



Б. Я. МЕЕРЗОН

**АКУСТИЧЕСКИЕ ОСНОВЫ
ЗВУКОРЕЖИССУРЫ**

Часть I

ГУМАНИТАРНЫЙ ИНСТИТУТ ТЕЛЕВИДЕНИЯ И РАДИОВЕЩАНИЯ
ИМЕНИ М. А. АНТОНЧИНА



Б. Я. МЕРЗОН

АКУСТИЧЕСКИЕ ОСНОВЫ ЗВУКОРЕЖИССУРЫ

Курс лекций на I и II курсах
звукорежиссерского факультета

ВОЗВРАТИТЕ КНИГУ НЕ ПОЗЖЕ
обозначенного здесь срока

Москва
2000

УДК 621.39.612.85
ББК 32.871
М 42

Рекомендовано к печати решением Ученого совета
Гуманитарного института телевидения
и радиовещания имени М. А. Литовчина.

М 42 Меерзон Б. Я. Акустические основы звукозаписи. Часть 1: Курс лекций на 1 и 2 курсах звукоинженерского факультета. – М.: Гуманитарный институт телевидения и радиовещания им. М. А. Литовчина, 2000. – 48 с.
ISBN 5-94237-004-4 (ч. 1)

Курс лекций является вводным и первого Б. Я. Меерзон — это первый шаг в подготовке профессии звукоинженера, закладывающий фундамент для дальнейшего, более углубленного практического освоения предмета. Звукоинженер — профессионал, требующий знаний из различных областей культуры и науки. Он не только должен быть знаком с историей и теорией музыки, иметь хорошие анатомические слух, обладать тонким чувством ритма и стилем художественного произведения, но и должен знать физические свойства звука и законы закономерности его восприятия человеком. Необходимо также изучить принципы устройства и функционального назначения звукозаписывающего студийного оборудования, хорошо понимать его возможности и ограничения. Настоящие лекции посвящены вопросам акустики и звукозаписи. Они рассчитаны на более поздней последовательности, чтобы, усилив их шаг за шагом, студент постепенно бы шаг за шагом подходил к практическому освоению профессии.

Для студентов дневного и заочного отделений звукоинженерного факультета, всех, кто интересуется проблемами музыки и звукозаписи.

2485

УДК 621.39.612.85
ББК32.871

Фотографии для обложки — А. Марковский

ISBN 5-94237-004-4 (ч. 1)

© М. Я. Меерзон, 2000.
© ГИТР — оформление, 2000.

Издательское лицензия № 02183 от 30.06.2000
Сдано в набор 2.09.2000. Печатались в г. Санкт-Петербург, 12.11.2000.
Формат 60 X 84 1/16. Бумага офсетная. Печать на бумаге Тетра ЕТ
Полная стоимость. Объем 3 п. л. Тираж 500 экз.
Отпечатано в типографии «Издательство»
109116, Москва, Сибирский пр., д. 2, корп. 30

БИБЛИОТЕКА
УНИВЕРСИТЕТА
ТЕЛЕВИДИЯ И РАДИОВЕЩАНИЯ
УЧЕБНЫЙ ФОНД

СОДЕРЖАНИЕ

Введение	4
Раздел I. “Звук и его параметры”	5
Тема 1.1. Физическая природа звука	5
Тема 1.2. Звуковой диапазон частот	8
Тема 1.3. Динамический диапазон звука	9
Тема 1.4. Реальный звук. Спектры звуковых колебаний и тембр	17
Тема 1.5. Пространственное восприятие звука	21
Тема 1.6. Звук в закрытом помещении	22
Раздел II. Канал звукопередачи	28
Тема 2.1. Общие понятия	28
Тема 2.2. Качественные параметры канала звукопередачи	29
2.2.1. Уровень передачи звукового сигнала	29
2.2.2. Амплитудно-частотная характеристика	33
2.2.3. Нелинейные искажения	35
2.2.4. Помехи в тракте звукопередачи	39
2.2.5. Динамический диапазон передачи	43

ВВЕДЕНИЕ

Передача звуковой информации с помощью технических средств играет в наш век огромную и все более возрастающую роль буквально во всех областях социальной и общественной жизни, науки и культуры. Круг применительных ныне технических устройств, предназначенных для приема, обработки, записи и передачи звука поистине необъятен. Однако, каковы бы ни были эти устройства, будь-то обычный телефон, или сложнейший многоканальный журналистический комплекс, монопольным потребителем составляемой ими "продукции" является орган слуха человека.

Причем, если при непосредственном восприятии звука (например, музыки), цепочка передачи звуковой информации состоит из двух звеньев: исполнитель — слушатель, то, при прослушивании через электроакустический тракт в эту цепочку, как важнейшее звено, входит звукорежиссер.

С помощью современных технических средств звукорежиссер должен передать слушателям как искусство исполнителя, так и ощущение окружающей обстановки (акустики зала или обстановку сценического действия). Однако, при этом ему придется учитывать специфику восприятия звука через динамики, отличие такого опосредствованного прослушивания от натурального. Звуковую информацию звукорежиссеру приходится соответствующим образом обрабатывать. Разумеется, с этой задачей можно справиться, только хорошо зная все законы звукопередачи и психофизиологию человеческого слуха.

Курс обучения складывается из 4-х разделов теории звукорежиссуры, с акцентом на акустический и технический аспект специальности. В предлагаемой брошюре содержится лекция по двум первым разделам программы, рассчитанная на первый год обучения.

РАЗДЕЛ I. "ЗВУК И ЕГО ПАРАМЕТРЫ"

Изучая этот раздел студент знакомится с физической сущностью звука и изучает психоакустические взаимосвязи между объективными свойствами звуковых колебаний и субъективным слуховым ощущением, возникающим у слушателя под их воздействием.

ТЕМА 1.1. ФИЗИЧЕСКАЯ ПРИРОДА ЗВУКА

Как известно, звук — это колебательный процесс, возникающий в воздухе (или другой упругой среде) под действием каких-либо колеблющихся предметов. Источниками звука могут быть, например, голосовые связки человека, струны музыкальных инструментов или любой другой вибрирующий предмет, заставляющий колебаться окружающее его количество воздуха. Плотность воздушной среды, при этом, то увеличивается, то уменьшается в соответствии с колебаниями источника звука. В простейшем случае это — "чистый" тон (звук камертона), при котором источник излучает только одну частоту, и изменение мгновенных значений колебания строго подчиняется закону синуса. В повседневной жизни чистые синусоидальные тоны почти не встречаются. Из музыкальных инструментов, в какой-то степени приближается к чистому тону только флейта. Звуки, которые мы обычно слышим — речь, музыка или шумы окружающей среды — значительно сложнее: состоят элементарного тона и представляют собой сложные по форме колебания, состоящие из комбинаций нескольких или даже многих тонов. Это так называемые сложные, речь о которых пойдет ниже. Однако вскрыть и описать механизмы воздействия звуковых колебаний на барабанную перепонку уха и возникающие при этом слуховые ощущения много легче на примерах простых тонов. При изложении основ акустики и звукотехники прибегают именно к такому упрощению, не нарушающему общих закономерностей явлений.

Итак, рассмотрим простейший, так называемый, "чистый" тон. Его можно описать графиком изменения во времени давления воздуха в определенной точке поля под воздействием источника звука. При этом, ощущаемая на слух разность между полным давлением воздуха и тем средним, которое будет наблюдаться в среде при отсутствии звука (например, нормальным атмосферным давлением) называется *звуковым давлением*. При этом принято считать, что в фазе сжатия среды звуковое давление положительное, а в фазе разрежения — отрицательное.

В соответствии с международной системой единиц СИ единицей звукового давления служит "Паскаль" (Па), определяемый как давление, создаваемое силой в 1 Ньютон, действующей на 1 кв. метр площади (измерения проводятся в нормальных условиях: при температуре 20° С и атмосферном давлении 760 мм. рт. ст.).

Паскаль связан с другой ранее применявшейся единицей звукового давления — баром, следующим простым соотношением: 1 Па = 10 бар.

График звукового давления представлен на рис. 1.

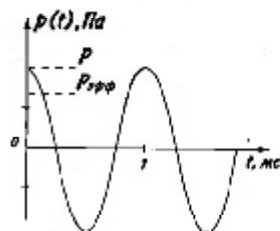


Рис. 1. Звуковое давление как функции времени. Зависимость от координат точки наблюдения скрыта в начальной фазе колебания.

Распространяясь в воздушном пространстве во все стороны со скоростью, равной, примерно, 340–343 м/с, звуковые колебания образуют *звуковую волну*. Эти волны действуют на барабанные перепонки уха, создавая слуховое ощущение. Область пространства, в котором наблюдаются звуковые волны, называется *звуковым полем*.

При прохождении звуковой волны молекулы воздушной среды смещаются. Размах этих колебательных смещений зависит от звукового давления. Волны с перпендикулярным к направлению распространения волны смещением частиц называют поперечными, а те, в которых смещения происходят вдоль направления распространения — продольными. В газах и жидких средах могут распространяться только продольные волны.

Важным в акустике понятием является длина волны звукового колебания. Она определяется отрезком на предполагаемой оси, расположенной в направлении распространения звука, на котором уменьшается полный цикл изменений звукового давления. Иначе говоря, это наименьшее расстояние между точками звукового поля с одинаковыми фазами коле-

бания. Длина звуковой волны наглядно изображена в виде графика на рис. 2.

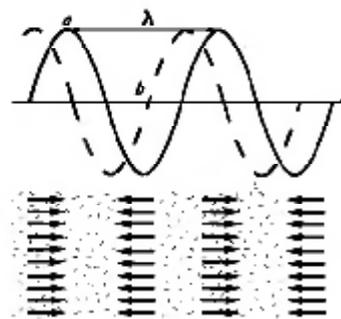


Рис. 2. Продольные звуковые волны.

График этот похож по внешнему виду на график, приведенный на рис. 1. Но отличается он тем, что в первом случае изображен закон изменения звукового давления во времени в одной определенной точке пространства, а во втором показывается распределение мгновенных значений давления от точки к точке пространства, наблюдающееся при распространении волны в какой-то один фиксированный момент времени. Синусоидальная звуковая волна за один период колебания T проходит путь, равный длине волны. А так как период колебания и частота величины взаимно обратные ($T = 1/f$), то длина волны для данного колебания однозначно определяется частотой звукового сигнала и вычисляется по формуле:

$$\lambda = \frac{c}{f},$$

где

- λ — длина волны в метрах,
- $c = 340$ м/с — скорость распространения звука в воздухе,
- f — частота звуковых колебаний в герцах (Гц).

