

**Б. Я. Меерзон**

**Акустические  
основы  
звукорежиссуры**

## Введение

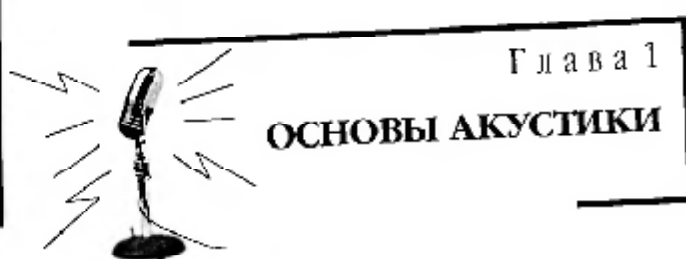
Вряд ли есть необходимость говорить о той роли, которую играет в наш век запись и передача звуковой информации. Буквально во всех областях социальной и общественной жизни человека, в науке и культуре применяется звукотехническая аппаратура, весьма разнообразная как по сложности, так и по своим возможностям. Это может быть обычный телефон, или канал звукового художественного вещания, или самый сложный многоканальный звуковой комплекс современного кинотеатра. Однако если в первом случае главное требование — просто хорошая слышимость, без помех, сохранение разборчивости речи, то технические параметры сложной аппаратуры оцениваются по качеству звучания, естественности звука. Отметим, что при непосредственном восприятии звука (например, музыки или спектакля), цепочка передачи звуковой информации состоит только из двух звеньев: исполнитель — слушатель, а при прослушивании художественных программ через электроакустический тракт в нее как важнейшее связующее звено входит звукорежиссер.

Профессия звукорежиссера синтетическая. Специалисту этого профиля необходимо обладать не только общей культурой, но и знаниями из различных областей искусства и науки. Он должен не только быть знаком с историей и теорией музыки, иметь хороший аналитический слух, обладать отменным чувством ритма и стиля музыкального произведения, но и знать физические свойства звука, понимать закономерности его восприятия человеком.

Необходимо также изучить принципы устройства и функционирования звукотехнического оборудования, возможности и системные ограничения электроакустической передачи, учитывать неизбежные отличия качества звучания от натурального, даже при наличии самой совершенной студийной аппаратуры. Технологическому аспекту профессии звукорежиссера и посвящена предлагаемая книга.

На звукорежиссера возлагается очень непростая задача. С помощью современных технических средств необходимо передать слу-

шателем не только искусство исполнителя, но и ощущение окружающей обстановки (акустику зала или атмосферу сценического действия). При этом наряду с возможностями аппаратуры и психофизиологическими особенностями человеческого слуха следует также учитывать специфику восприятия звука через динамик, помнить об отличиях такого прослушивания от натурального. Звукорежиссеру приходится соответствующим образом обрабатывать звуковую информацию.



## Глава 1

# ОСНОВЫ АКУСТИКИ

Эта глава посвящена физической природе звука и психоакустическим взаимосвязям объективных свойств звуковых колебаний и субъективных слуховых ощущений, возникающих у слушателя под их воздействием.

## § 1. Физическая природа звука

Как известно, звук — это волны, возникающие 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 с определенной скоростью ( $v$ ) колебаться окружающие его частицы воздуха. Плотность воздушной среды при этом то увеличивается, то уменьшается в соответствии с колебаниями источника звука. В простейшем случае это так называемый *чистый тон* (звук камертона), когда 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 к чистому тону в какой-то степени приближается только флейта. Звуки, которые мы обычно слышим — речь, музыка или шумы окружающей среды, — представляют собой сложные по форме колебания, состоящие из комбинаций нескольких или даже многих тонов. 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 чистый тон. Его можно описать графиком изменения во времени давления воздуха в определенной точке поля под воздействием источника звука. Причем опускаемая на слух разность между полным давлением воздуха и средним, которое возникает в среде при отсутствии звука (например, нормальным атмосферным давлением), называется **звуковым давлением**. Принято считать, что в фазе сжатия среды звуковое давление положительное, а в фазе разрежения — отрицательное (рис. 1).

В соответствии с международной системой единиц СИ единицей звукового давления служит **Паскаль (Па)**, определяемый как давление, создаваемое силой в 1 Н, действующей на 1 м<sup>2</sup> площади. Паскаль связан с другой, ранее применявшейся единицей звукового давления — баром следующим простым соотношением: 1 Па = 10 бар.

Распространяясь в воздушном пространстве во все стороны со скоростью примерно 340–343 м/с, звуковые колебания образуют **звуковую волну**. Эта волна воздействует на барабанную перепонку уха, создавая слуховое ощущение. Область пространства, в которой наблюдаются звуковые волны, называется **звуковым полем**.

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

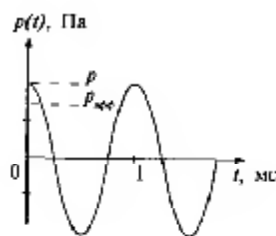


Рис. 1. Звуковое давление как функция времени. Зависимость от координат точки наблюдения скрыта в начальной фазе колебания

В акустике существует понятие **длины волны** звукового колебания. Эта величина определяется отрезком на предполагаемой оси, расположенной в направлении распространения звука, на котором умещается полный цикл изменений звукового давления. Иначе говоря, **длина волны — это наименьшее расстояние между точками звукового поля с одинаковыми фазами колебания** (рис. 2).

График этот похож на график, приведенный на рис. 1. Но в первом случае отображен закон изменения звукового давления во времени в одной определенной точ-

ке пространства, а во втором — распределение мгновенных значений давления от точки к точке пространства, наблюдающееся при распространении волны в какой-то один фиксируемый 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 ( $T=1/f$ ), длина волны для данного колебания однозначно определяется частотой звукового сигнала и вычисляется по формуле  $\lambda = c/f$ , где  $\lambda$  — длина волны (м);  $c = 340$  м/с — скорость распространения звука в воздухе;  $f$  — частота звуковых колебаний в герцах (Гц).

