Данная лабораторная работа посвящена исследованию процесса затухания отзвука на основе статистической теории реверберации. Статистическая теория основана на диффузионной модели звукового поля и, поэтому, не позволяет производить анализ ранних дискретных отражений звука. Исследование ранних отражений производится при выполнении лабораторной работы №7.

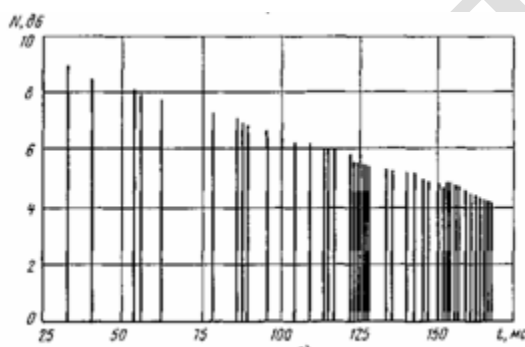


Рисунок 5.2

Если выполняется неравенство

$$\sqrt[3]{V} > \lambda ,$$

где  $V$  – объём помещения,  $\lambda$  – длина звуковой волны, плотность спектра собственных частот помещения настолько высока, что частота возбуждающего колебания практически не отличается по величине от частоты собственного колебания. Поэтому усиления отдельных компонент спектра сигнала за счет резонансов воздушного объема помещения не происходит. Обычно наблюдающаяся неравномерность частотных характеристик помещений объемом свыше  $100 \text{ м}^3$  объясняется не резонансными явлениями на собственных частотах, а взаимодействием многочисленных собственных колебаний, которые из-за случайности фазовых соотношений усиливаются или ослабляются. Средний интервал между соседними максимумами частотной характеристики помещения может быть найден из следующей приближенного выражения  $\Delta F = 4 / T$ , где  $T$  - время реверберации помещения, с.

Собственное колебание (или их совокупность), являясь откликом помещения на возбуждение, не может затухнуть мгновенно. Отклик (отзвук) проявляется на любой частоте возбуждающего колебания. Процесс затухания колебаний в помещении также происходит на собственных частотах с постоянной времени, определяемой затуханием на каждой из собственных частот. Эти постоянные

затухания на каждой из собственных частот обычно настолько близки, что можно использовать их среднее значение.

В случае использования статистической теории предполагается, что звуковое поле в помещении является диффузным. В таком звуковом поле энергия отраженных сигналов существенно превышает энергию прямого звука (это условие обычно не выполняется на местах слушателей, находящихся близко к источнику звука, в первых рядах, у сцены). Диффузное поле характеризуется равенством потоков звуковой энергии в различных направлениях. Получается диффузное поле в результате многократных отражений звука.

Характеристиками диффузного поля являются средняя длина свободного пробега, среднее время свободного пробега. Средняя длина свободного пробега  $l_{cp}$  – это среднестатистическое значение длин отрезков между отражающими поверхностями, которые проходят звуковые волны. Путь звуковой волны, многократно отразившейся от поверхностей помещения, можно представить в виде ломаной линии, составленной из отрезков  $l_1, l_2, \dots, l_m$ , как это показано на рисунке 5.3а. Длина каждого такого отрезка соответствует свободному пути, пройденному звуковой волной между двумя соседними отражениями. На рисунке 5.3б показан путь звуковой волны между параллельными поверхностями.

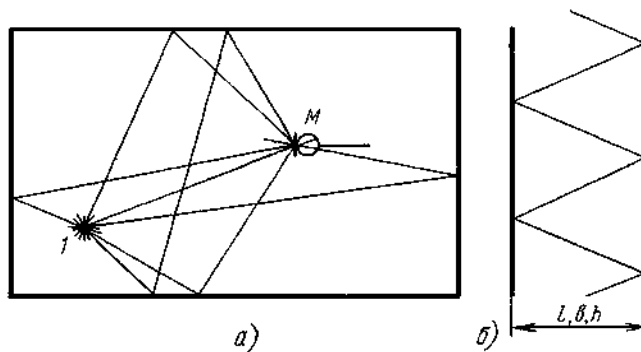


Рисунок 5.3.

Если значения  $l_1, l_2, \dots, l_m$  известны, то среднюю длину свободного пробега звуковой волны можно найти как

$$l_{cp} = \frac{l_1 + l_2 + \dots + l_m}{m} = \frac{1}{m} \sum_{i=1}^m l_i, \quad (5.3)$$

где  $m$  – общее число отрезков.

Для помещения, имеющего объём  $V$  и суммарную площадь всех ограничивающих поверхностей  $S$

$$l_{cp} = \frac{4V}{S}. \quad (5.4)$$

Среднее время свободного пробега  $t_{CP}$  определяется как время, за которое звуковой луч проходит расстояние  $l_{CP}$ :

$$t_{CP} = \frac{l_{CP}}{c_{зв}} = \frac{4V}{c_{зв} S}, \quad (5.5)$$

где  $c_{зв}$  – скорость звука в воздухе.

В статистической теории реверберации используется также среднестатистическая величина  $\alpha_{\text{ср}}$  – средний коэффициент звукопоглощения всех поверхностей помещения:

$$\alpha_{\text{ср}} = \frac{\sum_i \alpha_i S_i}{S} = \frac{A}{S}, \quad (5.6)$$

где  $\alpha_i$  – коэффициенты поглощения отдельных поверхностей площадью  $S_i$ ;  $A$  – эквивалентная поглощающая поверхность помещения. Величину  $A$ , имеющую размерность площади, называют также общим поглощением помещения. Для поглощения  $A$  введена единица измерения Сэбин (Сб). Связь величин  $A$  и  $\alpha_{\text{ср}}$  определяется выражением:

$$A = \alpha_{\text{ср}} S = \sum_i \alpha_i S_i + \sum_j A_j,$$

где  $\alpha_i$  — коэффициенты поглощения отдельных поверхностей площадью  $S_i$ . Величины  $A_j$  представляют собой эквивалентные поглощающие поверхности находящихся в помещении предметов (мебель, сцена, осветительные устройства и тому подобное).

Участок реверберационного процесса, условно названный «заклучительным», по длительности занимает до 85% времени. На этом участке звуковое поле становится диффузным, поэтому расчётные соотношения статистической теории реверберации теперь точно описывают характер отзвука. Для больших концертных телевизионных студий оптимальное время реверберации находится в пределах 1,5 ... 2,0 с, а звуковое поле становится практически диффузным через 0,3 с после выключения источника звука.

Данные о размерах телевизионной студии и других помещений можно получить, нажав кнопку «J» в главном меню программы. В таблице указаны максимальные значения длины, ширины и высоты и площадь пола помещения.