Например, если сигнал имеет частоту $f = 100$ Гц, то длина волны $\lambda = 340/100 = 3,4$ м, а при $f = 10\,000$ Гц, $\lambda = 340/10^4 = 3,4$ см и т.д.

Понятие о длине звуковой волны поможет, при последующем изложении материала, объяснить закономерности явлений интерференции и дифракции звуковых волн, возникающих в студии и заметно влияющих на качество звукопередачи в целом.

ТЕМА 1.2. ЗВУКОВОЙ ДИАПАЗОН ЧАСТОТ

Область акустических колебаний, способных создавать ощущение звука при воздействии на орган слуха, ограничена по частоте. Для большинства людей от 18 до 25 лет, обладающих нормальным слухом, полоса частот колебаний, воспринимаемых в виде звука, лежит, с некоторыми отклонениями, в пределах между колебаниями с частотой 20 Гц (нижняя границная частота) и 20000 Гц (верхняя граничная частота). Эту полосу частот принято называть звуковым диапазоном, а частоты, лежащие в его пределах — звуковыми частотами.

Колебания с частотами менее 20 Гц, называемые инфразвуковыми, а колебания с частотами более 20000 Гц — ультразвуковыми. Эти частоты наш слух не воспринимает, однако, известно, что «инфразвук» оказывает определенное влияние на эмоциональное состояние слушателя. К сожалению, инфразвуковые частоты, которые, как показали современные исследования, в составе колебаний музыки и речи присутствуют, воспроизвести с магнитофонных записей, по техническим причинам, не возможно. Это не единственное и, пожалуй, не самое главное, но все же препятствие, не позволяющее достичь при прослушивании музыки, переданной через электрическую систему, того же эмоционального воздействия, какое испытывает слушатель в концертном зале.

Частота звуковых колебаний определяет высоту (тон) звука: самые медленные колебания воспринимаются как низкие, басовые ноты, самые быстрые — как высокие звуки, пищмяющие, например, козырный диск. Следует заметить, что люди не одинаково хорошо слышат все частоты звукового диапазона. Так, с возрастом, верхняя граница слышимых частот значительно понижается. Звуковой диапазон частот определяется предельные возможности слуха человека, выявленные с помощью многочисленных исследований и усреднения результатов многих опытов, проведенных со слушателями различных возрастов и с разной тренировкой.

Нужно иметь представление о том, как человек оценивает повышение или понижение высоты тона при изменении частоты звукового колебания. В разговорном языке под высотой тона понимают его расположение на некоторой шкале. Здесь надо иметь в виду, что в физической акустике и музыке, говоря о высоте тона, пользуются разными шкалами. В физике считают, что тон, например с частотой 131 Гц имеет удвоенную высоту по сравнению с тоном частоты 65,5 Гц. При возрастании частоты от 131 до 262 Гц высота тонов еще раз удваивается. Таким образом, в интервале частот от 131 до 262 Гц высота тонов возрастает на число единиц вдвое большее, чем в интервале от 65,5 до 131 Гц.

Такая оценка не соответствует особенностям нашего слуха. В музыке высота тона определяется только его расположением в нотной системе и соответственно в натуральном звукоряде. В смысле европейской музыки положена октавная периодичность. Она основана на том, что два тона, частоты которых соотносятся как 1:2, воспринимаются слухом как родственные, имеющие тенденцию, при одновременном звучании сливаться.

В нашем примере нота C_0 с частотой 131 Гц на октаву выше ноты C_1 (65,5 Гц), и в свою очередь, нота C_1 (262 Гц) выше ноты C_0 также на октаву. Для музыканта, таким образом, высота тона и в первом и во втором случае возрастает на один и тот же интервал — на одну октаву.

Изменение частоты звуковых колебаний в определенном соотношении здесь приводит к изменению высоты тона на один и тот же музыкальный интервал. Удвоение частоты, как уже было сказано, соответствует повышению высоты тона на октаву, увеличение, пропорциональное кубическому корню из двух, соответствует росту высоты на темперированную большую терцию, а повышение, кратное корню двенадцатой степени из двух, — на темперированной полутоном. Кстати, в каждой октаве содержится 12 полутонов. Разный музыкальный слух четко различает эти интервалы при любой высоте тона.

ТЕМА 1.3. ДИНАМИЧЕСКИЙ ДИАПАЗОН СЛУХА

Чистые тоны субъективно воспринимаются громкими или тихими в зависимости от силы (интенсивности) звука. Сила звука (обозначаемая обычно символом I) связана со звуковым давлением квадратичной зависимостью. Это значит, что изменение силы звука пропорционально соответствующему изменению величины звукового давления, возведен-

ному и квадрат (I пропорционально p^2). Так, рост звукового давления в 2 раза влечет увеличение силы звука в 4 раза, при росте звукового давления в 3 раза сила звука возрастает в 9 раз и т.д. Сила звука определяется потоком той звуковой энергии, которая при распространении в пространстве проходит каждую секунду через каждый квадратный метр плоскости, перпендикулярной к направлению распространения волны. Измеряют силу звука в Вт/м².

Человеческий слух по восприимчивости звуков разной силы ограничен. Человек начинает слышать при силе звука, превышающей или равной некоторой величине, называемой *порогом слышимости* (или слуховым порогом). Более слабые звуки слухового ощущения не вызывают. При увеличении силы звука достигается нормальная слышимость, а затем при еще больших амплитудах звуковых колебаний к воспринимаемому звуку добавляется осязаемое ощущение давления, и, наконец, при дальнейшем росте силы звука раздражение органа слуха становится болезненным. Так называемый *болевой порог* ограничивает область слышимости при больших уровнях интенсивности. Чувствительность человеческого уха зависит от частоты приходящего сигнала, поэтому уровень порога слышимости для разных частот различный.

На рис. 3 изображены значения силы звука и соответствующие им звуковые давления, при которых звуковые сигналы с различными частотами становятся едва слышимыми. На этом же рисунке обозначен и болевой порог. Человеческое ухо наиболее чувствительно к частотам от 1000 до 5000 Гц. Порог слышимости здесь самый низкий. Так, на частоте 1000 Гц (1 кГц) пороговая сила звука — около 10^{-12} Вт/м², что соответствует звуковому давлению $2 \cdot 10^{-5}$ Па).

При смещении из области оптимальной слышимости в сторону низких и высоких звуковых частот чувствительность человеческого уха резко падает. Это видно по поведению кривой порога слышимости вблизи крайних диапазонов слышимости. А вот болевой порог от частоты зависит слабо. Звуковое давление, вызывающее у человека болевое ощущение, приблизительно равно 20 Па. На средних частотах звуковое давление, соответствующее болевому порогу, превышает порог слышимости примерно в миллион раз. Поскольку поток энергии звуковой волны с величиной звукового давления связан квадратичной зависимостью, то же сила звука у порога слышимости и болевого отличается в 10^9 раз. Это отношение и определяет *динамический диапазон* слуха. Этот диапазон можно определить и отношением к пороговым значениям звуковых давлений, в этом слу-

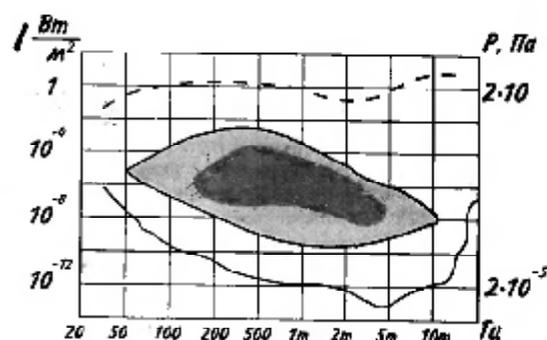


Рис. 3. Области слышимости: сплошная линия — порог слышимости, штриховая — болевой порог, светлосерая — область музыкальных звуков, темносерая — речевых.

чае он равен 10^9 . При оценке динамического диапазона применяются специальные единицы измерения, не зависящие от способа вычисления. О них будет сказано несколько ниже.

Согласно психофизическому закону Вебера-Фехнера слух одинаково оценивает равные относительные изменения силы звука. Другими словами, изменение громкости кажется человеку одинаковым, если сила звука изменилась в одно и то же число раз (или на один и тот же процент относительно своей первоначальной величины), при этом восприятие не зависит от абсолютного уровня силы звука. Так двукратный рост уровня тихого и громкого звука воспринимаются одинаково, хотя абсолютные приращения звукового давления существенно различны.

Минимальное изменение интенсивности звука, воспринимаемое нашим ухом, соответствует изменению звукового давления примерно в 1,12 раза (т.е. на 12%), что соответствует изменению силы звука в 1,25 раза (т.е. на 25%). Итак, наряду со способностью различать звуки, имеющие уровни, отличающиеся в сотни и тысячи миллион раз, человеческое ухо хорошо реагирует и на очень малые изменения уровней. Это объясняется логарифмическим законом восприятия. Наши ощущения изменений громкости пропорциональны не изменению силы звука, а логарифму этих величин.

$$L = C \lg \frac{I_2}{I_1},$$

Где

L — кажущееся изменение громкости;

I_1, I_2 — сила звука соответственно до и после его изменения;

C — коэффициент пропорциональности.

Например, если сила звука изменился в 100 раз, то субъективное ощущение громкости изменится пропорционально 2 (т.к. $\lg 100 = 2$); если это изменение — 1000, то громкость возрастет в 3 раза (т.к. $\lg 1000 = 3$); рост силы звука в 10000 раз воспринимается как 4-кратное увеличение громкости. Поэтому принято измерять увеличение или уменьшение силы звука в специальных логарифмических единицах — «беллах» (Б). Различие величин звуковой энергии (силы звука) в беллах $N_b = \lg I_2/I_1$ Б.

Иными словами, десятикратное изменение силы звука оценивается одним Белом. Например, если $I_2 = 10I_1$, то $\lg I_2/I_1 = \lg 10 = 1$, т.е. $N_b = 1$ Б; если $I_2 = 100I_1$, то $\lg 100 = 2$ и $N_b = 2$ Б.

Мелкие изменения звуковых уровней измеряют в дозах Бела. На практике в основном используется производная от Бела единица измерения, равная десятой части Бела, т.е. децибел (дБ).

Изменение уровня силы звука, выраженное в дБ, равно численному значению десятичного логарифма отношения сравниваемых уровней, умноженному на 10, т.е. $N_{дБ} = 10 \lg I_2/I_1$.

Обратимся к примерам.

Пусть $N = I_2/I_1 = 100$ ($I_2 > I_1$ — усиление), тогда $N_{дБ} = 10 \lg 100 = 10 \cdot 2 = 20$ дБ.