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

Понятие о длине звуковой волны поможет впоследствии объяснить закономерности явлений интерференции и дифракции звуковых волн, возникающих в студии и замство влияющих на качество звукопередачи в целом.

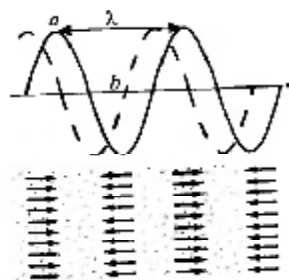


Рис. 2. Продольные звуковые волны

## § 2. Звуковой диапазон частот

Область акустических колебаний, способных создавать ощущение звука при воздействии на орган слуха, ограничена по частоте. Для большинства людей 18–25 лет, обладающих нормальным слухом, полоса частот колебаний, воспринимаемых в виде звука, находится в пределах между колебаниями с частотой 20 Гц (нижняя граничная частота) и 20 000 Гц (высшая граничная частота). Эту полосу частот принято называть **звуковым диапазоном**, а частоты, лежащие в его пределах, — **звуковыми частотами**.

Колебания с частотами менее 20 Гц называются **инфразвуковыми**, а колебания с частотами более 20 000 Гц — **ультразвуковыми**. Эти частоты наш слух не воспринимает, однако известно, что «инфразвук» оказывает определенное влияние на эмоциональное состояние слушателя. К сожалению, инфразвуковые частоты, ко-



торы, как показали современные исследования, присутствуют в составе акустических колебаний музыки и речи, воспроизвести с аналоговых магнитофонных лент по техническим причинам невозможно. Это не единственное и, пожалуй, не самое главное, но все же препятствие, не позволяющее достичь при прослушивании музыки через электроакустическую 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, напоминающие, например, комариный писк. Не все люди и не всегда хорошо слышат все частоты звукового диапазона. С возрастом верхняя граница слышимых частот значительно понижается. Звуковой диапазон частот определяет предельные возможности слуха человека (их выявили благодаря многочисленным исследованиям, усреднив результаты многих опытов, проведенных со слушателями различных возрастов и с разной тренировкой).

Как же человек оценивает повышение или понижение высоты тона при изменении частоты звукового колебания? В разгортном языке под высотой тона понимают его расположение на некоторой шкале. В физической акустике и музыке для определения высоты 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 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. Европейская музыка основывается на октавной периодичности: два тона, частоты которых соотносятся как 1:2, воспринимаются слухом как родственные, имеющие тенденцию сливаться при одновременном звучании.

В нашем примере нота  $C_0$  (до малой октавы с частотой 131 Гц) на октаву выше ноты  $C_1$  (65,5 Гц — до большой октавы), и нота  $C_1$  (262 Гц — до первой октавы) выше ноты  $C_0$  также на октаву. Для музыканта, таким образом, высота тона и в первом и во втором случаях возрастает на один интервал — одну октаву.

Изменение частоты звуковых колебаний в определенном соотношении всегда 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 темперированный полутон. Кстати, в каждой октаве содержится 12 полутонов. Развитый музыкальный слух четко различает эти интервалы при любой высоте тона.

### § 3. Динамический диапазон слуха

Чистые тоны субъективно воспринимаются громкими или тихими в зависимости от силы (интенсивности) звука. **Сила звука** (обозначаемая обычно символом  $I$ ) определяется потоком той звуковой энергии, которая при распространении в пространстве проходит ежесекундно через каждый квадратный метр плоскости, перпендикулярной к направлению распространения волны. Единица измерения силы звука — Вт/м<sup>2</sup>. Она связана со звуковым давлением квадратичной зависимостью. Это значит, что изменение силы звука пропорционально соответствующему изменению величины звукового давления, возведенному в квадрат ( $I$  пропорционально  $p^2$ ). Объясняется это тем, что увеличение звукового давления обязательно сопровождается пропорциональным увеличением колебательной скорости ( $v$ ) частиц воздуха. А сила звука зависит одновременно от этих обеих величин, т.е.  $I \sim pv$ . Следовательно, прирост звукового давления в 2 раза влечет за собой увеличение силы звука в 4 раза; соответственно при росте звукового давления в 3 раза сила звука возрастает в 9 раз, и т.д.

Человеческий слух улавливает не все звуки. Человек начинает слышать при силе звука, превышающей или равной некоторой величине, называемой **порогом слышимости** (или слуховым порогом). Более слабые звуки слухового ощущения не вызывают. С увеличением силы звука достигается нормальная слышимость, а затем при еще больших амплитудах звуковых колебаний к воспринимаемому звуку добавляется осязаемое ощущение давления, а дальнейший рост силы звука вызывает болезненное раздражение органа слуха. Так называемый **болевой порог** ограничивает область слышимости при высоких уровнях интенсивности. Чувствительность человеческого уха зависит от частоты приходящего сигнала, поэтому уровень порога слышимости для разных частот различный.

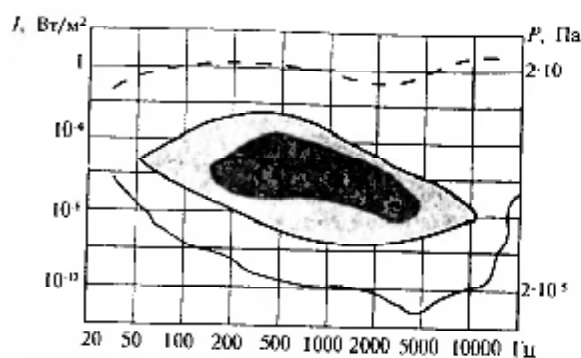


Рис. 3. Области слышимости: сплошная линия — порог слышимости; штриховая — болевой порог; светло-серым цветом обозначена область музыкальных звуков; темно-серым — речевых

На рис. 3 приведены значения силы звука и звукового давления, при которых звуковые сигналы с различными частотами становятся едва слышимыми. 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 составляет около  $10^{-12}$  Вт/м², что соответствует звуковому давлению  $2 \cdot 10^{-5}$  Па.