Если помещение имеет сложную форму, использованное расчётное выражение может оказаться неточным. Моделирование путей звуковых лучей позволяет точнее определить  $l_{\text{ср}}$ :

$$l_{\text{ср}} = \frac{s}{n},$$

где  $s$  – суммарное расстояние, пройденное звуковым лучом,  
 $n$  – число отражений звукового луча.

Программа «ODEON 10,0 Combined» позволяет получить более точные значения, используя данные о большом числе звуковых лучей. Для этого необходимо вывести на экран соответствующую гистограмму. По оси абсцисс отложена длина отрезка свободного пробега луча (между двумя отражениями), по оси ординат – общее число (hits) отрезков соответствующей длины.

Над графиком приведено рассчитанное с использованием данных гистограммы значение математического ожидания длины свободного пробега (Free path distribution). С достаточной для практики точностью полученные значения совпадают со значениями, полученными по формуле (5.3). Это

говорит о достаточной для инженерных расчётов времени реверберации точности формул Эйринга и Сэбина. Экспериментальные оценки акустических параметров студий и залов многоцелевого назначения показали, что, кроме основного и дополнительного фондов звукопоглощения необходимо учитывать еще и так называемый добавочный фонд звукопоглощения

$$A_{\text{доб}} = \alpha_{\text{доб}} S,$$

где  $\alpha_{\text{доб}}$  - коэффициент добавочного звукопоглощения, учитывающий проникновение звуковых волн в различные щели и отверстия помещения, колебания разнообразных гибких элементов, поглощение звука осветительной арматурой и тому подобное. Значения  $\alpha_{\text{доб}}$ , зависящие от частоты, приведены в таблице 5.3.

Если при проектировании студий и концертных залов не учитывается добавочный фонд звукопоглощения, то время реверберации в области нижних частот часто оказывается много меньше расчетного.

Таблица 5.3

<i>Наименование студии</i>	Значение $\alpha_{\text{доб}}$ на частоте в Гц		
	125	250	500 - 2000
Средняя музыкальная, малая музыкальная, камерная	0,075	0,06	0,03
Большая музыкальная	0,09	0,075	0,04

### 5.3. Процессы нарастания и спада плотности звуковой энергии в помещении

Представление о диффузном звуковом поле и связанная с ним возможность использования средних значений  $\alpha_{\text{ср}}$  и  $t_{\text{ср}}$  позволяет достаточно просто получить выражения, описывающие процессы нарастания звуковой энергии в помещении после включения источника звука и ее постепенного поглощения после выключения источника. Заметим, что универсальной энергетической характеристикой звукового поля является плотность звуковой энергии:

$$\varepsilon = \frac{E}{V}, \quad \text{или} \quad \varepsilon = \frac{I}{c_{\text{зв}}},$$

где  $E$  и  $I$  - соответственно энергия и интенсивность звуковой волны (падающей или стоячей, если речь идет о закрытом помещении);  $V$  - объем помещения,  $c_{\text{зв}}$  - скорость распространения звуковой волны в воздухе.

Рассмотрим процесс нарастания звуковой энергии в помещении. Предположим, что в момент  $t = 0$  в помещении начал работать источник звука с акустической мощностью  $P_a$ . Пусть поглощение энергии в помещении, возникающее при отражении звуковых волн от поверхности преград, происходит через интервалы времени  $t_{\text{ср}}$  - среднее время свободного пробега звуковой волны в помещении. За это время источник звука отдаст в помещение энергию  $E(t_{\text{ср}}) = P_a t_{\text{ср}}$ . В момент  $t = t_{\text{ср}}$  произойдет акт поглощения части энергии поверхностями помещения и останется лишь часть ее  $P_a t_{\text{ср}} \tilde{\alpha}$ . Здесь  $\tilde{\alpha}$  -

коэффициент отражения звуковой энергии, связанный с коэффициентом звукопоглощения выражением:

$$\alpha = 1 - \tilde{\alpha}$$

К моменту  $t = 2t_{\text{ср}}$  к оставшейся части энергии добавится энергия, излученная источником звука за интервал времени от  $t = t_{\text{ср}}$ , то есть опять-таки  $P_a t_{\text{ср}}$ , и энергия, запасенная в помещении:

$$E(2t_{\text{ср}}) = P_a t_{\text{ср}} (1 + \tilde{\alpha})$$

Продолжая рассуждать таким образом, можно показать, что в установившемся режиме:

$$\varepsilon_0 = \frac{4P_a}{c_{\text{зв}} \alpha_{\text{ср}} S}, \quad (5.7)$$

Величина  $\varepsilon_0$  называется установившейся плотностью звуковой энергии в помещении. В установившемся режиме энергия, поглощаемая поверхностями помещения, равна энергии, излучаемой источником звука. Иначе говоря, процесс нарастания звуковой энергии в помещении происходит до тех пор, пока энергия, соответствующая наиболее запаздывающим повторениям (отзвукам), не снизится до пренебрежимо малого значения.

В диффузном звуковом поле процесс нарастания плотности звуковой энергии в помещении происходит по экспоненциальному закону, как это показано на рисунке 5.4а (теоретическая зависимость 1). При этом нарастание звуковой энергии ускоряется при увеличении коэффициента звукопоглощения  $\alpha$  и отношения  $S/V$ , зависящего от формы и размеров помещения.

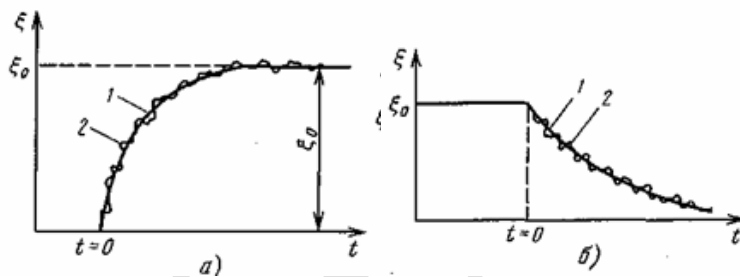


Рисунок 5.4

Очевидно, что установившаяся в помещении плотность звуковой энергии  $\varepsilon_0$  растет с увеличением мощности источника звука  $P$  и падает с увеличением общего звукопоглощения  $A = \alpha_{\text{ср}} S$ . В реальных условиях звуковое поле в помещении не может считаться строго диффузным, поэтому процессу нарастания звуковой энергии в помещении свойственны флуктуации (зависимость 2 на рисунке 5.4а).

Наши слуховые ощущения, согласно психофизическому закону Вебера-Фехнера, соответствуют логарифмической зависимости. Для плотности звуковой энергии логарифмическая зависимость выражается понятием уровня звуковой энергии  $L$ . График нарастания уровня звуковой энергии  $L_n$  представлен на рисунке 5.5 слева. Из графика хорошо видно, что  $L_n$  нарастает почти мгновенно от порога слышимости до установившегося значения. Анализ показывает, что указанное время нарастания не превышает времени нарастания

(времени «атаки») звуков реальных музыкальных инструментов и звуков голоса человека (речи, а тем более вокала). Поэтому время нарастания определяется особенностями формирования звуков музыки и речи и не зависит от акустических характеристик помещения.