Пусть $N = I_2/I_1 = 1/100$ ($I_2 < I_1$ — ослабление), тогда $N_{дБ} = 10 \lg 0,01 = 10 \cdot (-2) = -20$ дБ.

Из этих примеров видно, что рост уровня выражается в децибелах положительным числом, а уменьшение — отрицательным.

Оценка изменений интенсивности звука в логарифмических единицах удобна еще и потому, что она дает возможность весь слышимый диапазон звуковых колебаний изобразить графически. Действительно, разместить на чертеже в линейном масштабе изменения уровня, доходящие до сотен миллионов раз, невозможно, а в логарифмическом масштабе (в децибелах) это не особенно трудно. Кроме этого, независимо от того, берем ли мы при вычислениях в качестве исходных данных силу звука (т.е. звуковую энергию) или звуковое давление, сравнение уровней в де-

цибелах дает одинаковый результат. При этом надо лишь помнить, что изменение звукового давления в n раз соответствует изменению силы звука (звуковой энергии) в n^2 раз. Поэтому, если при вычислениях за исходные данные берется звуковое давление, то следует отношение сравниваемых давлений возвести в квадрат и уже потом прологарифмировать, что соответствует простому умножению результата сравнения по n на 2 (так как $\lg n^2 = 2 \lg n$). Иными словами, сравнение уровней по звуковому давлению в децибелах может быть произведено по следующей формуле

$$N_{дБ} = 10 \lg(p_2/p_1)^2 = 10 \cdot 2 \lg p_2/p_1 = 20 \lg p_2/p_1.$$

Вновь обратимся к примерам.

Пусть $p_2/p_1 = 1000$ или, соответственно, $I_2/I_1 = 1000000$, тогда $N_{дБ} = 20 \lg p_2/p_1 = 20 \lg 10^3 = 20 \cdot 3 = 60$ дБ; $N_{дБ} = 10 \lg I_2/I_1 = 10 \lg 10^6 = 10 \cdot 6 = 60$ дБ.

Таким образом, оба метода вычислений по звуковым давлениям и силам звука дали одинаковый результат.

Пользуясь децибелами для оценки различия в уровнях, мы можем теперь указать меру некоторых из упомянутых ранее величин. Она приведена в таблице 1.

Таблица 1

Наименование измеряемой величины	Отношение по силе звука	Отношение по звуковым давлениям	Отношение в децибелах
Минимальный порог слуха, упреждаемый шум	1,25 : 1	1,12 : 1	1
Динамический диапазон слуха	10^{12}	10^6	120
Натуральный динамический диапазон симфонического оркестра	10^7	10^4	80

При решении практических задач часто бывает необходимо выразить уровень звука в децибелах относительно уровня, принятого за нулевой, или, как говорят в таких случаях, определить абсолютную величину уровня. При этом за нулевой уровень звукового давления принимают величину, равную уровню порога слышимости на средних частотах: $p_0 = 2 \cdot 10^{-5}$ Па.

Тогда, например, при звуковом давлении $p = 4$ Па, уровень звука в децибелах будет равен: $L = 20 \lg p/p_0 = 20 \lg(4/2 \cdot 10^{-5}) = 20 \lg(2 \cdot 10^4) = 20 (\lg 2 + \lg 10^4) = 20 \cdot 0,3 + 20 \cdot 4 = 6 + 80 = 86$ дБ. Заметим, что, если звук лежит на пороге слышимости, то его уровень равен 0 дБ (т.к. $20 \lg 1 = 20 \cdot 0 = 0$).

Теперь, несколько слов о том, что подразумевается под понятием громкости.

Громкость называют субъективное качество, определяющее силу слухового ощущения, вызываемого звуком у слушателя. Громкость не может быть определена только величиной силы звука, так как она зависит от частотного состава звукового сигнала, от условий его восприятия и длительности воздействия. В акустике для количественной оценки громкости применяют метод субъективного сравнения измеряемого звука с эталонным, в качестве которого применяется синусоидальный тон частоты 1000 Гц. В процессе сравнения уровень эталонного тона изменяют до тех пор, пока эталонный и измеряемый звуки станут казаться равногромкими.

Итак, за **уровень громкости** принимают величину, численно равную уровню эталонного тона частоты 1000 Гц, равногромкого с данным звуком. Уровень громкости выражается в **фонах**. Единица измерения уровня громкости — фоны численно совпадает с уровнем звука, выраженным в децибелах, на частоте эталонного тона 1000 Гц. Как уже было сказано выше, чувствительность слуха зависит от частоты звукового сигнала. Порог слышимости, изображенный графически, представляет собой кривую, опускающуюся ниже всего в области частот 3000–4000 Гц и поднимающуюся к краям звукового диапазона. Из этой формы кривой следует, что для равногромкого ощущения интенсивность высоких и низких частот должна быть выше, чем средних.

Можно нарисовать семейство кривых для разных уровней звука таким образом, чтобы на каждой из этих кривых точки на разных частотах соответствовали бы одному и тому же уровню громкости (рис. 4).

По этим кривым, называемым кривыми равной громкости, или кривыми Флетчера-Мэнсона, можно по уровню звука на любой частоте определить соответствующий этому звуку уровень громкости.

Например, уровень громкости звукового тона с частотой 100 Гц и уровнем 50 дБ, судя по кривым, $L = 20$ фон. (Действительно, звук 100 Гц с уровнем 50 дБ по громкости равен звуку 1000 Гц, с уровнем 20 дБ).

Для практической работы важно помнить, что кривые равной громкости, как бы, выпрямляются с ростом общей громкости прослушива-

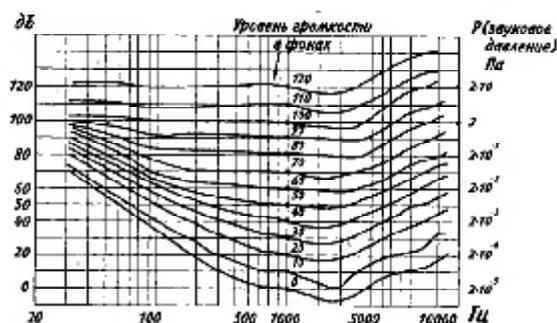


Рис. 4. Кривые равной громкости

ния. Другими словами, частотная зависимость слуха в большей степени сказывается при тихом прослушивании, чем при громком. Это важно учитывать, если, например, музыка, записанная при высоких уровнях громкости, будет прослушиваться тихо. В этом случае может возникнуть кажущееся изменение соотношений между частотными составляющими музыкального произведения. Так, при малой громкости прослушивания, из-за ослабления чувствительности слуха на низких и отчасти на высоких частотах звучание может казаться обедненным, лишенным остроты, естественности. Весьма желательно поэтому, чтобы в студиях звукозаписи громкоговорители работали с одинаковым уровнем громкости: это уменьшит возможность ошибок при субъективной оценке качества звучания.

Практически уровень громкости измеряется и настраивается в студиях при помощи специального электроакустического прибора — шумомера, так как описанный выше метод субъективного сравнения измеряемого звука с эталонным тоном является довольно трудоемким, не всегда достаточно точным и имеет, в основном, лишь теоретическое значение. При использовании шумомера измеряемый звук преобразуется микрофоном в электрические колебания. Затем, после усиления специальными усилителями, эти колебания измеряются прибором, откалиброванным в единицах измерения уровня громкости. Причем, чтобы показания при-

бора как можно более точно соответствовали субъективному восприятию громкости, прибор снабжен специальными фильмами, наименьшими его чувствительности ось к восприятию звука разных частот в соответствии с характеристикой чувствительности человеческого слуха. Примерные уровни громкости некоторых типичных звуковых источников приведены в таблице 2.

Таблица 2

Источник звука	Уровень громкости в фонах
Автомотор на расстоянии 5 м	120
Соревнование оркестра	95-100
Шум движущегося поезда метрс	90
Громкая радиомузыка, меццо-форте музыкального исполнения, шум на улице с движущимся транспортом	70-80
Алгодискемты	60-70
Плавильско музыкального исполнения, разговорная речь в жилой комнате	40-50
Тиканье часов на расстоянии 0,5 м	30
Шапот на расстоянии 1 м	20

По опыту работы звукорежиссеров, по записям музыкальных произведений, предназначенных для длительного хранения на радио и телевидении или для производства компакт-дисков, для лучшего обнаружения дефектов звучания, которые могут возникнуть в процессе записи или монтажа, уровень громкости прослушивания с контрольных громкоговорителей объектно устанавливается до 90-96 фон, при исполнении большими коллективами оперной и симфонической музыки и 80-85 фон при исполнении камерных произведений.

Выше уже упоминалось о том, что громкость зависит от условий, в которых звук воспринимается слушателем. Здесь, в первую очередь, следует учитывать эффект *музыкальной маскировки*, напомнив, что в реальных условиях акустический сигнал не существует в условиях абсолютной тишины. Вместе с тем на слух воздействуют те или иные посторонние шумы, затрудняющие слуховое восприятие и, как в таких случаях говорят, маскирующие, в определенной степени, основной сигнал. Эффект маски-

ровки чистого синусоидального тона посторонним шумом оценивается обычно величиной, указывающей, насколько децибел повышается порог слышимости маскируемого сигнала над порогом его восприятия в тишине. Маскировку сложного сигнала (например, речи или определенной партии музыкального инструмента) измерять смещением порога слышимости не имеет смысла. В этом случае имеет значение не только уровень громкости, но и сохранение разборчивости речи или определенности музыкальной темы на фоне постороннего шума и прочих звуков. Так, при передаче оркестрового произведения из-за маскировки аккомпанементом может стать плохо разборчивой, неясной партия солиста.

Опыты по определению степени маскировки одного звукового сигнала другим показывают, что любой тон маскируется более низкими тонами в большей мере, чем более высокими. Если одновременно существуют два сложных звуковых сигнала (например шум и музыка), возникает эффект взаимной маскировки. При этом, если основная энергия сигналов принадлежит к одной и той же области звуковых частот, то эффект взаимной маскировки будет наиболее сильным.

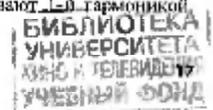
Достичь требуемой четкости или, как принято говорить "прозрачности", звучания при звукопередаче оркестров или вокальных ансамблей весьма трудно, если инструменты или отдельные группы инструментов оркестра играют в одном или близких регистрах одновременно. Ясность основных черт произведения, основных мелодических линий и отдельных музыкальных партий достигается в этих случаях близким расположением микрофонов к исполнителям, усиленным выделением звукорежиссером наиболее важных в данном месте произведения инструментов и другими специальными приемами звукорежиссуры.