При смещении из области оптимальной слышимости в сторону низших и высших звуковых частот чувствительность человеческого уха резко падает. Это видно по подъему кривой порога слышимости вблизи краев слышимого диапазона. А вот болевой порог от частоты зависит слабо. Звуковое давление, вызывающее у человека болевое ощущение, равно приблизительно 20 Па. На средних частотах звуковое давление, соответствующее болевому порогу, превышает порог слышимости примерно в млн ( $10^6$ ) раз. А поскольку поток энергии звуковой волны связан с величиной звукового давления квадратичной зависимостью, по силе звука болевой порог отличается от порога слышимости в  $10^{12}$  раз. Обе цифры и определяют динамический диапазон слуха. Но поскольку динамический диапазон, вычисленный по соотношению сил звука на болевом пороге и на пороге слышимости, в числовом значении отличается от того же диапазона, вычисленного путем сравнения соответствующих звуковых давлений, удобнее применять специальные единицы его измерения, не зависящие от способа вычисления. О них будет сказано далее.

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 (12%), что соответствует изменению силы звука в 1,25 раза (25%). Итак, наряду со способностью различать звуки, уровни которых различаются в сотни и тысячи миллионов раз, человеческое ухо хорошо реагирует и на очень малые изменения уровня звука. Это объясняется логарифмическим законом восприятия. Наши ощущения изменений громкости пропорциональны не изменению силы звука, а логарифму этих величин:

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

где  $L$  — кажущаяся изменение громкости;  $I_1, I_2$  — сила звука соответственно до и после его изменения;  $C$  — коэффициент пропорциональности.

Например, если сила звука изменится в 10 раз, то субъективное ощущение громкости — всего лишь на одну ступеньку, при 100-кратном увеличении силы звука — на две (так как  $\lg 100 = 2$ ); если это изменение составляет 1000, громкость возрастет в 3 раза (так как  $\lg 1000 = 3$ ), и т.д. Поэтому увеличение или уменьшение силы звука принято измерять в специальных логарифмических единицах. Причем каждое десятикратное изменение силы звука (звуковой энергии) оценивается единицей, называемой Бел (Б). Другими словами, различие величин звуковой энергии (силы звука) в Белах вычисляется по формуле  $N_{\text{Бел}} = \lg I_2/I_1$ .

К примеру, если  $I_2 = 10 I_1$ , то  $\lg I_2/I_1 = \lg 10 = 1$ , т.е.  $N = 1$  Б; при  $I_2 = 100 I_1$  имеем:  $\lg 100 = 2$  и  $N = 2$  Б.

Более мелкие изменения звуковых уровней измеряют в долях Бела. На практике используется в основном 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.  $N_{\text{дБ}} = 10 \cdot \lg I_2/I_1$ .

Таблица 1

Измеряемая величина	Отношение по силе звука	Отношение по звуковому давлению	Отношение, дБ
Минимальный порог слышимости	1,25 : 1	1,12 : 1	1
Динамический диапазон слуха	$10^{10}$	$10^6$	120
Натуральный динамический диапазон симфонического оркестра	$10^6$	$10^4$	80

Обратимся к примерам.

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

Пусть теперь  $N = I_2/I_1 = 1/100$  ( $I_2 < I_1$  — ослабление), тогда  $N_{\text{дБ}} = 10 \lg 0,01 = 10 \cdot (-2) = -20$  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 слышимый диапазон звуковых колебаний изобразить графически. Действительно, разместить на чертеже в линейном масштабе изменения уровня в сотни миллионов раз невозможно, а в логарифмическом масштабе (в дБ) это не очень сложно. Кроме этого, независимо от того, берем мы при вычислении в качестве исходных данных силу звука (т.е. звуковую энергию) или звуковое давление, сравнение уровней в децибелах 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 отношение сравниваемых давлений следует возвести в квадрат и уже потом прологарифмировать. А это 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:

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

Мы видим, что при вычислении изменения уровня в децибелах по соотношению звуковых давлений (по сравнению с коэффициентом в формуле для подобных вычислений исходя из соотношения сил звука) удваивается и становится равным 20. Вновь обратимся к примерам.

Пусть  $p_2/p_1 = 1000$  или соответственно  $I_2/I_1 = 1\,000\,000$ , тогда по силе звука  $N_{\text{дБ}} = 10 \lg (I_2/I_1) = 10 \lg 1\,000\,000 = 10 \cdot 6 = 60$  дБ; а по звуковому давлению  $N_{\text{дБ}} = 20 \lg (p_2/p_1) = 20 \lg 1000 = 20 \cdot 3 = 60$  дБ.

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

Пользуясь децибелами для оценки различия в уровнях, мы можем теперь указать меру некоторых из упомянутых ранее величин (табл. 1).

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 будет равен:  $L = 20 \lg (p/p_0) = 20 \lg (4/2) \cdot 10^5 = 20 \lg 2 \cdot 10^5 = 20 \cdot (\lg 2 + \lg 10^5) = 20 \cdot 0,3 + 20 \cdot 5 = 6 + 100 = 106$  дБ. Заметим, что, если звук находится на пороге слышимости, его уровень равен 0 дБ (так как  $20 \lg 1 = 20 \cdot 0 = 0$ ).