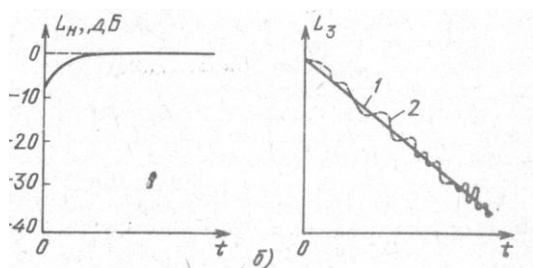


Рисунок 5.5

Совсем по-иному влияют акустические характеристики помещения на процесс затухания звука.

Пусть в помещении установилась плотность звуковой энергии  $\epsilon_0$ . Выключим источник звука, и с этого момента будем отсчитывать текущее время  $t$ . Допустим, что акты поглощения звуковой энергии в помещении, как и при накоплении звуковой энергии, происходят через интервалы времени  $t_{cp}$ . После первого акта поглощения в момент  $t = t_{cp}$ , плотность звуковой энергии в помещении  $\epsilon(t_{cp}) = \epsilon_0(1 - \alpha_{cp})$ . После второго акта поглощения в момент  $t = 2t_{cp}$  плотность энергии  $\epsilon(2t_{cp}) = \epsilon(t_{cp})(1 - \alpha_{cp}) = \epsilon_0 (1 - \alpha_{cp})^2$ . Соответственно после  $n$ -го акта поглощения звуковой энергии в помещении, оставшаяся часть плотности энергии в момент  $t = n t_{cp}$  составит

$$\epsilon(nt_{cp}) = \epsilon_0 (1 - \alpha_{cp})^n.$$

Учитывая тождество

$$(1 - \alpha_{cp})^n = \exp[n \ln(1 - \alpha_{cp})],$$

и тот факт, что

$$n = t/t_{cp} = c_{зв} S t / 4V,$$

окончательно найдем

$$\epsilon(t) = \epsilon_0 \exp[n \ln(1 - \alpha_{cp})] \quad \text{или}$$

$$\epsilon(t) = \epsilon_0 \exp\left[\frac{c_{зв} S \ln(1 - \alpha_{cp})}{4V} t\right]. \quad (5.8)$$

Заметим, что при коэффициенте звукопоглощения  $\alpha_{cp} \ll 0,2$  можно воспользоваться равенством  $-\ln(1 - \alpha) \approx \alpha$  и упростить полученное выражение:

$$\epsilon(t) = \epsilon_0 \exp\left(-\frac{c_{зв} \alpha_{cp} S}{4V} t\right). \quad (5.9)$$

Таким образом, процесс спада звуковой энергии в помещении также отображается экспоненциальной зависимостью (1 на рисунке 5.4б) и зависит от общего звукопоглощения  $A = \alpha_{cp} S$  и объема  $V$  помещения. Этот процесс тем короче, чем больше  $A$ , и, чем меньше  $V$ .

Процесс затухания звука в реальных помещениях носит флуктуационный характер (2 на рисунке 5.4б), то есть имеются отклонения от теоретической зависимости как в ту, так и в другую сторону. Математические выражения, отражающие флуктуации при спаде плотности звуковой энергии теоретически могут быть получены при использовании волновой теории. Логарифмическая



зависимость чувствительности слуха приводит к значительному ощущаемому на слух времени затухания отзвука, что соответствует линейному закону спада уровня звуковой энергии, показанному на рисунке 5.5 справа.

## 5.4 Время реверберации

На рисунках 5.4, 5.5 и 5.6 изображены процессы нарастания и спада плотности звуковой энергии в помещении. На рисунке 5.6 по оси ординат отложена логарифмическая величина - относительный уровень плотности звуковой энергии  $10 \lg(\square/\square_0)$ , как величина, более точно отражающей реакцию слуха на звуковое воздействие, а по оси абсцисс отложено текущее время  $t$ . Из рассмотрения этой зависимости, где момент  $t_1$  соответствует включению источника звука в помещении, а  $t_1^1$  - его выключению, видно, что процесс нарастания плотности звуковой энергии в помещении происходит очень быстро и поэтому незаметен на слух.

Процесс спада звуковой энергии, называемый реверберацией, протекает медленно, заметен на слух и играет важную роль в слуховом восприятии.

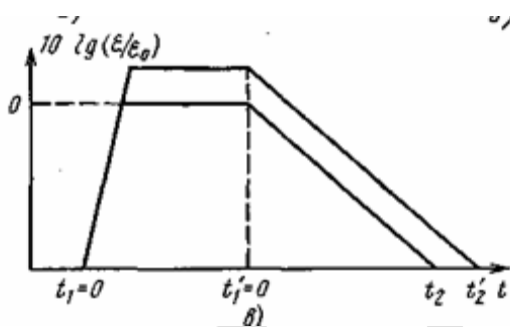


Рисунок 5.6

Из приведённого выше анализа видно, что установившаяся плотность звуковой энергии в помещении зависит от акустической мощности  $P_a$  источника звука. Очевидно, что с увеличением  $P_a$  длительность ( $t_2$  и  $t_2^1$  на рисунке 5.6) процесса реверберации возрастает, хотя его слуховая оценка практически остается неизменной. Чтобы время реверберации характеризовало только акустические свойства помещения, надо исключить его зависимость от  $P_a$ . Для этого введено понятие стандартного времени реверберации  $T_p$  помещения - времени, в течение которого плотность звуковой энергии уменьшается в  $10^6$  раз, а соответствующий уровень - на 60 дБ. Выполнив соответствующие преобразования, можно получить формулу для стандартного времени реверберации, называемую полной формулой Эйринга:

$$T_p = \frac{0,161V}{-S \ln \left( -\alpha_{cp} \right) 4mV} \quad (5.10)$$

Итак, стандартное время реверберации  $T_p$  зависит от объема помещения  $V$ , площади  $S$  ограничивающих его поверхностей, коэффициента звукопоглощения  $\square_{cp}$  и коэффициента поглощения звука в воздухе  $m$ .

Заметим, что в знаменателе этой формулы первое слагаемое учитывает потери звуковой энергии при отражениях, второе – поглощение звука в воздухе. Величины  $\alpha_{cp}$  и  $m$  зависят от частоты. С повышением частоты стандартное время реверберации  $T_p$  уменьшается, прежде всего, вследствие роста  $m$ .