ТЕМА 1.4. РЕАЛЬНЫЙ ЗВУК

СПЕКТРЫ ЗВУКОВЫХ КОЛЕБАНИЙ И ТЕМБР

Натуральные звуки, с которыми мы сталкиваемся в жизни, практически никогда не бывают "чистыми" синусоидальными тонами, а являются *сложными*. Последнее означает, что источник вместе с основным колебанием излучает волны с частотами в 2, 3, 4, 5 и т.д. раз большими основной частоты. Но принятой в музыкальной акустике терминологии эти колебания называются, соответственно, *натуральными тоном* и *обертонными*: 1-м, 2-м, 3-м, 4-м и т.д. В физике, хочу сразу оговориться, используется иная терминология: основной тон называют *1-ой гармоникой*,

4
5
6
7
8
9
10



а обертоны, начиная с первого имеются высшими гармониками 2-й, 3-й, 4-й и т.д. по порядку.

Основной тон определяет высоту звука, обертоны, складываясь в определенных соотношениях, придают звуку специфическую окраску или, иными словами, присущий данному источнику *тембр*. Распределение элементарных тонов созвучия по частотам может не подчиняться какому-либо простому закону. Характерный пример — звук колокола. Но в большинстве случаев под определением "созвучие" мы понимаем комбинацию основного тона с более или менее интенсивными естественными обертонами. От чистого тона созвучие отличается тем, что его временная функция не является синусоидальной.

На рис. 5.1 а приведена временная функция созвучия скрипки. Распознать по этому графику основной тон колебания очень трудно. Ничего данного график не говорит и о частотном составе созвучия. Для этого следует представить данное колебание в иной плоскости, в виде спектральной характеристики. Разложим его, в так называемый, гармонический ряд Фурье. По оси частот, в виде вертикальных стрелок, откладываются уровни колебаний, составляющих созвучие. Спектр созвучия скрипки, соответствующий приведенной выше временной функции, представлен на рисунке 5.1 б. Характерной чертой спектров струнных смычковых инструментов, и, в частности скрипки, является наличие в них почти одинаковых по интенсивности первых восьми — девяти составляющих колебаний, медленно убывающих по величине с ростом их порядкового номера.

На следующем рисунке 5.2 приведена временная функция и спектр гласной "И" певческого голоса. В отличие от спектра скрипки, в котором амплитуды составляющих тонов спадают почти равномерно, амплитуды спектральных составляющих гласного звука — это хорошо видно — подчиняются другому закону. Вокруг частот 200 и 3000 Гц составляющие тоны достаточно интенсивны, в других интервалах они значительно слабее: отбавочная спектра имеет два четких максимума. Для различных гласных эти максимумы лежат на разных частотах и называются *формантами*.

Большинству тонов, которые мы слышим, присуще непостоянство и по амплитуде, и по частоте. С частотами, примерно равными 5—25 Гц, амплитуды звукового давления периодически изменяются (амплитудная модуляция), что придает звуку характерную "тремолообразную" окраску. А при постоянной амплитуде, быстро меняющаяся частота основного

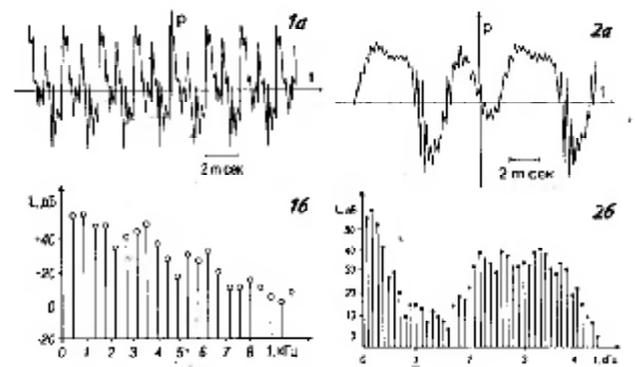


Рис. 5.

1. Уровень звукового давления скрипки в функциях времени — а и частоты — б.
2. Уровень звукового давления гласной "И" в функциях времени — а и частоты — б.

тона (частотная модуляция), на слух воспринимается как вибрато. И в том и в другом случае спектры натуральных звучаний музыкальных инструментов обогащаются новыми частотными составляющими, влияющими на тембр.

В музыке часто, звучит для тона с почти одинаковыми уровнями и частотами. На слух они воспринимаются как один тон. Однако из-за существования все-таки небольшого различия частот, фазы тонов постоянно смещаются одна относительно другой. В моменты, когда фазы совпадают, громкость увеличивается, когда фазы расходятся, громкость становится слабее. Поэтому и воспринимаемый слухом суммарный тон периодически меняет громкость. Этот очень характерный эффект называется *биениями*. Конструкторы органов используют этот эффект для оживления звуков инструмента, устанавливая в нем диссонантный регистр, который отличается на несколько герц от строя других регистров и поэтому создаст биения.

И, наконец, звуки почти всех музыкальных инструментов сопровождаются, так называемыми, узкополосными шумами. Шумами в акустике называют звуки, которые, в отличие от синусоидальных тонов и созвучий,

чий, у которых спектры дискретны, имеют непрерывный спектр. Например, игра на флейте, музыкально возбуждает не только периодический музыкальный тон, но и шум от дуновения воздуха. Из этого шума флейта, как акустический резонатор, выделяет узкую полосу вблизи основного тона. Этот узкополосный шум смешивается с основным тоном, благодаря чему звук флейты приобретает присущую ему выразительность. Такие же шумы возникают при игре на смычковых инструментах, а также в речи и пении. На приведенных выше рисунках их можно заметить по незначительным различиям колебаний в разные периоды. На спектре это проявилось в его расширении, а также в заполнении интервалов между отдельными составляющими.

Итак, слушая музыку, мы воспринимаем не только громкость и высоту звука, но и нечто такое, что отличает звук от чистого тона. Этот признак — *тембр*. И если ощущение громкости или высоты имеет вполне однозначные признаки, характеризующие данный звук: громче или тише — выше — ниже, то у тембра, напротив, бесчисленное множество характеристик, соответствующих многообразию состава тонов, которые образуют созвучие. Ни в одном языке мира, а также в научной и инженерной терминологии нет таких слов, которыми можно было бы достаточно точно охарактеризовать такие понятия как, например, тембр скрипки или тембр голоса певца. Здесь часто прибегают к метафорам типа: "жесткий тембр", "бархатистый тембр", "глухой тембр" и т.п.

Объяснение причины такого многообразия тембров различных инструментов и человеческих голосов не было бы исчерпывающим, если не затронуть процессы возникновения и нарастания звуков, при их излучении, и их затухания. Дело в том, что любой звук, возникает и устанавливается на каком-то определенном "стационарном" уровне не мгновенно и затухает он так же постепенно, за определенный промежуток времени. Процесс нарастания звука, до какого-то установившегося, стационарного режима, и процесс его затухания, называют нестационарными процессами. От продолжительности нарастания ("атаки") и затухания звука, а также от формы сближающей нестационарных процессов существенно зависит окраска звука, его тембр.

А это, в свою очередь, определяется конструкцией инструмента, а также способом звукозвучения (скользящая смычка, пилка или удара молоточка по струнам, возбуждения колебаний столба воздуха, дуновения в корпус духового инструмента и т.п.).

ТЕМА 1.5. ПРОСТРАНСТВЕННОЕ ВОСПРИЯТИЕ ЗВУКОВ

Человек обладает способностью определять направление приходящих звуков. Наши органы слуха, воспринимая звуковые колебания от источников звука, расположенных справа и слева от слушателя, различает их и по амплитуде, и по фазе. При этом фазовые сдвиги приходящих звуковых волн связаны с разницей в расстояниях от источника звука до левого и правого уха. Различие по амплитуде звуковых давлений вызвано тем, что голова оказывает определенное экранирующее действие, особенно заметное для звуковых волн, сопоставимых по длине волны с ее размерами (т.е. на высших частотах звукового диапазона). Оба этих явления воспринимаются человеком и служат информацией о месте источника звука в пространстве.

Способность человека определять место расположения (локализацию) источника звука, т.е. ощущать направление течения звуковых волн, называется бинауральным эффектом. Благодаря ему возможно пространственное слуховое ощущение.

Способность восприятия звуков, излучаемых источниками, расположенными в разных точках пространства не ограничивается четким ощущением локализации этих источников. Очень важно еще и то, что, благодаря локализации, даже при одновременном звучании нескольких источников, человек получает возможность, иногда совершенно подлинительно, переключать внимание на звук приходящий по одному какому-нибудь направлению и чисто психологически выделять его на фоне других. Этот эффект, улучшающий различимость отдельных компонентов звучания, например, различных музыкальных инструментов в ансамбле, и уменьшающий, таким образом, их взаимную маскировку, часто называют бинауральной демаскировкой.

Это обстоятельство важно учитывать звукорежиссеру при проведении одноканальной (монофонической) передачи, когда воспроизведение звуковой программы осуществляется через один громкоговоритель, и поэтому все звуки слышатся исходящими из одной точки. Поскольку слушатель, в этом случае, утрачивает ощущение локализации отдельных источников звука, их взаимная маскировка сказывается значительно сильнее, чем на натуре. Отсюда вытекает один из очень трудно устранимых принципиальных недостатков монофонической звукопередачи и звукозаписи — недостаточная "прозрачность" звучания, которая вынуждает звукорежиссера выделять солирующие инструменты на самый ближний, крупный звуковой план, часто значительно более ближний, чем это тре-

буется по композиторскому замыслу и для сохранения стиля музыкального произведения. В итоге необходимо компромиссное решение, не разрушающее естественность звучания, а звукорежиссер надо проявить безупречный вкус и высокое профессиональное мастерство.

ТЕМА 1.6. ЗВУК В ЗАКРЫТОМ ПОМЕЩЕНИИ

Со звуками на открытом воздухе звукорежиссеру приходится сталкиваться достаточно редко. Обычно художественные программы исполняются в помещениях: студиях, на сценах театров, концертных залах. Акустические свойства помещения существенно влияют на характер звучания исполняемой в нем музыки и речи. В помещениях акустическое поле формируется не только прямой волной, идущей от исполнителя по кратчайшему пути, но и после отражений от стен, потолка, пола и находящихся в помещении предметов. При каждом новом отражении часть звуковой энергии звуковой волны поглощается отражающими поверхностями и воздушной средой, а часть ее, в виде чистых и убывающих по величине повторений, воздействует на слух, накладываясь на основную (прямой) звук и придавая ему примечную для слушателей протяженность и окраску.