Теперь о том, что подразумевается под понятием *громкость*. Громкостью называют субъективное ощущение звука, возникающее у слушателя под воздействием звуковых колебаний. Громкость не может быть определена только величиной силы звука, так как она зависит и от частотного состава звукового сигнала, от условий его восприятия и длительности воздействия. В акустике для количественной оценки громкости используют 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, равногромного с данным звуком. Уровень громкости выражается в фонах. Единицы измерения уровня громкости (фоны) численно совпадают с уровнем звука, выраженным в децибелах, на частоте эталонного тона 1000 Гц. Как уже было сказано, чувствительность слуха зави-

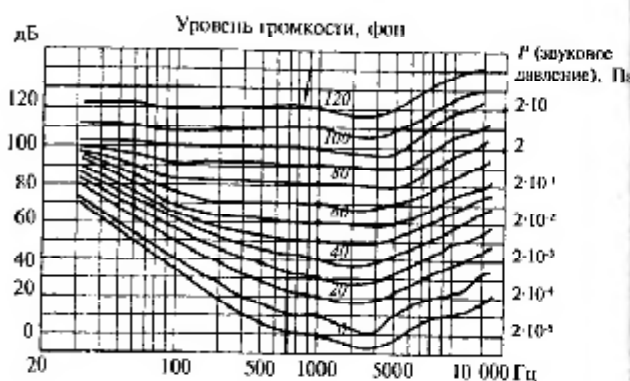


Рис. 4. Кривые равной громкости

сит 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 различных частотах соответствовали бы одному и тому же уровню громкости (рис. 4).

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

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

Кривые равной громкости как бы выпрямляются с ростом общей громкости прослушивания. Другими словами, частотная зависимость слуха в большей степени сказывается при тихом прослушивании, чем при громком. Это важно учитывать, если, например, музыка при записи контролировалась на высоких уровнях громкости, а прослушиваться будет 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 сочности, естественности. Весьма желательно поэтому, чтобы в студиях звукозаписи громкоговорители работали с одинаковым уровнем громкости: это уменьшит возможность ошибок при субъективной оценке качества звучания.

Уровень громкости измеряется и настраивается в студиях при помощи специального электроакустического прибора — *шумомера*, так как описанный метод субъективного сравнения измеряемого звука с эталонным тоном довольно трудоемок, не всегда точен и имеет в основном лишь теоретическое значение. При использовании шумомера измеряемый звук преобразуется микрофоном в электрические колебания. Затем, после усиления специальным усилителем, эти колебания измеряются прибором, отраженным в единицах измерения уровня громкости. Причем, чтобы показания прибора как можно более точно соответствовали субъективному восприятию громкости, прибор снабжен особыми фильтрами, изменяющими его чувствительность к восприятию звука разных частот в соответствии с характеристикой чувствительности человеческого слуха. Приводим примерные уровни громкости некоторых типичных звуковых источников (табл. 2).

При записи музыкальных произведений, предназначенных для длительного хранения на радио и телевидении или для производства компакт-дисков, чтобы легче заметить мелкие дефекты звуча-

Таблица 2

Источник звука	Уровень громкости, фон
Авиамотор на расстоянии 5 м	120
Фортиссимо оркестра	95–100
Шум движущегося поезда метро	90
Громкая радиомызыка, мешко-форте музыкального исполнения, шум на улице с движущимся транспортом	70–80
Аплодисменты	60–70
Пианиссимо музыкального исполнения, разговорная речь в жилой комнате	40–50
Тиканье часов на расстоянии 0,5 м	30
Шепот на расстоянии 1 м	20

ния в процессе записи или монтажа, звукорежиссеры предпочитают устанавливать уровень громкости прослушивания с контрольными громкоговорителями в пределах 90–96 фон при исполнении большими коллективами оперной и симфонической музыки, а при исполнении камерных произведений — до 80–85 фон.

Уже упоминалось, что громкость зависит от условий, в которых звук воспринимается слушателем. Здесь в первую очередь следует учитывать эффект **звуковой маскировки**. Напомним, что в реальных условиях акустический сигнал не существует в условиях абсолютной тишины — вместе с ним на слух воздействуют те или иные посторонние шумы, затрудняющие слуховое восприятие и как говорят в таких случаях, маскирующие в определенной степени основной сигнал. Эффект маскировки чистого синусоидального тона посторонним шумом описывается обычно величиной, указывающей, на сколько 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 важны не только уровень громкости, но и сохранение разборчивости речи или отчетливости музыкальной темы на фоне постороннего шума и прочих звуков. Так, при передаче оркестрового произведения из-за маскировки аккомпанисментом партия солиста может стать плохо разборчивой, невнятной.

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, эффект взаимной маскировки будет наиболее сильным.

Достичь требуемой четкости, или, как принято говорить, «прозрачности» звучания, при звукопередаче оркестров или эстрадных ансамблей весьма трудно, если инструменты или отдельные группы инструментов оркестра одновременно играют в одном или близких регистрах. Чтобы добиться ясности основных черт произведения, главных мелодических линий и отдельных музыкальных партий, звукорежиссер располагает микрофоны близко к исполнителям, умышленно выделяет наиболее важные в данном месте произведения инструменты или использует другие специальные приемы.

## § 4. Реальный звук.

### Спектры звуковых колебаний и тембр

Как указывалось, натуральные звуки, с которыми мы сталкиваемся в жизни, практически никогда не бывают чистыми синусоидальными тонами, а являются **созвучиями**. Это означает, что источник вместе с основным колебанием излучает волны с частотами в 2, 3, 4, 5 раз и т.д. большими основной частоты. По принятой в музыкальной акустике терминологии эти колебания называются соответственно **основным тоном** и **обертонами**: 1-м, 2-м, 3-м, 4-м и т.д. (В физике, хочу сразу оговориться, используется иная терминология: основной тон называют 1-й гармоникой, а обертоны, начиная с первого — высшими гармониками: 2-й, 3-й, 4-й по порядку.) Основной тон определяет высоту звука, обертоны, накладываясь 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.