Для небольших помещений объемом не более  $2000\text{м}^3$ , а также для помещений большого объема, но на частотах ниже  $1000$  Гц вторым слагаемым в знаменателе (5.10) можно пренебречь, тогда получим формулу Эйринга:

$$T_p \approx \frac{0,164V}{-S \ln(1 - \alpha_{cp})} \quad (5.11)$$

В помещениях большого объема на частотах  $1000 - 4000$  Гц оба слагаемых в знаменателе выражения (5.10) примерно равноценны. На частотах более  $4000$  Гц основную роль начинает играть звукопоглощение в воздухе. На частотах свыше  $6000$  Гц стандартное время реверберации становится малым и практически уже не влияющим на слуховое восприятие.

При небольших значениях коэффициента звукопоглощения (менее  $0,2$ ) справедливо соотношение:  $\ln(1 - \alpha_{cp}) \approx -\alpha_{cp}$  и от (5.11) можно перейти к формуле Сэбина:

$$T_p \approx \frac{0,164V}{S\alpha_{cp}} \quad (5.12)$$

Ни одна из приведенных здесь расчетных формул не является абсолютно точной, так как не учитывает влияния формы помещения, особенностей размещения источника звука и звукопоглощающих материалов. Строго говоря, эти формулы пригодны, если звуковое поле в помещении является идеально диффузным.

Для высококачественного звучания музыки и речи важно, чтобы время реверберации  $T$  соответствовало оптимальному значению  $T_0$ . При  $T < T_0$  начальная часть отзвука, сильно коррелированная с первоначальным звуком, используется плохо, снижаются громкость и динамический диапазон звучания, музыка звучит сухо. При  $T > T_0$  речь становится неразборчивой, снижается прозрачность звучания музыки, при значительном превышении оптимального значения на музыку накладывается сплошной гул. Оптимальное значение времени реверберации зависит от вида исполнения и от размеров помещения.

Учитывая, что характер музыкальных произведений, количественный и качественный состав исполнителей чрезвычайно разнообразен, для создания оптимальных акустических условий при звучании музыки используют концертные залы и музыкальные студии различных размеров. Оптимальное время реверберации для концертных залов и музыкальных студий на частоте  $1000$  Гц может быть найдено по графику, приведенному на рисунке 5.7. В больших концертных залах и музыкальных студиях оптимальное время реверберации не зависит от объема, если последний превышает  $2000 \text{ м}^3$ , и определяется характером исполняемого произведения. Оптимальное время реверберации на частоте  $1000$  Гц: для современной музыки -  $1,48$  с; для классической музыки -  $1,54$  с; для романтической -  $2,07$  с.

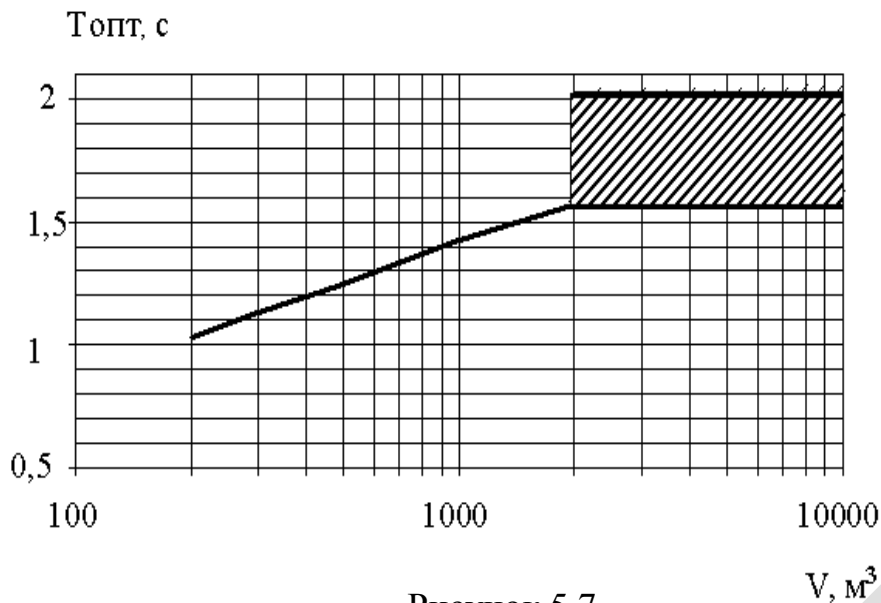


Рисунок 5.7

Для концертных залов и музыкальных студий многоцелевого назначения рекомендуемое время реверберации на частоте 1000 Гц составляет  $1,7 \square 1,8$  с.

Частотная характеристика оптимального времени реверберации концертных залов и музыкальных студий имеет, как правило, подъем в области нижних частот на 20...40%, как показано на рисунке 5.8. Подъем в области низких частот следует отнести за счет эстетических вкусов и традиций слушателей, предпочитающих в музыкальных передачах некоторое подчеркивание низких частот. Допустимое отклонение времени реверберации от оптимальных значений показано на рисунке 5.9 (для концертных залов и музыкальных студий – область 1 на графике).

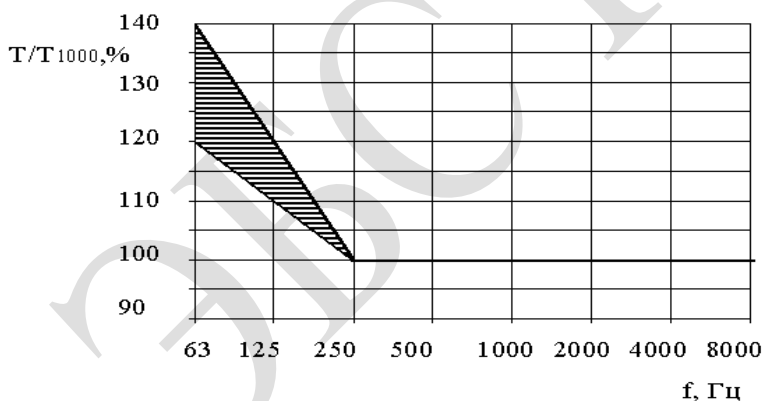


Рисунок 5.8

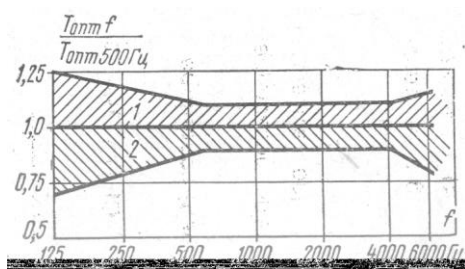


Рисунок 5.9

## 5.5. Параметры высокого качества звучания

Впечатления слушателей, посещающих концертные залы и оперные театры, формируются не только характером прослушанного музыкального произведения или постановкой спектакля, но и акустической атмосферой помещения. Слушатель не только слышит и видит оркестр, но и ощущает среду между источником звука (оркестром) и приёмной стороной (самим слушателем). Этой средой и является помещение со всеми присущими ему акустическими параметрами.