Таким образом, в помещении, где расположен источник звука, поле звуковых волн формируется из прямой и отраженных волн, образующих так называемое диффузное (рассеянное) звуковое поле. Причем, первые отраженные волны следуют друг за другом дискретно, хотя и с микросекундными задержками, но с ростом времени в формировании звукового поля начинают принимать участие волны, претерпевшие разное число отражений и имеющие самые различные фазовые соотношения. При этом затухание звука теряет дискретный характер и становится непрерывным, слитным, что проявляется рвс. 6.

Именно звуковые отражения, когда источник звука выключен, поддерживают поле и звук не пропадает мгновенно, а замирает в течение какого-то определенного для данного помещения времени. Также постепенное затухание звука в помещении, иначе — послезвучание, называется *реверберацией*. От скорости замирания звука зависит время существования отзвука в помещении, так называемое *время реверберации*. Это время тем больше, чем меньше звуковой энергии при отражениях поглощается ограничивающими помещение поверхностями и расположенными в нем предметами.

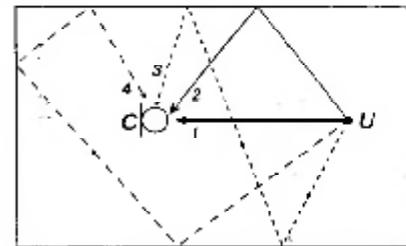


Рис. 6. Отражения звука от стен помещения:
U — источник звука; C — слушатель;
1 — прямой звук 2 — звук, претерпевший одно отражение;
3 — после двух отражений; 4 — после трех отражений.

Естественно, что поглощение звука зависит от размеров помещения, свойств материалов, покрывающих стены, потолок и пол, а также от степени заполнения помещения различными предметами. Например, гладкие крашенные маслом стены, застекленные окна, паркет, полированная мебель — хорошие отражатели звука. Энергия звуковых волн при отражении от таких поверхностей теряется в небольших количествах. Наоборот, ковры, мягкая мебель, тяжелые матерчатые драпировки — хорошие поглотители; наличие их в помещении резко сокращает время реверберации.

Глухие помещения имеют большое время реверберации, в них энергия звуковой волны спадает медленно. В таких помещениях речь теряет разборчивость, музыка звучит более пространственно, расплывчато. В сильно заглушенных помещениях, где поглощение звуковой энергии отражающими поверхностями идет быстро и время реверберации мало, речь и музыка звучат глухо, звук лишается сочности и естественной окраски.

Для сравнения помещений по их акустическим свойствам введено понятие времени *стандартной реверберации*. Временем стандартной реверберации T_c называется время, которое необходимо для того, чтобы плотность звуковой энергии в помещении после выключения источника звука снизилась до одной миллионной части своей начальной величины, т.е. уменьшилась бы на 60 дБ. Это — первая и основная характеристика акустических свойств помещения (рис. 7).

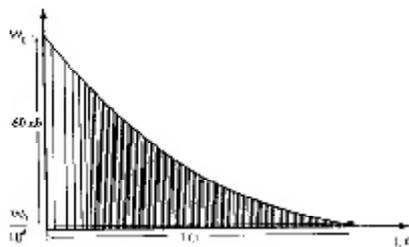


Рис. 7. Спад звуковой энергии после выключения источника звука
 T — время стандартной реверберации.

Опыт радиовещания и звукозаписи показал, что лучшее звучание или оптимальное (наиболее выгодное) время реверберации не одинаково для студий разных размеров и различного назначения. Ориентировочное, оптимальное время реверберации студии может быть определено по кривой, приведенной на рисунке 8. Оно равно 0,35–0,5 с для речевых дисковых студий малого объема и доходит до 2 с для больших концертных студий.

Некоторое уменьшение оптимального времени реверберации для литературно-драматических студий связано с необходимостью сохранения максимальной четкости (разборчивости) текста, которая ухудшается при большой реверберации.

Второй важной характеристикой акустических свойств студии является частотная характеристика времени реверберации или зависимость времени стандартной реверберации от частоты звукового сигнала. Энергия колебаний различных частот звукового диапазона поглощается одинаково и теми же материалами по-разному. Например, ковры, мягкая мебель, драпировки, да и сами слушатели, заполняющие концертный зал, поглощают энергию более высоких частот сильнее, чем низких. Помещения, в которых преобладают подобные поглотители, будут иметь время реверберации больше на низких звуковых частотах и меньше на высоких. Это приводит к значительному искажению тембра звука. Звучание будет глухим и бубнящим. Студии и концертные залы должны иметь определенную частотную характеристику времени реверберации.

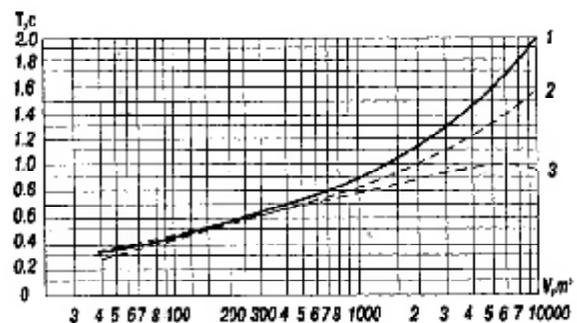


Рис. 8. Кривые зависимости времени оптимальной реверберации от объема студии (для частоты 500–1000 Гц)
 для студий: 1 — музыкальных, 2 — телевизионных, 3 — литературно-драматических.

Опыт эксплуатации показывает, что для больших музыкальных студий рекомендуется прямолinéиная характеристика времени реверберации в полосе частот от 250 Гц и выше. Даже сравнительно небольшое подчеркивание отдельных частотных областей на этом участке звукового диапазона может весьма неприятно сказаться на тембре исполняемой музыки. Звукорежиссеры в таких случаях говорят, что студия имеет "фирмантный характер". И лишь на частотах ниже 250 Гц иногда предпочитают небольшой плавный подъем характеристики (на 40–50 %). Для речевых студий, площади которых обычно малы, характеристика времени реверберации должна иметь спад в области низких частот. Это необходимо для того, чтобы ослабить резонансные явления, возникающие в помещениях малых объемов, которые на слух воспринимаются как "бубнящий" голос.

При обзоре акустических характеристик студий и концертных залов нельзя обойти вниманием роль ранних дискретных отражений звука и влияние времени запаздывания прихода к слушателю каждой из этих волн по сравнению с прямым звуком. Впечатление слушателя о размерах зала определяется именно этими временами запаздывания. В залах малого размера время запаздывания первого отражения обычно не превышает 20 мс.

Звучание здесь воспринимается камерным, интимным. В больших залах задержки первых отражений, еще не успевших в значительной мере потерять свою энергию, больше. Но если при этом они не превышают 50 мс, (при которых уже ощущается эффект эха, т.е. повторя слегка слышатся отдельно), то первые отражения, хотя на слух и сливаются с прямым звуком, но тем не менее создают эффект присутствия слушателя в большом помещении.

Иногда в плохих студиях наблюдается очень нежелательный эффект, получивший название порхающего эха или флаттер-эффекта. Флаттер-эффект возникает, когда имеются две гладкие параллельные стены, или потолок и пол, между которыми находится источник звука. В этом случае в точку приема приходят два первых отражения. Если при этом, разность их путей от отражающих поверхностей превышает 18–20 м, то возникает эхо. Оно особенно подчеркивается за счет сдвига фаз, проявляющимся во взаимном усилении или ослаблении звука (интерференция звуковых волн). В результате многократного отражения в точке приема звук периодически усиливается, а на коротких импульсных звуках, в зависимости от частотных компонент эха и интервала между ними, приобретает характер дребезга, тресков или ряда последовательных и спускающих сигналов эха.

При оценке акустических свойств студии, принимают во внимание и еще один ее параметр: *диффузность* звукового поля. Под диффузностью звука понимают равномерность распределения энергии отраженных волн по всему объему помещения, при котором уровень звуковых волн, проходящих в данный момент из разных направлений, одинаков, а фазы случайны. Для улучшения диффузности при строительстве студий прибегают к размещению больших отражающих поверхностей полукруглыми, круглой или прямоугольной формы, применяют кессонные потолки, подвесные отражатели. Для этих же целей иногда используют непараллельные стены и потолок с полом.

Но наряду с этим, надо иметь в виду, что акустические свойства студии являются важными условиями высокого качества звучания, но не только они определяют успех работы звукорежиссера.

Надо отметить, что для качественного звучания передат. следует строго соблюдать нормы заполнения студии исполнителями. Современное требование, справедливость которых подтверждена опытом, предполагает, что при музыкальном исполнении на каждого исполнителя должно приходиться не меньше, чем по 35–50 куб. метров объема студии. Так для

оркестра из 50 человек необходима студия объемом не меньше 2500 куб. метров. При исполнении оперы, оратории, симфонического произведения коллективом 150–200 человек необходима студия объемом соответственно 6000–10000 куб. метров и больше.

Попытки записать или передать в эфир музыкальные произведения, исполняемые большими коллективами из студий, не рассчитанных на такой состав, приводят к ухудшению качества звучания.

Дополнительная литература

С. Корсунский. Звук и слух. Сборник трудов ВНИИТР, выпуск 7(71) Изд. ГИТР, 1972, стр. 3–17.

Фельдкеллер и Цинклер. "Ухо как приемник информации". Перевод с немецкого. М., "Связь", 1971 г., стр. 10–22.

Учебник для ВУЗов под ред. М.В. Гиллица. Главы 4 (4.1–4.8). М., "Радио и связь", 1989 г.

РАЗДЕЛ II. КАНАЛ ЗВУКОПЕРЕДАЧИ

ТЕМА 2.1. ОБЩИЕ ПОНЯТИЯ

Звуковые акустические колебания преобразуются микрофоном в переменное электрическое напряжение, являющееся точным отображением звукового процесса. Условимся эти электрические колебания звуковых частот называть сигналом передачи. Далее, этот сигнал, по каналу передачи доставляется к потребителю (слушателю) либо в виде электрических колебаний, либо в той же форме звуковой волны, т.е. в виде электрического аналога звука, (аналоговая передача), либо в виде специального цифрового кода (цифровая передача).

Причём, условимся под каналом звукопередачи понимать всю совокупность технических средств, с помощью которых осуществляется передача на расстояние, а затем и воспроизведение звуковых сигналов. Каналы звукопередачи, в зависимости от своего назначения, могут быть построены по различным схемам. Однако, независимо от того, используется ли канал для звукоусиления в залах, для звукозаписи или для звукового вещания (т.е. для передачи звуковых программ на большие расстояния радиослушателям или телезрителям), основными частями его схемы являются:

- микрофон, т.е. преобразователь акустических (звуковых) колебаний в электрические;
- усилители электрических колебаний (звуковых сигналов);
- соединительные линии, по которым передаются сигналы;
- громкоговоритель (или головной телефон), вновь преобразующий электрические сигналы (колебания) в акустические (звуковые) сигналы.