Рассмотрим временную функцию созвучия скрипки (рис. 5.1а). Распознать по графику основной тон колебания очень трудно. Ничего не говорит он и о частотном составе созвучия. Для этого следует представить данное колебание в иной плоскости, в виде спектральной характеристики, разложив его в так называемый *гармонический ряд Фурье*. По оси частот в виде перпендикулярных отрезков откладываются уровни колебаний, составляющих созвучие. Спектр созвучия скрипки соответствует приведенной временной функции (рис. 5.1б). Характерной чертой спектров струнных смычковых инструментов и, в частности скрипки, является наличие в них почти одинаковых по интенсивности первых восьми-девяти составляющих колебаний, величины которых медленно убывают с ростом их порядкового номера.

На рис. 5 приведены временная функция и спектр гласного «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

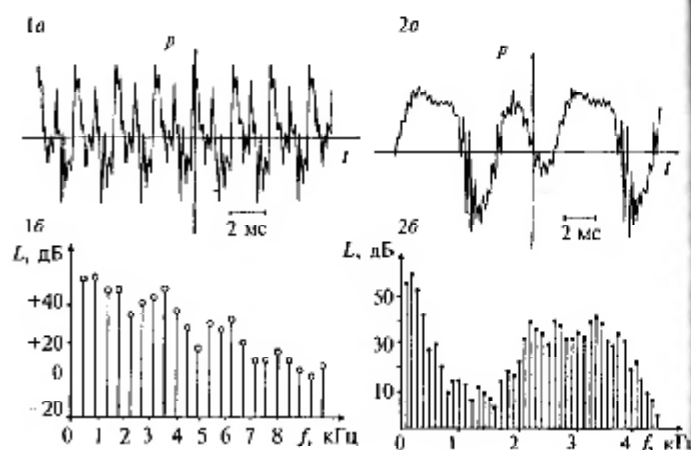


Рис. 5. Уровень звукового давления:

1 — уровень звукового давления скрипки в функциях времени (а) и частоты (б); 2 — уровень звукового давления гласного «и» в функциях времени (а) и частоты (б)

составляющие тоны достаточно интенсивны, в других интервалах они значительно слабее: огибающая спектра имеет два четких максимума. Для различных гласных эти максимумы находятся на разных частотах и называются **формантами**.

Даже однотонные звуки, которые мы слышим в повседневной жизни, непостоянны по амплитуде и частоте. Если периодически изменяются амплитуды звукового давления (*амплитудная модуляция*), то это придает звуку характерную «тремолирующую» окраску. Например, свистки регулировщиков уличного движения, спортивных судей издают тоны с частотой от 1 до 2 кГц. Но в зависимости от интенсивности потока вдуваемого воздуха эти тоны с помощью маленьких шариков меняют свою амплитуду с частотами примерно от 5 до 25 Гц. А при постоянной амплитуде быстро меняющаяся частота основного тона (*частотная модуляция*) на слух воспринимается как вибрато. При скрипичной игре основной тон может быстро, с частотой около 3 Гц, периодически меняться, то увеличиваясь, то уменьшаясь в пределах  $\pm 10$  Гц. И в том и в другом случае спектры натуральных звучаний музыкальных инструментов обогащаются новыми частотными составляющими, влияющими на тембр.

В музыке часто звучат два тона с почти одинаковыми уровнями и частотами. На слух они воспринимаются как один тон. Однако из-за небольшого различия частот фазы тонов постоянно сдвигаются относительно друг друга. В моменты, когда они 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 дополнительный регистр, который отличается на несколько герц от строя других регистров и поэтому создает биения (*унисонное звучание*).

И наконец, звуки почти всех музыкальных инструментов сопровождаются так называемыми *узкополосными шумами*. Шумами в акустике называют звуки, имеющие непрерывный спектр, в отличие от синусоидальных тонов и созвучий, у которых спектры дискретны. Например, играя на флейте, музыкант возбуждает не только периодический музыкальный тон, но и шум от вдувания 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 рис. 5 их можно заметить по незаполненным различиям колебаний в разные периоды. Спектр при этом расширяется, интервалы между его отдельными составляющими также заполняются.

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 однозначные признаки, характеризующие данный звук: громче — тише или 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 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 причин такого многообразия тембров различных инструментов и человеческих голосов не будет исчерпывающим, если не затронуть процессы возникновения и нарастания звуков



при их извлечении или затухании. Дело в том, что любой звук возникает и устанавливается на каком-то определенном «стационарном» уровне не мгновенно и затухает он также постепенно, за определенный промежуток времени. Процессы нарастания звука до какого-то установившегося, стационарного режима и его затухания называют *нестационарными процессами*. От продолжительности нарастания («атаки») и затухания звука, а также от формы огибающей нестационарных процессов существенно зависит окраска звука, его тембр. А это, в свою очередь, определяется конструкцией инструмента, а также способом звукоизвлечения (скользящего смычка, щипка или удара молоточка по струнам, возбуждения колебаний столба воздуха, вдуваемого в корпус духового инструмента и т.п.).

## § 5. Пространственное восприятие звуков

Человек обладает способностью определять направление приходящих звуков. Органы слуха, воспринимая звуковые колебания от источников звука, расположенных справа и слева от слушателя, различают их и по амплитуде, и по фазе. При этом фазовые сдвиги приходящих звуковых волн зависят от расстояний между источником звука и левым и правым ухом. Различие по амплитуде звуковых давлений обусловлено тем, что голова оказывает определенное экранирующее действие, особенно заметное для звуковых волн, соизмеримых 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. ощутить направление прихода звуковых волн, называется **бинауральным эффектом**, благодаря чему становится возможным пространственное слуховое ощущение.