Качество звучания определяется критериями, согласованными с субъективным восприятием звучаний. Для речи основным субъективным критерием качества звучания является разборчивость. Следует при этом различать чисто информативную речь (доклад, объявление и тому подобное) и речь художественную, имеющую определённую эстетическую ценность. В последнем случае не менее важным является сохранение тембра звучания.

Иначе обстоит дело для музыки. Уровень громкости, прозрачность, пространственное впечатление, окраска звучания, баланс и тому подобные субъективные критерии вносят в значительной степени независимый вклад в формирование «хорошей акустики». На основе статистических экспертиз были установлены основные субъективные критерии, позволяющие оценить качество звучания музыки в концертном зале.

Длительность отзвука – время, в течение которого отзвук еще слышен. Длительность отзвука зависит от времени реверберации (свойство помещения), начального уровня сигнала (звуковой сигнал), уровня помех (параметр, меняющийся во времени), а также от порога чувствительности слуха (индивидуальный параметр слуха) и, следовательно, от частоты сигнала.

Прозрачность – это различимость перекрывающихся друг друга во времени тонов и одновременно звучащих инструментов, несмотря на налагающийся реверберационный отзвук помещения. Временная граница для полезных с точки зрения прозрачности и пространственного впечатления первых отражений, с одной стороны, и отзвука помещения, определяющего его гулкость (сумма поздних отражений), с другой стороны, составляет около 80 мс.

Пространственное впечатление – это слуховое восприятие, свойственное закрытому с нескольких или со всех сторон пространству. Пространственное впечатление складывается из следующих компонент: ощущения, что слушатель находится в одном помещении с источниками звука; известного представления о размерах помещения; гулкости; пространственности.

Гулкость – это ощущение, что кроме прямого звука имеется и отраженный звук, воспринимаемый не как повторения сигнала. В больших помещениях гулкость зависит от отношения поздней энергии отзвука к ранней. К ранней причисляют энергию прямого звука и отражений, которые на речи приходят примерно за первые 50 мс, а на музыке – за 80 мс после прихода прямого звука. На музыкальный сигнал гулкость оказывает до известного предела

положительное влияние, способствуя слитности звучания. При слишком большой гулкости снижаются прозрачность звучания музыки и разборчивость речи.

Во всех электроакустических системах передачи (звуковом и телевизионном вещании, звукозаписи) гулкость оказывается значительно больше, чем при естественном слушании, из-за наложения отзвуков помещения прослушивания, на отзвуки первичного помещения.

Пространственность – это ощущение, что источник звука (например, оркестр) имеет большие по сравнению с видимыми очертаниями размеры (в одну или обе стороны и вверх). Пространственность зависит от соотношения уровней энергии прямого звука в месте расположения слушателя и энергии отражений, приходящих с боковых направлений за 80 мс.

Эхо – это такие повторения сигнала, при которых первичный и вторичный (запаздывающий) звуки воспринимаются как самостоятельные слуховые объекты (во времени, а часто – и в пространстве). Многократное эхо – это периодическое повторение эхо-сигналов, воспринимаемое как неприятный эффект в помещениях, предназначенных для прослушивания программ.

Плотность звуковой энергии  $\square$  . распределена практически неоднородно по объёму помещения. Её значением можно пользоваться лишь для тех зон помещения, в которых можно пренебречь излучаемым источником прямым звуком. В противном случае значение  $\square$  будет больше. Характерной является такая замкнутая поверхность, на которой плотность звуковой энергии, интенсивность звука и звуковое давление прямого звука оказываются равными соответствующим величинам диффузного поля. Расстояние  $r_T$  от источника звука до этой поверхности называется радиусом гулкости. При  $r < r_T$  преобладает прямой звук. При  $r > r_T$  звуковое поле становится диффузным. Подавляющее большинство слушателей в закрытых помещениях находится за пределами радиуса гулкости, то есть в области преобладающего диффузного звука. Этим и объясняется большое значение времени реверберации.

Анализ показывает, что хорошая прозрачность звучания музыки получается при времени реверберации, не превышающем 1,6 с. Часто, однако, в концертных залах требуется и считается оптимальным большее время реверберации. В таких случаях часто допускается для некоторых зон расположения слушателей снижение прозрачности звучания.

Многие исследователи пришли к мнению, что не существует одного единственного параметра, характеризующего прозрачность звучания. Среди посетителей концертов можно выделить две примерно равные группы людей, различающихся своим вкусом. Одна группа предпочитает прозрачность звучания пространственному впечатлению, другая – отдаёт предпочтение полноте звучания, его слитности и цельности по сравнению с возможностью выделения звучания отдельных музыкальных инструментов.

На качество звучания по субъективным оценкам кроме уровня громкости и прозрачности весьма важную роль оказывает пространственное впечатление. Поскольку пространственное впечатление основывается на сознательном

различении отражённого и прямого звуков, при соответствующих объективных измерениях необходимо учитывать направление прихода звука. Боковые отражения вносят больший вклад в формирование пространственного впечатления, чем отражения, приходящие в медианной плоскости. В концертных и оперных залах со временем реверберации  $T=1,2...2,5$  с легко достигается хорошая пространственность звучания на всей площади зрительских мест, за исключением первых рядов.

### 5.6. Измерение времени реверберации

Время реверберации является одним из основных, легко поддающимся измерению параметром, определяющим акустику помещения. Так как для оптимальных акустических условий требуется обеспечить вполне определенную частотную характеристику времени реверберации, то и измерение времени реверберации производится во всем спектре звуковых частот. Структурная схема измерительного тракта представлена на рисунке 5.10.

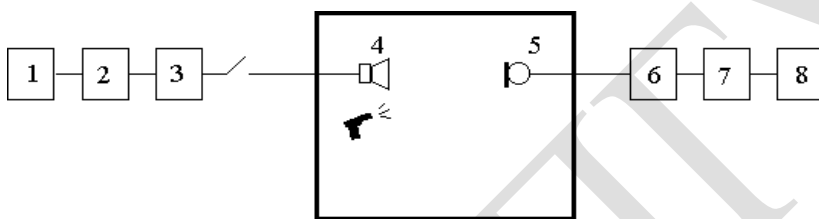


Рисунок 5.10

На рисунке: 1 – источник измерительного сигнала; 2, 7 – полосовые фильтры; 3, 6 – усилители; 4 – громкоговоритель; 5 – измерительный микрофон; 8 – самописец уровней.