Если речь идет о звуковом или телевизионном вещании, то частью канала звукопередачи считается и так называемый эфирный участок, т.е. пространство, в котором распространяются радиоволны, несущие сигналы изображений и звука, а также передатчик с передающей антенной и радиоприемник (или телевизор) с приемной антенной и громкоговорителем. Любая часть канала звукового вещания, выполняющая определенные функции, называется трактом.

Для перехода на эфирный участок канала приходится дополнительно преобразовывать энергию электрических колебаний в энергию электромагнитных волн (это преобразование осуществляется с помощью антен-

ны передающей станции), а затем с помощью антенны приемника производить обратное преобразование энергии электромагнитных волн в энергию электрических колебаний. Три возможных варианта построения каналов звукопередачи представлены на рис. 9.



Рис. 9. Каналы звукопередачи: М — микрофон, 1а — магнитофонный пульт, 1б — магнитофон; 2а — передатчик, 2б — приемник; 3а — граммофон, 3б — проигрыватель грампластинок; 4а — запись на компакт-диск, 4б — лазерный проигрыватель; 5 — усилитель низкой частоты, Гр — громкий динамик.

Промежуточные преобразования энергии одного вида в другой приходится осуществлять также при звукозаписи, но об этом будет рассказано в соответствующем разделе. Надо подчеркнуть, что приведенные схемы далеко не исчерпывают всего многообразия возможных каналов звукопередачи. Сюда можно было бы добавить канал, содержащий тиражную машину компакт-кассет, а также и многие другие, что предлагает современная звукотехника. Сейчас же уместно рассмотреть основные электрические характеристики канала, определяющие точность звукопередачи и, следовательно, натуральность (или, как часто говорят, "верность") воспроизведения звука.

ТЕМА 2.2. КАЧЕСТВЕННЫЕ ПАРАМЕТРЫ КАНАЛА ЗВУКОПЕРЕДАЧИ

2.2.1 Уровень передачи звукового сигнала

Важной характеристикой звукопередачи в какой-либо точке канала является величина электрического напряжения сигнала — от нее в итоге

зависит громкость звучания программы у слушателя. Но оценка уровня сигнала в единицах электрического напряжения (вольтах или его долях) осуществляется только при настройке аппаратуры, когда необходимо, например, установить нормальное усиление в трактах. В этом случае в качестве калибровочного передается чистый синусоидальный сигнал на средней частоте звукового диапазона (обычно это сигнал с частотой 1000 Гц), а измерения можно производить обычным вольтметром, который подключается параллельно электрической цепи.

Однако, в практике эксплуатационной работы уровень сигнала оценивают обычно в децибелах, и пользуются для измерений не вольтметром, а специальным прибором, так называемым измерителем уровня. Подробно об этом приборе будет рассказано ниже в соответствующем разделе.

В акустике по причинам, связанным с физиологическими особенностями восприятия энергии звуковых колебаний, соотношения акустических уровней оценивают в логарифмических единицах, то же самое следует делать и в электрических цепях, по которым передается электрический аналог (электрическое изображение) звукового сигнала. Единица для акустики и электрических цепей логарифмической шкалы обеспечивает единый метод измерений уровня передачи. Практика показала, что такой подход существенно облегчает измерения и текущий контроль уровня сигналов.

Итак, изменение электрических напряжений сигнала выражается в децибелах, т.е. в логарифмических единицах, вычисляемых по формуле

$$N_{дБ} = 20 \lg U_2 / U_1,$$

где U_2 и U_1 — сравниваемые напряжения.

Соответствующим в электрических мощностях в децибелах представляются несколько иной формулой

$$N_{дБ} = 10 \lg P_2 / P_1,$$

где P_2 и P_1 — сравниваемые мощности.

Мощности пропорциональны квадратам напряжений, поэтому изменение напряжения, например, в 10 раз, вызывает соответствующее ему изменение мощности в 100 раз. Именно поэтому, как уже подчеркивалось выше, в формулах для напряжений и мощностей коэффициенты (соответственно 20 и 10) отличаются в 2 раза. Это позволяет сохранить одинаковое определение децибел независимо от того, какой из электри-

ческих параметров сравнивался (напряжения или мощности) — результат вычислений будет в любом случае один и тот же. Действительно

$$N_{дБ} = 20 \lg U_2 / U_1 = 20 \lg 10 = 20 \cdot 1 = 20 \text{ дБ};$$

$$N_{дБ} = 10 \lg P_2 / P_1 = 10 \lg 100 = 10 \cdot 2 = 20 \text{ дБ}.$$

В случаях, когда уровень сигнала понижается, т.е. U_2 меньше U_1 , выраженные в децибелах соотношения приобретает отрицательный знак. Например, если выраженные в вольтах уровни $U_2 = 10$ В, а $U_1 = 1$ В, то $N = 20 \lg 0,1 = 20 \cdot (-1) = -20$ дБ.

Часто возникает необходимость оценить абсолютный уровень сигнала в определенной точке цепи. При этом под абсолютным уровнем понимают выраженные в децибелах отношение данного уровня к уровню, условно принятому за нулевой. В технике связи, радиосвязи и звукозаписи за нулевой уровень принимают напряжение равное 0,775 В. Реже, сравнивают уровни по мощности, принимая в этом случае за нулевой уровень 1 мВт. При вычислении абсолютного уровня сигнала по напряжению, к обозначению единицы измерения добавляется латинская буква *н* (дБн), а по мощности — латинская буква *м* (дБм). Результаты этих двух способов вычисления абсолютных уровней сигнала численно совпадают только при условии, если в данной точке электрической цепи сопротивление равно 600 Ом.

При проектировании аппаратуры радиосвязи и звукозаписи, а также для правильной их эксплуатации часто прибегают к графическому изображению изменений уровня передачи на протяжении интересующей нас части канала. Это делают с помощью диаграммы уровней, на которой в определенном масштабе складываются уровни передачи в разных точках канала, выраженные в децибелах (рис. 10).

Пример диаграммы уровней приведен для тракта, содержащего микрофон, микрофонный усилитель, регулятор уровня, и выходной усилитель. Чтобы построить ее, надо знать: напряжение, развиваемое микрофоном, коэффициенты передачи усилителей, а также следует задать величину записи по усилению на регуляторе уровня.

Все уровни на диаграмме отсчитываются по напряжению относительно нулевого, за который, как было сказано выше, принимается 0,775 В, уровни представлены в дБн. Чтобы избежать путаницы при определении уровней передачи с помощью измерителя уровня, подключаемого, как правило, либо к магнитофону, либо на выходе аппаратуры, надо помнить, что отметка на шкале прибора "0 дБ" (100%), может не соответствовать абсолютному значению уровня сигнала по напряжению

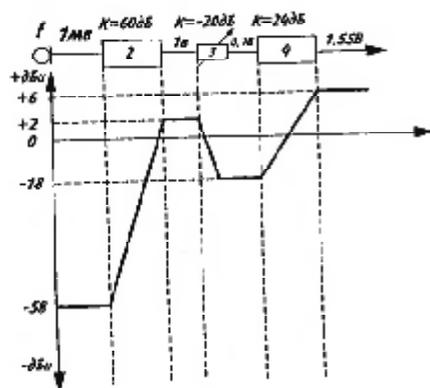


Рис. 10. Типичная диаграмма уровней.

— т.е. 0 дБн (0,775 В). Эта отметка лишь указывает точку *относительного* уровня, от которого звукорежиссер ведет отчет всех изменений уровня в процессе передачи и который является максимально допустимым в данной точке канала.

Например, номинальное значение абсолютного уровня, принятое в студиях радиовещания и звукозаписи у нас в стране нормируется и устанавливается равным -6 дБн, т.е. 1,55 В. Уровень выбран таким потому, что это соответствует оптимальным условиям записи звукового сигнала на магнитофон и передачи его в эфир. Поэтому чувствительность измерителя уровня в наших аппаратах, для удобства работы звукорежиссера, регулируется при настройке аппаратуры таким образом, чтобы нормированному номинальному значению максимального уровня в данной точке аппаратной -1,55 В соответствовало бы показание 0 дБ на шкале измерителя уровня.

А некоторые образцы зарубежной аппаратуры выпускаются в расчете на несколько меньшее значение номинального уровня -4 дБн, т.е. 1,25 В.

Такое несоответствие для практической работы звукорежиссера не имеет никакого значения: в процессе передачи, так как, поддерживая

максимальный уровень сигнала до 0 дБ (100%) по измерителю уровня, звукорежиссер, таким образом, не нарушит принятой для данного тракта диаграмму уровней.

2.2.2. Амплитудно-частотная характеристика

Любой сложный звук состоит из ряда различных по частоте колебаний, соотношения уровней которых для данного звучания являются совершенно определенными.

Естественно, что при звукопередаче первичные соотношения между частотными компонентами звука должны быть сохранены. В связи с этим, качество любого участка звукового канала оценивается его амплитудно-частотной (сокращенно частотной) характеристикой, для обозначения которой часто используют аббревиатуру АЧХ. Под АЧХ понимают график зависимости коэффициента передачи от частоты сигналов, подаваемых на вход данного участка канала или отдельного звукотехнического устройства. Коэффициент передачи — это отношение величин сигнала на выходе усилителя и его входа.

Поделим на вход какого-либо усилителя переменное напряжение звуковой частоты U , поддерживая неизменным его уровень, и будем менять частоту колебаний, контролируя уровень выходного напряжения. В идеальном случае усиленное выходное напряжение усилителя на всех частотах должно было бы быть одинаковым по величине. Графически частотная характеристика такого усилителя — прямая линия, параллельная оси частот, на рис. 11 — кривая "а".

В реальных условиях частотная характеристика во всем диапазоне звуковых частот (от 20 до 20000 Гц) прямой не бывает из-за наличия в схеме индуктивностей и емкостей, меняющих свое сопротивление переменному току при изменении его частоты.

Частотную характеристику можно построить, если по оси абсцисс отложить в логарифмическом масштабе частоты, а по оси ординат выразить в децибелах значения отношений коэффициентов передачи на соответствующих частотах к коэффициенту передачи на средней частоте, например, на частоте 1000 Гц. Частотная характеристика обычно имеет понижения как в области низких так и в области высоких частот звукового диапазона (кривая "б").