Особенность восприятия звуков, излучаемых источниками, расположенными в разных точках пространства, не ограничивается ощущением локализации этих источников. Очень важно еще и то, что благодаря локализации, даже при одновременном звучании нескольких источников, человек получает возможность иногда совершенно неосознанно переключать внимание на звук, приходящий по одному какому-нибудь направлению, и чисто пси-

хологически выделять его на фоне других. Этот эффект, улучшающий различимость отдельных компонентов звучания, например, музыкальных инструментов в ансамбле, и уменьшающий, таким образом, их взаимную маскировку, часто называют *бинауральной демаскировкой*.

Это обстоятельство важно учитывать звукорежиссеру при воспроизведении одноканальной (монофонической) передачи, когда для воспроизведения звуковой программы используется один громкоговоритель и потому 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 одна из очень трудно устранимых принципиальных помех монофонической звукопередачи и звукозаписи: недостаточная «прозрачность» звучания, которая вынуждает звукорежиссера выводить солирующие инструменты на крупный звуковой план, часто значительно более близкий, чем это требуется по композиторскому замыслу и для сохранения стиля музыкального произведения. Здесь необходимо компромиссное решение, не разрушающее естественность звучания, а звукорежиссер должен проявить безупречный вкус и высокое профессиональное мастерство.

## § 6. Звук в закрытом помещении

Со звуками на открытом воздухе звукорежиссеру приходится сталкиваться довольно редко. Обычно художественные программы исполняются в помещениях: в студиях, на сценах театров, концертных залах. Акустические свойства помещения существенно влияют на характер звучания исполняемой музыки и речи. В помещениях акустическое поле формируется не только прямой волной, идущей от исполнителя по кратчайшему пути, но и после отражения от стен, потолка, пола и находящихся в помещении предметов. При каждом новом отражении часть энергии звуковой волны поглощается встреченными препятствиями, а часть в виде частных и убывающих по величине повторений воздействует на слух, накладываясь на основной (прямой) звук и придавая ему привлекательную для слушателей протяженность и окраску (рис. 6).

Часть энергии падающей волны (обозначим ее  $E_{\text{пад}}$ ) поглощается материалом поверхности (с переходом этой части в тепловую энергию), часть проникает сквозь поверхность в соседнее помещение, а часть отражается.

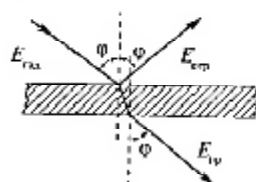


Рис. 6. Преломление и отражение звуковой волны

Энергия отраженных звуковых волн  $E_{отр}$  характеризуется коэффициентом отражения  $\beta$ , а поглощаемая поверхностью энергия  $E_{погл}$  — коэффициентом звукопоглощения  $\alpha$ .

Коэффициент  $\alpha$  показывает, какая часть энергии, падающей на поверхность звуковой волны, поглощается ею, а коэффициент  $\beta$  — какая ее часть отражается. Таким образом:

$$\alpha = E_{погл}/E_{пад} \text{ и } \beta = E_{отр}/E_{пад}$$

очевидно, что  $\alpha + \beta = 1$ , так как  $E_{отр} + E_{погл} = E_{пад}$ .

Значения коэффициентов  $\alpha$  и  $\beta$  зависят от материала и конструктивных особенностей поверхности, от угла падения на нее звуковой волны и от частоты звуковых колебаний.

В помещении, где расположен источник звука, звуковое поле формируется из прямой и отраженных звуковых волн, образующих так называемое *диффузное (рассеянное) звуковое поле*. Причем первые отраженные волны следуют друг за другом дискретно, хотя и с малыми задержками, а по прошествии некоторого времени в формировании звукового поля начинают принимать участие волны, претерпевшие разное число отражений и имеющие различные фазовые соотношения. При этом затухание звука теряет дискретный характер и становится непрерывным, слитным (рис. 7).

Первые, ранние отражения, приходящие к слушателю, могут как сливаться с прямым звуком, улучшая качество звучания, так и, наоборот, снижать разборчивость речи и даже прослушиваться

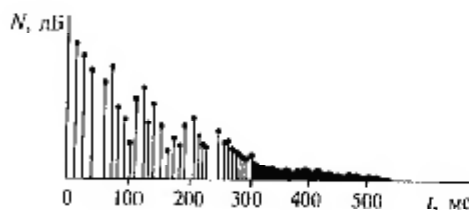


Рис. 7. Временная структура реверберационного процесса в помещении

как эхо. Оно возникает всякий раз, когда время задержки между прямым и отраженным звуком превышает 50 мс.

Явление распознавания отражений только через определенный отрезок времени объясняется инерционными свойствами слуха. Это означает, что воздействие любого звукового возбудителя прекращается в слуховом аппарате не сразу после выключения источника, а спадает по экспоненциальному закону. Другими словами, громкость за время, пока еще слух «помнит» прошлый звук, спадает по сравнению со значением возбуждающей энергии в момент ее выключения не полностью. Поэтому следующий звук, возникший в интервале времени, не превышающем «память» слуха, не может ощущаться отдельно от предыдущего и воспринимается слитно с ним.

Но при этом нельзя обойти вниманием и тот факт, что впечатление слушателя о размерах зала определяется частотой следования именно этих ранних отражений. В помещениях 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 возникает эффект эха, т.е. повторы слогов слышатся раздельно), то первые отражения, хотя на слух и сливаются с прямым звуком, тем не менее создают эффект присутствия слушателя в большом помещении.