Учитывая, что звуковое поле в помещении никогда не является полностью диффузным, для измерения нельзя использовать чистые тона. При измерении на чистых тонах в помещении могут возникнуть стоячие волны, и результаты измерений будут существенно отличаться от реальных. Поэтому оптимальным является использование в качестве измерительного сигнала полос белого шума шириной в октаву. С помощью фильтров из принятого микрофоном сигнала выделяют желаемую полосу частот. Для измерения частотной характеристики времени реверберации перед усилителем необходимо устанавливать полосовые фильтры с шириной не более октавы. Среднегеометрические частоты октавных полос стандартизованы и равны 63, 125, 250, 500, 1000, 2000, 4000 и 8000 Гц. Создаваемые в помещении уровни звукового давления должны быть порядка 100-120 дБ, чтобы обеспечить регистрируемый перепад звукового давления в идеале на 60 дБ (но не менее 40 дБ).

Приемный тракт состоит из микрофонов, усилителя, фильтров и самописца уровней. Микрофон приемного тракта не должен обладать направленными свойствами. Запись процесса спада звуковой энергии в помещении после отключения источника звука осуществляется логарифмическим самописцем

уровней. В современных измерительных комплексах вместо самописца уровней используется компьютер с соответствующим программным обеспечением.

При измерении времени реверберации очень часто возникает проблема обеспечения требуемого превышения (60дБ) максимального сигнала над шумом. В этих случаях приходится уровнеграмму, записанную самописцем, экстраполировать до размаха 60 дБ. Сказанное поясняет рисунок 5.11.

Лента самописца градуируется, как правило, через 5 дБ. Практика измерений показывает, что зачастую наблюдается быстрое затухание звука в начале процесса, за которым следует затухание более медленное, особенно в больших залах. Иногда наблюдаются различные случайные колебания – внезапный подъем или последовательность всплесков. При измерении времени реверберации надо пренебречь флюктуациями записанной кривой и установить только средний ее наклон. Считается, что участок кривой спада звукового давления в интервале -5 – -35 дБ наиболее точно характеризует реверберационную характеристику помещения.

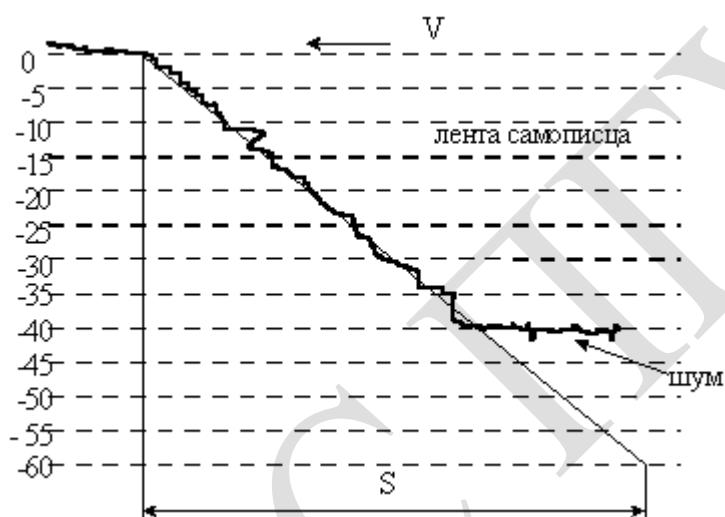


Рисунок 5.11

Программа «ODEON 10,0 Combined» моделирует запись процесса затухания отзвука на ленте самописца со всеми особенностями реального затухания. При этом на экране монитора в одних и тех же координатах показаны графики затухания отзвука во всех октавах. На ленте реального самописца уровней эти графики обычно записываются последовательно, компьютерное моделирование позволяет совместить эти графики, что удобно для сравнения. На ленте самописца тоже можно совместить графики, возвращая ленту в исходное состояние после каждого измерения. Как показано в пояснениях к рисунку 5.11, динамический диапазон реальной уровнеграммы ограничен из-за шумов. Моделирование на компьютере позволяет при измерениях времени реверберации задавать очень низкий уровень шумов.

Однако для аналогии с реальными измерениями, в компьютерной программе время реверберации  $T(30)$  определяется с использованием рекомендуемого диапазона уровней от  $-5$  дБ до  $-35$  дБ и дальнейшей экстраполяции.

Результирующая частотная характеристика времени реверберации также может быть выведена на экран монитора. Наряду с зависимостью  $T(30)$  от частоты здесь же показана соответствующая зависимость  $T(20)$ , полученная аналогично при использовании участков уровнеграмм от  $-5$  дБ до  $-25$  дБ. Теперь необходимо сравнить полученные результаты со значениями оптимального времени реверберации.

### 5.7. Слуховое восприятие реверберационного процесса в помещении

На уши слушателя или на микрофон, установленный в помещении, воздействуют звуковые волны, приходящие от источника звука кратчайшим путем (прямой звук), и большое число волн, отраженных от поверхностей этого помещения (отзвуки). Последние образуют реверберационный процесс помещения и отличаются от прямого звука уровнем, спектральным составом, временем и направлением прихода. Пространственность реверберационного процесса является важнейшей его особенностью, существенно улучшающей восприятие всех его временных и частотных изменений благодаря присущей слуху избирательной способности по направлению. Это свойство слуха называют обычно пространственной демаскировкой.

Типичная картина реверберационного процесса для помещения любой формы изображена на рисунке 5.12а.

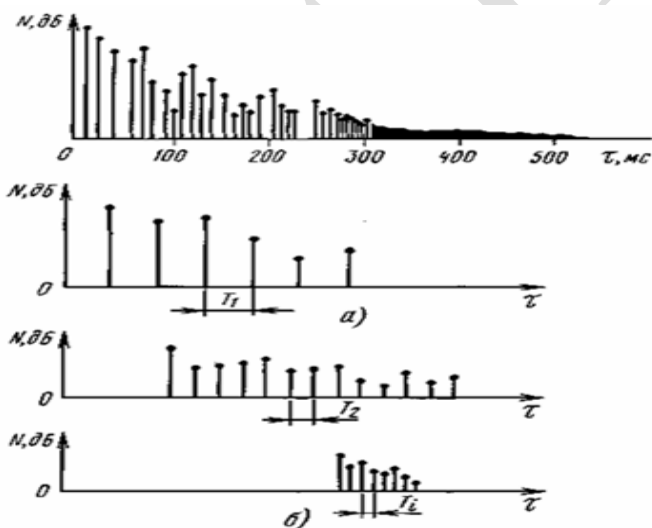


Рисунок 5.12

По оси ординат отложены уровни сигналов прямого звука и отзвуков, по оси абсцисс - время их поступления в точку приема звука. В начальной стадии временная структура реверберационного процесса дискретна. С увеличением времени запаздывания отраженных сигналов их количество возрастает, а



временные интервалы между ними уменьшаются. Уровень отзвуков с течением времени постепенно уменьшается. Данный процесс имеет флуктуационный характер. Этот начальный участок реверберационного процесса несет информацию о геометрических размерах помещения, его объеме, определяет такую важную особенность восприятия, как пространственность звучания, а также свойственную помещению специфическую окраску звучания. Завершающий участок реверберационного процесса характеризуется поступлением в каждый момент времени достаточно большого числа отраженных сигналов.