Это означает, что усиление бывает меньше на низких и высоких частотах по сравнению с усилением на средних. В таких случаях обычно говорят, что частотная характеристика в этих областях имеет завалы. Если

усиление на каких-то частотах больше, чем на средней, то говорят, что частотная характеристика на этом участке имеет подъем.

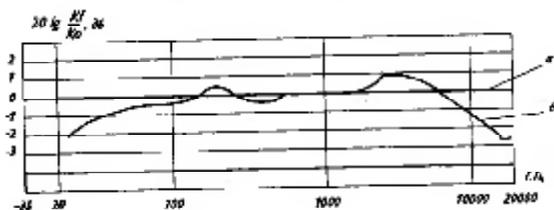


Рис. 11.
Частотные характеристики: а — идеальная, б — возможный пример реальной. Шкала оси частот — логарифмическая.

Рассмотрим теперь, как частотная характеристика влияет на качество воспроизведения.

Подъем и завал в области высших и низших звуковых частот — суть частотные искажения. Они субъективно воспринимаются обычно так: завалы высших частот (от 3—4 кГц и выше) придают звучанию тусклость, ухудшают разборчивость речи. Излишнее усиление (подъем) высших частот приводит к подчеркиванию шипящих и свистящих звуков и к несогласию резкому звучанию музыки, раздражающему слух.

Завалы низших частот (100—200 Гц и ниже) лишают звучание полноты, сонности, нарушают ясность тембра, а их чрезмерное усиление вызывает ощущение неприятного, бубнящего звучания.

Величина неравномерности частотной характеристики в диапазоне звуковых частот нормируется. При нормировании учитывается заметность искажений на слух. Для студийной части тракта звукового вещания (радио и телевидения) и для профессиональных студий звукозаписи неравномерность частотной характеристики в рабочем диапазоне частот (для оборудования высшего класса качества — от 30 до 15000 Гц) не должна превышать 1 дБ, т.е. коэффициенты передачи на разных частотах не должны отличаться друг от друга более чем на 12%.

При проектировании звукового тракта, состоящего из нескольких усилителей и отрезков длинных соединительных линий, применяют при-

нимать меры к тому, чтобы все участки имели частотную характеристику, близкую к прямолинейной. Если этого не удастся добиться прямым путем, обычно используется метод компенсации частотных искажений. Этот метод заключается в том, что последовательно с имеющим искаженную элементную включается специальный корректирующий элемент, частотная характеристика которого является, как бы зеркальным отображением частотной характеристики, которую требуется исправить. Например, если длинная линия, благодаря различию емкости между двумя ее проводами "заваливает" высокие частоты на 10 дБ, то последовательно с ней включается корректирующий элемент (контур), поднимающий высокие частоты на те же 10 дБ. Результирующая частотная характеристика в этом случае будет прямолинейной.

2.2.3. Нелинейные искажения

Нелинейные искажения представляют собой изменения формы колебаний, проходящих через электрическую цепь (например, через усилитель или трансформатор), вызванные нарушениями пропорциональности между мгновенными значениями напряжения на выходе этой цепи и на ее входе. Это происходит, когда характеристика выходного напряжения нелинейно зависит от входного или, иными словами, коэффициент передачи цепи меняет свою величину в зависимости от уровня сигнала, подаваемого на вход устройства. Рис. 12 поясняет это явление. Нелинейные искажения при малой их величине изменяют тембр звучания, затрудняют раздельное восприятие звуков инструментов и голоса. При более сильных нелинейных искажениях появляются неприятные хрипы и дребезжание.

Физическая сущность нелинейных искажений может быть наглядно объяснена при переходе к спектральному представлению сигнала, как совокупности частот. Например, при подаче "чистого" синусоидального тона на элемент схемы, имеющий нелинейную характеристику, на его выходе появляется отсутствие гармоник на входе, т.е. колебания с частотами, в целое число раз большими, чем частота основного колебания. Эти гармоники складываются с основным, "чистым" тоном, меняют его форму и придают звучанию новый тембр, как видно из рис. 13. Еще более неприятных следствием нелинейности являются появившиеся комбинационные частоты. Они возникают, когда на вход нелинейной системы подается не одно, а два или несколько синусоидальных колебаний. Тогда на выходе, кроме образующихся гармоник всех прохо-

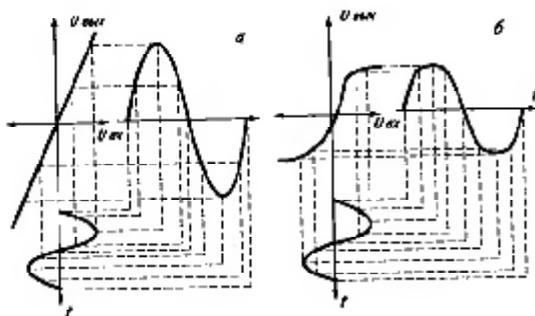


Рис. 12. Нелинейные искажения:
 а — сигнал прошел через линейную цепь;
 б — на выходе нелинейной цепи форма сигнала искажена.

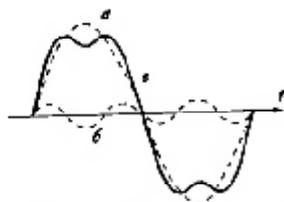


Рис. 13. Сложные колебания, полученные в результате нелинейного усиления:
 а — чистый синусоидальный тон (основное колебание или первая гармоника);
 б — продукт нелинейной цепи (третья гармоника); в — сложное колебание на выходе цепи (сумма основного колебания и третьей гармоник).

данных колебаний, появляются, в результате, так называемых «биений», комбинационные частоты, равные суммам и разностям двух близких друг к другу частот. Например, если на вход устройства, имеющего нелинейную характеристику передачи, поданы колебания двух частот: $f_1 = 1000$ Гц и $f_2 = 1100$ Гц, то на его выходе можно обнаружить дополнительно:

— высшие гармоники частот f_1 и f_2 , т.е. $2f_1 = 2000$ Гц и $3f_1 = 3000$ Гц и т.д., а кроме того, $2f_2 = 2200$ Гц, $3f_2 = 3300$ Гц и т.д.;

— простые комбинационные частоты, равные $f_1 + f_2 = 2100$ Гц и $f_1 - f_2 = 100$ Гц, а также сложные комбинационные частоты, возникающие в результате биения гармоник с основными частотами и друг с другом: $2f_1 + f_2 = 2000 + 1100 = 3100$ Гц; $2f_2 - f_1 = 2000 - 1100 = 900$ Гц и т.д.

Итак, при подаче ряда колебаний на вход усилителя, имеющего нелинейную характеристику, на его выходе, вследствие нелинейных искажений, появится много паразитных колебаний — гармоник и комбинационных тонов. Эти колебания, заполняя весь спектр слышимых частот, могут заметно исказить, или полностью нарушить звуковую картину. При этом, с точки зрения субъективного восприятия нелинейных искажений, наиболее отрицательную роль играют комбинационные частоты (особенно разностные).

В реальных условиях при передаче музыки или человеческого голоса на вход усилителя подаются колебания (сложного частотного состава) уже содержащие гармоники. Поэтому появление новых гармоник как результата нелинейности системы, хоть и известной мере и изменяет тембр звучания, но не воспринимается столь неприятно, как появление комбинационных тонов, ранее в сигнале отсутствовавших и впервые появившихся в процессе передачи. Именно они воспринимаются слушателем в виде заметных искажений.

Нелинейные искажения оцениваются величиной коэффициента нелинейных искажений. По старой терминологии его называли «коэффициентом», что в переводе с немецкого означает «фактор дробежания». Однако, этот термин неточно характеризует суть искажений, поэтому им в настоящее время обычно не пользуются.

Нелинейные искажения — явление, в общем, сложное и не однозначное, его числовое описание затруднено и даже иногда не возможно. На практике коэффициент нелинейных искажений определяют по отношению к какому-либо чистому тону. В этом случае коэффициентом нелинейных искажений цепи или устройства называют выраженное в процентах отношение суммарного напряжения всех высших гармоник (или комбинационных частот) на его выходе к напряжению основного колебания. В первом случае это отношение называют коэффициентом гармоник, а во втором — коэффициентом комбинационных частот. Наиболее употребительным способом измерения нелинейных искажений является определение коэффициента гармоник с помощью схемы рис. 14.

Для этого на вход исследуемого устройства (например, усилителя) подается от звукового генератора синусоидальное напряжение с опреде-



Рис. 4. Определение коэффициента гармоник.

ленной частотой f и измеряют величину его напряжения на выходе усилителя $U_{\text{вх}}$. Затем включают на выходе усилителя специальный фильтр, который подает основное колебание, но хорошо пропускает все колебания с более высокими частотами. Вольтметр, подключенный на выход фильтра, регистрирует напряжение, создаваемое гармониками, в том числе появившимися из-за нелинейности усилителя. Отношение напряжения этих гармоник к напряжению основного сигнала и есть мера нелинейных искажений. Строго говоря, первоначально измеренное выходное напряжение не точно соответствует напряжению основного сигнала в чистом виде, так как оно содержит и напряжение гармоник. Но их величина, во всех встречающихся на практике случаях, столь мала по сравнению с основным колебанием, что мы можем этой разницей пренебречь и с достаточной точностью вычислять коэффициент нелинейных искажений по формуле: $K_f\% = U_f/U_{\text{вх}} \cdot 100\%$.

Так как при одной передаваемой частоте комбинационные тона отсутствуют и поэтому не учитываются, этот коэффициент не точно соответствует полному коэффициенту нелинейных искажений. Но для практических целей, зная его величину, можно достаточно определенно судить о степени нелинейности усилителя.

Нелинейные искажения на слух практически мало заметны, если коэффициент гармоник не превышает 2–3%.

Нелинейные искажения могут возникнуть при неисправностях усилителей (нарушениях нормальных режимов работы его усилительных элементов), а также при перегрузках, когда на вход устройства подаются напряжения, превышающие расчетные. В этих случаях основной причиной возникновения нелинейных искажений в усилителях является работа на криволинейных участках характеристик электронных ламп или транзисторов, а в трансформаторах — нелинейная зависимость магнитной

индукции в сердечнике трансформатора от тока в его первичной обмотке. Часто источником нелинейных искажений может служить магнитофонная лента.

2.2.4. Помехи в тракте звукопередачи

Одна из наиболее серьезных причин, мешающих высококачественному воспроизведению передаваемой программы, — помехи, возникающие в тракте звукопередачи. Особенно неприятны на слух помехи в паузах, а также на тихих местах исполнения, когда они не маскируются полезным сигналом и потому существенно мешают восприятию звука.

Помехи по своему характеру и происхождению разделяются на фон, шум, импульсные помехи (трески, щелчки) и различного характера внешние наводки.