В общем, инерционные свойства слуха аналогичны свойствам глаза, который не может различать отдельные кадры в кино, если интервал между ними менее 50 мс. Достаточно напомнить, что в старом кинематографе съемки велись при скорости 16 кадров в секунду, поэтому персонажам свойственна угловатость движений, а при новой скорости 24 кадра в секунду она уже практически незаметна.

Итак, звуковые отражения, когда источник звука уже выключен, поддерживают звуковое поле, и звук не пропадает мгновенно, а замирает в течение какого-то определенного для данного помещения времени. *Постепенное замирание звука в помещении (послезвучание) называется реверберацией*. От скорости замирания звука зависит время существования отзвука в помещении, так называемое *время реверберации*. Этот показатель тем больше, чем меньше звуковой энергии при отражениях поглощается ограничивающими помещением поверхностями и расположенными в нем предметами.

Естественно, поглощение звука зависит от размеров помещения, свойств материалов, покрывающих стены, потолок и пол, а

также от степени заполнения его 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. Ковры, мягкая мебель, тяжелые матерчатые драпировки — наоборот, хорошие поглотители; наличие их в помещении резко сокращает время реверберации.

В гудких помещениях время реверберации больше, там энергия звуковой волны спадает медленно; речь теряет разборчивость, зато музыка звучит более пространственно, объемно. В сильно заглушенных помещениях, где звуковая энергия быстро поглощается отражающими поверхностями и время реверберации невелико, речь и музыка звучат глухо, звук лишается сочности и естественной окраски. Очевидно, что с увеличением первоначальной акустической мощности источника звука длительность процесса реверберации объективно возрастает, хотя его слуховая оценка практически не изменяется.

Чтобы сравнить помещения по их акустическим свойствам, необходимо исключить зависимость времени реверберации не только от акустической мощности источника звука, но и от остроты слуха слушателя. Для этого введено понятие **времени стандартной реверберации** ( $T_{ст}$ ), т.е. времени, 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. 8).

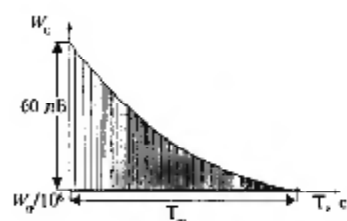


Рис. 8. Спад звуковой энергии после выключения источника звука.  $T$  — время стандартной реверберации,  $W_0$  — плотность звуковой энергии

Вторая важная акустическая характеристика помещения — частотная характеристика времени реверберации, или зависимость времени стандартной реверберации от частоты звукового сигнала. Энергия колебаний различных частот звукового диапазона поглощается одними и теми же материалами по-разному. Например, ковры, мягкая мебель, драпировки (как уже отмечалось), да и сами слушатели, заполняющие концертный зал, поглощают энергию более высоких частот сильнее, чем

низких. Помещения, в которых преобладают подобные поглотители, характеризуются большим временем реверберации на низких звуковых частотах и меньшим на высоких. Это приводит к значительному искажению тембра звука. Звучание становится глухим. Студии и концертные залы должны иметь определенную частотную характеристику времени реверберации.

Но процесс затухания звука в помещении только на первый взгляд кажется простым. В действительности дело обстоит значительно сложнее. После выключения источника звука возникает множество собственных колебаний объема воздуха, частота которых зависит от геометрических размеров помещения. Английский физик Релей еще в XIX в. показал, что всякое замкнутое пространство, представляя собой объемный резонатор, обладает бесконечным рядом собственных резонансных колебаний, или «модусов». Не останавливаясь подробно на законе распределения частот этих колебаний, скажем лишь, что если размеры воздушного объема не слишком малы, т.е. если  $\lambda = \sqrt[3]{V}$  (где  $V$  — объем;  $\lambda$  — длина волны для самых низкочастотных составляющих сигнала), то собственные частоты объема располагаются настолько плотно, что любая частотная составляющая звукового сигнала возбуждает собственные колебания воздушного объема с частотами, очень мало отличающимися от частот возбуждающих сигналов. Таким образом, в помещениях достаточного объема спектр отзвука практически повторяет спектр возбуждающего сигнала (разумеется, по частотному составу, а не по амплитудам, которые будут существенно различаться вследствие различного звукопоглощения на разных частотах). Если же размеры помещения малы по сравнению с длиной волны возбуждающих колебаний, то спектр собственных частот помещения редок и отклик существенно отличается по спектру от возбуждающего сигнала. Это хорошо заметно в небольших помещениях (порядка 100 м³ и менее), где явственнее низкие частоты, что вызывает искажение естественного тембра звучания (характерное ощущение «бубнения» голоса).

Таким образом, реверберация — не равномерный спад диффузного звукового поля, а неравномерное затухание звуковой энергии, сосредоточенной в узких частотных полосах, центрирующихся вокруг резонансных модусных частот. Реверберационный звук начинает немедленно группироваться вокруг модусных частот, причем скорость его затухания определяется уровнем поглощения в помещении, свойственным каждой данной полосе частот. Увеличение плотности реверберационного звука на высоких частотах — чрезвычайно важное условие получения хорошей, красивой реверберации.

Одни и те же собственные частоты возникают в разных комбинациях, зависящих от акустических свойств помещения. Иногда некоторые из них совпадают между собой, и это обедняет спектр звучания. Максимальное совпадение собственных частот происходит в кубическом пространстве; поэтому куб считается наихудшей в акустическом отношении формой студии. Учитывая это, рекомендуется строить студии прямоугольной формы и так, чтобы соотношения ее размеров не были бы кратными, например 1 : 2 : 3. Желательны размеры, близкие к «золотому сечению», когда высота, ширина и длина соотносятся как 1 : 1,6 : 2,6. В этом случае резонансные частоты помещения распределяются наиболее равномерно. Ограждающие поверхности студии должны обеспечивать оптимальное время реверберации.