Он определяет свойственную помещению гулкость звучания. На рисунке 5.12б показаны содержащиеся в структуре реверберационного процесса группы периодически следующих отзвуков, появляющихся при наличии в помещении параллельных поверхностей (потолка и пола, противоположных стен).

Достаточно полного "перемешивания" отражений можно ожидать не ранее как через 100 мс, а в больших помещениях - и через 200 мс. Звуковое поле в помещении приближается к диффузному не раньше указанного промежутка времени. Применительно к реверберационному процессу можно говорить о динамической диффузности звукового поля в помещении, возрастающей к завершающей части реверберационного процесса. Лишь после этого момента может наблюдаться подчиняющийся статистическим законам экспоненциальный спад энергии поля реверберирующего звука.

Влияние помещения достаточно полно характеризуется его импульсным откликом:

$$h_0(\tau) = \sum_{i=0}^n a_i \lambda(\tau_i - \tau) \delta(\tau - \tau_i)$$

где  $a_i$  и  $\tau_i$  - соответственно амплитуда и время запаздывания сигнала  $i$ -го отзвука;

$\tau$  - текущее время реверберационного процесса;

$\lambda(\tau_i - \tau)$  - весовая функция, учитывающая "память" слуха;

$\delta(\tau - \tau_i)$  - дельта-функция.

Весовая функция определяется выражением:

$$\lambda(\tau_i - \tau) = \begin{cases} \frac{1}{T} \exp\left(-\frac{\tau_i - \tau}{T}\right) & \text{при} \\ & \tau < \tau_i \\ 0 & \text{при} \\ & \tau > \tau_i \end{cases} \quad (5.13)$$

где  $T$  - постоянная времени слуха, характеризующая интервал времени, в течение которого слуховое ощущение уровня громкости уменьшится на 8...10 фон, считая с момента выключения источника звука. По некоторым данным  $T = 150...200$  мс. Наглядное представление о временной структуре импульсного отклика помещения  $h_0(\tau)$  дает его кратковременная корреляционная функция

$$B_0(\tau) = \sum_{i=0}^n \sum_{j=0}^n a_i a_j \lambda(\tau_i - \tau) \lambda(\tau_j - \tau) \delta(\tau - \Delta\tau_{i,j}) \quad (5.14)$$

Здесь  $a_i$  и  $a_j$  - амплитуды  $i$ -го и  $j$ -го отзвуков;

$\tau_i$  и  $\tau_j$  - их времена запаздывания;

$\lambda(\tau)$  - текущее время реверберационного процесса;

$\lambda(\tau_i - \tau)$  и  $\lambda(\tau_j - \tau)$  - весовые функции, характеризующие "память" слуха;

$\delta(\tau - \Delta\tau_{i,j})$  - дельта-функция, где  $\Delta\tau_{i,j} = \tau_j - \tau_i$ .

В данном выражении  $\tau_i < \tau$ ,  $\tau_j < \tau$ .

График кратковременной функции корреляции  $B_0(\tau)$  представлен на рисунке 5.13. Кратковременная функция корреляции  $B_0(\tau)$  импульсного отклика помещения содержит множество энергетических пиков, отличающихся как по уровню, так и по расположению их на временной оси  $\tau$ .

Это позволяет рассматривать реверберационный процесс как совокупность (сумму) аperiodических отражений и групп периодически следующих отзвуков (см. рисунок 5.12б), каждая из которых имеет различные периоды следования  $T$  и неодинаковое расположение на оси  $\tau$ .

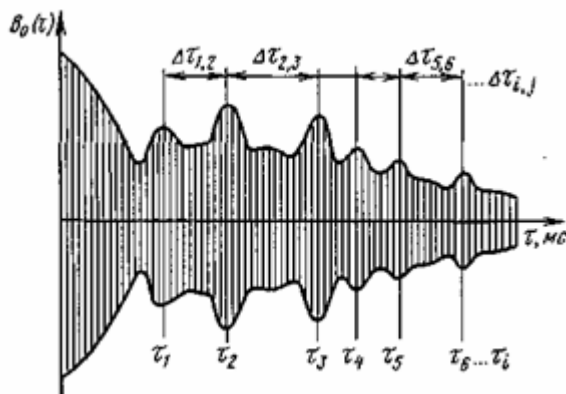


Рисунок 5.13

Отзвуки, приходящие аperiodически, образуют так называемый реверберационный фон (плавно спадающий по уровню) и воспринимаются слитно. Энергетические пики кратковременной функции корреляции образуют (при слуховом восприятии реверберационного процесса) отзвуки высокого уровня, несущие информацию об акустических свойствах помещения. Если разница по времени поступления к слушателю соседних пиков кратковременной корреляционной функции (см. рисунок 5.13)  $\Delta\tau_{1,2}; \dots; \Delta\tau_{i,j}$  меньше порогового значения  $\Delta\tau_{пор}$ , то эти отзвуки высокого уровня воспринимаются слитно. При  $\Delta\tau_{i,j} > \Delta\tau_{пор}$  они воспринимаются отдельно. В реальных условиях это условие выполняется достаточно часто. Отсюда следует, что при окончательной обработке реверберирующего сигнала в высших нервных центрах, то есть при его превращении в ощущения, образуется ряд отдельно воспринимаемых звуковых образов. Об этом свидетельствует и тот

факт, что постоянная времени слуха существенно меньше длительности реверберационного процесса помещения (0,8 – 2,0 с).

### 5.8. Тембральное окрашивание

То, что каждое помещение вносит свою окраску в звучание (изменение спектра звука) хорошо известно. На речевых сигналах стремятся к «светлому» звучанию помещения, к отсутствию «бочки» для того, чтобы энергетически слабые звуки (согласные и шипящие) были хорошо понятны. В музыкальных сигналах, наоборот, желательно некоторое подчёркивание низких частот, придающих звучанию «теплоту».

При оценке влияния помещения на тембральную окраску звучания до сих пор ограничивались, как правило, измерением частотной зависимости времени реверберации  $T(f)$ . Эта зависимость должна быть горизонтальной до частоты примерно 250 Гц, начиная с которой время реверберации должно возрасти к области низких частот, увеличиваясь до двукратного значения на частоте 31,5 Гц в концертных залах и до полуторакратного (или оставаться неизменным) в залах, предназначенных для прослушивания речи.

Проявляющееся уже на первых отражениях тембральное окрашивание должно сохранять свой характер до полного замиранья реверберационного звука.

Чем больше естественных отражений приходит к местам слушателей с различных направлений, тем меньше опасность неприятного окрашивания звучания.