Фон проявляется обычно в виде прослушиваемого низкого одночастотного гудения с частотой 50 или 100 Гц. Причина фона может быть двоякой: чаще всего это плохая фильтрация переменной составляющей напряжения, выпрямленного в источнике питания и используемого для питания транзисторов или электронных ламп усилителей. Но могут проявиться и шумы наводки, появляющиеся за счет электромагнитной связи цепей передачи звука с посторонними источниками электрических и магнитных полей (например, трансформаторов, силовых электрических кабелей, театральных осветов и т.д.) Таким же путем, т.е. путем электромагнитных наводок на токоведущие цепи канала передачи звукового сигнала, могут проникнуть в канал и, так называемые, «звонкие» помехи, например, песторошие программы, близко расположенных мощных радиостанций и т.д. Для борьбы с наводками любого характера следует тщательно заземлять, применяя экранировку, те цепи, по которым протекают слабые токи (например, микрофонные провода).

Принцип действия экранов следующий. Провод, по которому передаются токи звуковой частоты, заключают в гибкую и достаточно густую металлическую сетку (чулок), обязательно заземленную. Электрические заряды, образующиеся на экране из-за влияния внешних полей, стекают на землю, не наводя помех на токоведущие части схемы.

Экранами снабжаются также все используемые в схемах трансформаторы и катушки индуктивности — потенциальные источники сильных помех. Эти экраны, выполненные в виде кожухов из железа, германия или других подобных магнитных материалов, выполняют

двойную роль: предохраняют трансформатор от воздействия внешних магнитных полей и, кроме того, не дают возможности полю рассеяния самого трансформатора оказывать нежелательное влияние на соседние детали схемы.

Еще более неприятен на слух и трудно устраним собственный шум транзисторов, электронных ламп и резисторов, входящих в схему. Это характерное шипение, с физической точки зрения — тот же звук с непрерывным спектром, его энергия распределена на широком участке диапазона звуковых частот. На практике часто встречаются шумы, отличающиеся один от другого не только по интенсивности, но и по тембру и ритму. Но самым характерным и типичным шумом является шум, не имеющий ни определенного тона, ни ритма, у которого, следовательно, ни одна частотная полоса не отличается от другой по энергии и ни один отрезок, выделенный во времени, не отличается от другого по частотному составу. Такой шум называют "белым" по аналогии с приятным в оптике наименованием белого цвета, который можно, как известно, получить, смешивая в одинаковых пропорциях все цвета солнечного спектра.

Избавиться от такого шума при звукопередаче — задача не из легких. Единственная наиболее радикальная мера — специальный подбор малошумящих транзисторов и резисторов, а также подача на вход первых каскадов усилителей как можно большего по уровню полезного сигнала, чтобы он во много раз превосходил шумы первых ступеней усиления и сделал бы их менее заметными на слух.

Поэтому, например, в микрофонных усилителях, усиливающих весьма малые (порядка единицы милливольт) напряжения, на входе усилителя обычно устанавливается микрофонный трансформатор, в несколько раз увеличивающий напряжение сигнала, поступающего от микрофона. Однако не всегда указанные меры дают удовлетворительный результат.

В качестве числовой оценки шумовых характеристик усилителя (или всего тракта передачи) используют отношение сигнал/помеха. Это отношение показывает, насколько номинальный (т.е. расчетный, нормальный для данного усилителя) уровень выходного полезного сигнала превышает уровень напряжения помехи на выходе испытуемого устройства. Отношение сигнал/помеха выражается в децибелах. Таким образом, отношение сигнал/помеха определяется формулой

$$D = 20 \lg U_s / U_{шв}$$

Часто, когда основной помехой воспроизведению являются только шумы усилителей или магнитной ленты (кстати, наиболее неблагоприятным с этой точки зрения участок тракта) оценить качество воспроизведения в усилителе можно по отношению сигнал/шум. В этом случае отношение сигнал/шум можно рассматривать как характеристику соответствующего участка цепи или канала в целом. Тогда говорят, что, например, шум тракта — минус 60 дБ; это значит, что собственные шумы канала передачи на 60 дБ меньше по уровню, чем номинальное выходное напряжение полезного сигнала (т.е. в 1000 раз).

Но общий уровень шума усилителей зависит в основном от уровня шума первых его ступеней усиления, где проходящий полезный сигнал особенно мал и сопоставим с напряжением шума. Обычно регулятор уровня сигнала в усилителе включается после первых ступеней усиления, которые, в основном, и определяют общий уровень шума всего усилителя. В итоге отношение сигнал/шум на выходе зависит от уровня сигнала, подаваемого на вход, и, следовательно, от установки регулятора, обеспечивающей на выходе номинальный уровень сигнала.

Естественно, с ростом уровня входного сигнала уровень усиления снижают, следовательно, и шумы первых транзисторов (ламп) усиливаются меньше. Наоборот, при понижении уровня входного сигнала регулятор уровня приходится открывать, шумы первых усилительных каскадов усиливаются значительно, их абсолютная величина на выходе канала становится больше и шум слышится сильнее. Таким образом, чтобы сравнить два усилителя, мало знать величину их отношения сигнала к шуму, надо также иметь сведения о том, при каком усилении (а это зависит от уровня входного сигнала) производились измерения.

Поэтому, например, при сравнении качества микрофонов по их собственным шумам, часто пользуются методом оценки шумов, приведенных к входу микрофонного усилителя. Метод приведенного шума замечателен тем, что при его применении оценка качества усилителя по шумам не зависит от уровня сигнала на входе и, следовательно, от установки регулятора усиления. Этот метод опирается на допущение, что весь шум усилителя возникает на его входе и далее усиливается в той же мере, что и поданный на вход усилителя полезный сигнал. Значит, отношение сигнал/шум на выходе усилителя и на его входе одно и то же.

И тогда для того, чтобы определить абсолютный уровень шума на входе усилителя (приведенный к входу шум), достаточно знать, от какого входного уровня производились измерения, и, затем, к величине это-

го уровня, выраженный в децибелах относительно нуля (0,775 В), прибавить выраженное также в децибелах отношение сигнал/шум, измеренное на выходе усилителя. Результат сложения и будет величиной шума, приведенного к входу усилителя.

К примеру, на вход усилителя подано напряжение $U = 250$ мкВ (этот уровень лежит ниже нулевого на 70 дБ, т.е. равен -70 дБн), а на выходе усилителя отношение сигнал/шум равно 60 дБ. На входе это соотношение сохраняется, поэтому приведенный ко входу шум будет по уровню лежать ниже входного полезного сигнала еще на 60 дБ, т.е. будет равен $-70 + (-60) = -130$ дБн.

Это поясняется рисунком 15.

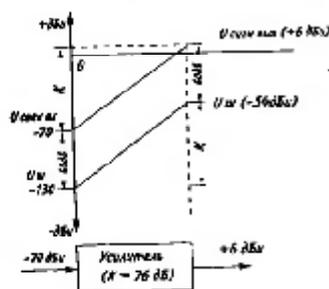


Рис. 15. Приведение шумов к входу усилителя на примере диаграммы уровней сигнала и шума для микрофонного усилителя.

Такое представление шума не зависит от режима усиления. Действительно, повысим входной уровень сигнала, например, на 20 дБ. Теперь уровень входного сигнала будет по -70, а -50 дБн. Чтобы сохранить уровень выходного сигнала следует снизить коэффициент передачи усилителя на 20 дБ. При этом на те же 20 дБ повысится отношение сигнал/шум, поэтому на выходе усилителя вместо 60 дБ по отношению сигнал/шум получим 80 дБ. Итак, приведенный к входу уровень шума, в этом случае будет равен $-50 + (-80) = -130$ дБн, т.е. сохранит свое значение и будет ниже нулевого уровня на те же 130 дБ.

И еще одно замечание относительно оценки шумов радиоаппаратуры. Шумы, как мы уже упоминали, содержат энергию звуковых колебаний множества частот. В то же время чувствительность человеческого уха различна на разных частотах звукового диапазона, поэтому при одинаковых уровнях шума в зависимости от участка спектра, на котором сосредоточена их основная энергия, восприниматься будут по-разному. Очевидно, если основные частотные составляющие шума лежат в интервале 2–4 кГц, а это область наибольшей чувствительности слуха, то шум заметен больше, чем такой же величины шум, но с преобладанием в нем более высоких или более низких частот. Чтобы учесть этот эффект и получить измерения, более соответствующие субъективному восприятию шумов слушателем, пользуются измерителем шумов, снабженным специальным фильтром, так называемым, фильтром уха. Этот прибор имеет характеристику чувствительности, подобную характеристике чувствительности человеческого слуха. Поэтому он лучше реагирует на те частоты, которые лучше слышит ухо. Такой способ измерения называют психометрическим, а прибор для его осуществления — психомером.

2.2.5. Динамический диапазон передачи

Динамический диапазон передачи называют выражение в децибелах отношение максимально допустимого в передаче уровня сигнала к минимально допустимому. Максимальный уровень (при фортецимо) ограничивается величиной нормированных нелинейных искажений, минимальный (при пианиссимо) — должен по крайней мере в 2–3 раза (т.е. на 6–8 дБ) превышать уровня шума тракта, что позволяет избежать маскировки шумом полезного сигнала на тихих местах.

Нале отметить, что современная аппаратура способна обеспечить достаточно широкий динамический диапазон. Однако, в радиовещании приходится считаться с условиями, в которых находится слушатель. Шумы жилой комнаты в тихое время суток превышают порог слышимости примерно на 30 дБ. Если пытаться передать полностью натуральный динамический диапазон оркестра, равный 70–80 дБ, то уровень сигнала на пианиссимо следовало бы установить не ниже, чем 40 дБ (чтобы не мешали шумы помещения). Фортиссимо, при этом, по громкости должно соответствовать 110–120 дБ. Такой уровень неприемлем, хотя бы из-за существующей звукоизоляции между квартирами, но, что еще существеннее, и сам слушатель не выдержит бы столь ослепляющей громкости, близкой к пределу возможностей человеческого слуха.

Поэтому динамический диапазон передачи в системах радиовещания и звукового сопровождения телевидения не должен превышать 40 дБ. Этот диапазон существенно меньше натурального динамического диапазона при “живом” исполнении. Таким образом, в радиовещании, телевидении и звукозаписи приходится прибегать к искусственному сжатию динамического диапазона, которое осуществляется либо вручную, либо автоматически. Об этом разговор в следующем разделе программы.

Дополнительная литература

Учебник для ВУЗов. Под редакцией М.В. Гитлица. Глава 13 (13.2). М., “Радио и связь”, 1989 г.