Большие трудности создаёт появляющаяся нежелательная тембральная окраска при использовании систем звукоусиления в концертных залах больших размеров. Если на завершающем участке реверберационного процесса звучание приобретает характер, не соответствующий отзвуку самого помещения, то слушатель будет недоволен качеством звучания. Для того, чтобы электроакустическая система стала единым целым с помещением, необходимо различать тембральную окраску сигнала, подаваемого на устройство искусственной реверберации, и частотную характеристику этих устройств. Одно нельзя компенсировать за счёт другого. Недостатки реверберационных устройств (например, недостаточная плотность собственных частот) не могут быть компенсированы никакими коррекциями. Здесь возможно только согласование со звучанием помещения. В невыполнении этого условия кроется, по-видимому, причина отрицательного отношения некоторых слушателей к системам звукоусиления музыки.

## 5.9. Звуковое поле в помещении

Анализ процессов затухания отзвука в помещении на основе статистической теории даёт близкие к истинным результаты только в том случае, если звуковое поле в помещении мало отличается от диффузного.

Поэтому часто бывает необходимым оценить степень диффузности звукового поля. Количественную оценку в этом случае позволяет сделать введение понятия индекса диффузности звукового поля.

Звуковые волны в закрытых помещениях, многократно отражаясь от его поверхностей, образуют сложное поле колебательного движения частиц воздуха. Законы распределения колебательной скорости частиц воздуха, уровня звукового давления, направлений распространения акустической энергии в закрытых помещениях определяются не только характеристиками источника звука, но также и геометрическими размерами, формой помещения, способностью стен, пола и потолка поглощать акустическую энергию. По этой причине звуковые поля в закрытом помещении и в свободном пространстве существенно отличаются. В свободном поле интенсивность звука есть поток энергии за единицу времени через единицу поверхности в направлении распространения звуковой волны. Для звукового поля в помещении, если поглощение звуковой энергии незначительно, понятие интенсивности в этом своем классическом определении теряет смысл, ибо в каждый момент времени одновременно существуют потоки энергии, распространяющиеся в разных направлениях. Уровни звуковых давлений могут очень сильно меняться от одной точки поля к другой. Эти изменения существенно отличаются от изменений уровня, наблюдаемых в условиях открытого пространства для поля бегущей волны.

Универсальной и удобной в данной ситуации энергетической характеристикой звукового поля является плотность звуковой энергии  $\bar{w}$ . Она зависит не только от акустической мощности источника звука, но и от акустических свойств помещения.

Звуковое поле помещения в каждой точке пространства можно представить как совокупность волн, приходящих непосредственно от источника по кратчайшему пути (прямой звук), и волн, попадающих в данную точку после одного или нескольких отражений (совокупность отзвуков, образующих реверберационный процесс в помещении). Направления потоков мощности отраженных волн зависят от геометрической формы помещения и степени поглощения акустической энергии границами (поверхностями) помещения. При изменении соотношения между длиной волны и размерами помещения, акустических свойств и форм отражающих поверхностей характер звукового поля помещения меняется. Если помещение не содержит фокусирующих поверхностей и геометрически симметричных сечений, а размеры помещения значительно больше длины волны, и, если стены не сильно поглощают звуковую энергию, то через некоторое время (при непрерывном действии источника) через произвольный элемент объема помещения в каждый момент

времени будет проходить большое число отдельных волн, распространяющихся в разных направлениях. В результате звуковое поле будет иметь следующие свойства: все направления потоков энергии этих волн будут равновероятны; плотность звуковой энергии такого поля по всему объему помещения будет постоянна. Первое свойство называют изотропией звукового поля, а второе - однородностью. Звуковое поле изотропное и однородное называют диффузным.

Для диффузного звукового поля постулируется еще одно важное свойство: все элементарные волны этого поля не когерентны, поэтому в нем отсутствуют устойчивые явления интерференции.

Количественной мерой оценки диффузности звукового поля в помещении является индекс диффузности. Экспериментально он может быть найден следующим образом. В помещении возбуждают сигнал переменной частоты (так называемый воющий тон). В исследуемой точке помещения располагают микрофон с острой диаграммой направленности. Сигналы, воспринятые микрофоном от источника звука при его ориентации в пределах телесного угла  $0 - \pi$  наносят на пространственную диаграмму в полярных координатах и получают систему отрезков, сходящихся в одной точке, как это изображено на рисунке 5.11. Длины этих отрезков пропорциональны интенсивности звука, принятого со стороны соответствующего направления  $\theta$ .

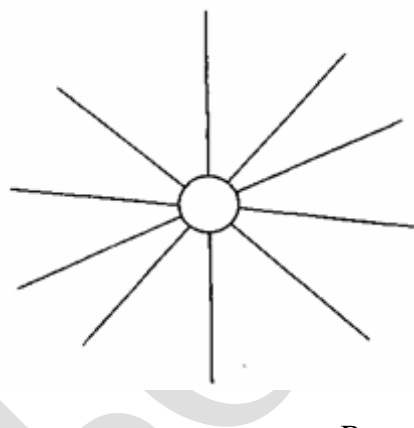


Рисунок 5.14.

При этом индекс диффузности

$$i_d = 1 - \frac{m}{m_0}, \quad (5.15).$$

где  $m$  – относительное отклонение интенсивности звука, усредненное по всем направлениям,

$m_0$  – относительное отклонение интенсивности звука от среднего значения, измеренное в заглушенной камере.

Значение  $m$  определяется согласно выражениям:

$$m = \frac{\Delta I}{I_{CP}}, \quad \Delta I = \frac{1}{n} \sum_i \Delta I_i, \quad I_{CP} = \frac{1}{n} \sum_i I_i, \quad \Delta I_i = I_i - I_{CP}$$

где  $\Delta I$  – отклонение интенсивности звука, усредненное по всем направлениям,  $I_{CP}$  – средняя интенсивность звука в пределах полного телесного угла,

$\Delta I_i$  – отклонение интенсивности звука от среднего значения в данном направлении,

$I_i$  - интенсивность звука для  $i$ -го направления,

$n$ - число взятых направлений.

При  $m = m_0$  (полностью заглушенное помещение), индекс диффузности равен нулю. Если  $i_d = 0$ , то поле абсолютно диффузно. Для большого числа залов среднее значение индекса диффузности составляет около 0,65. ..0,75. С увеличением объема помещения ( $V > 10000$  м) индекс диффузности уменьшается. Его увеличивают применением в помещениях разнообразных по форме звукорассеивающих объемных конструкций.

## 6. Содержание отчета

1. Титульный лист с указанием кафедры, лаборатории, номера и наименования работы, номера группы и фамилии студента.
2. Цель работы.
3. Расчетные формулы.
4. Рисунки, таблицы с результатами наблюдений, расчетов и измерений.
5. Графики полученных зависимостей.
6. Выводы.