Если объем помещения достаточен ( $V > \lambda$ , а это условие обычно выполняется), можно не считаться с дискретностью спектра собственных частот и перейти к анализу временной структуры звукового поля с позиций геометрической акустики. Это означает, как уже было сказано, поле в каждой точке помещения можно рассматривать как результат интерференции прямой звуковой волны, поступающей от исполнителя по кратчайшему пути (прямой звук), и значительного числа отраженных звуковых волн (отзвуков), претерпевших разное число отражений от поверхностей помещения.

При оценке акустических свойств студии принимают во внимание и еще один ее параметр: **диффузность** звукового поля, т.е. равномерность распределения энергии отраженных волн по всему объему помещения, при котором уровень звуковых волн, приходящих в данный момент из разных направлений, одинаков, а фазы случайны. Чтобы улучшить диффузность, при строительстве студий прибегают к расчленению больших отражающих поверхностей полуколоннами круглой или прямоугольной формы, применяют кессонные потолки, подвешивают отражатели. Для этих же целей иногда используют не параллельные с полом стены и потолок.

В плохих студиях порой наблюдается очень нежелательный эффект, получивший название **порхающего эха**, или **флаттер-эффекта**. Флаттер-эффект возникает, когда источник звука находится между двумя параллельными гладкими стенами или потолком и полом. В этом случае в точку приема приходят два первых отражения. Если при этом разность их путей от ограждающих поверхностей превышает 18–20 м, возникает эхо. Оно особенно явственно ощущается при сдвиге фаз, проявляющегося во взаимном усилении или ослаблении звука (интерференции звуковых волн). В результате многократного отражения в точке приема звук периодически уси-

ливается, а на коротких импульсных звуках, в зависимости от частотных компонентов эха и интервала между ними, приобретает характер дребезга, тресков или ряда последовательных и затухающих сигналов эха.

## § 7. Акустическая обработка студий и требования к их параметрам

Опыт эксплуатации показал, что лучшее звучание, или оптимальное (наиболее выгодное) время реверберации, не одинаково для студий разных размеров и различного назначения. Оно равно 0,35–0,5 с для речевых дикторских 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.

Кроме того, важную роль играет и частотная характеристика времени реверберации. Для больших музыкальных студий рекомендуется прямолинейная 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 «формантный характер». И лишь на частотах ниже 250 Гц иногда предпочитают небольшой плавный подъем характеристики (на 40–50%). Для речевых студий, площади которых обычно малы, наилучшей частотной характеристикой времени реверберации будет спад в области низших частот. Это необходимо для того, чтобы ослабить резонансные явления, возникающие в помещениях малых объемов, которые на слух воспринимаются как «бубнение» голоса. Мы уже говорили о природе этого акустического дефекта.

Акустические условия телевизионных и радиостудий существенно различаются. В телевизионной студии:

- декорации повышают степень поглощения и отражения;
- акустические условия меняются при перемещениях исполнителей;
- необходимо согласовывать зрительный и звуковой образы при перемещении исполнителя или группы исполнителей.

Величина поглощения, вносимого декорациями, в среднем меняется в сравнительно узких пределах и возрастает в области

низких и высоких частот. На низких частотах рост звукопоглощения происходит за счет конструкций декораций, выполненных из фанеры или крашеного холста; на высоких частотах — за счет свободно висевших тканей. Отражения от декораций создают собственную акустическую обстановку, отличающуюся от акустики студии. Чем более замкнута декорация, тем большее количество отражений попадает в микрофон и тем больше меняется тембр звука. С уменьшением коэффициента звукопоглощения увеличивается отраженная энергия и возрастает зависимость тембра от положения микрофона.

Энергия, отраженная от декораций, суммируется с прямым звуком, таким образом увеличивая его громкость и отношение сигнала к шуму. В этом смысле декорации полезны. Однако если источник звука изменяет свое местоположение, отраженная от декораций энергия тоже может резко меняться, что ограничивает возможность перемещения актеров без изменения фактора «чистоты». Поэтому построение сцены должно предусматривать неизменность количества отражений от декораций, попадающих в микрофон. (Основные принципы расчета акустики студий см. в Приложении 1.)

Наряду с изложенным надо иметь в виду, что акустические свойства студии — необходимые условия высокого качества звучания, но реализовать их можно только при соблюдении определенных правил использования данной студии. Кроме того, для качественного звучания передач следует строго соблюдать нормы заполнения студии исполнителями. Современные требования, справедливость которых подтверждена опытом, предполагают, что при музыкальном исполнении на каждого исполнителя должно приходиться не менее 35–50 м<sup>3</sup> объема студии. Так, для оркестра из 50 человек необходима студия объемом не меньше 2000 м<sup>3</sup>. При исполнении оперы, оратории, симфонического произведения коллективом 150–200 человек необходим концертный зал или студия объемом соответственно 6000–10 000 м<sup>3</sup> и больше. Попытки записать или передать в эфир музыкальные произведения, исполняемые большими коллективами в помещениях, не рассчитанных на такой состав, приводят к ухудшению качества звучания.



## Глава 2

# КАЧЕСТВЕННЫЕ ПАРАМЕТРЫ КАНАЛА ЗВУКОПЕРЕДАЧИ

Звуковые акустические колебания преобразуются микрофоном в переменное электрическое напряжение, точно отображающее звуковой процесс. Условимся эти электрические колебания звуковых частот называть сигналом передачи. Далее, этот сигнал по каналу передачи доставляется к потребителю (слушателю) либо в виде электрических колебаний, подобных по форме звуковой волне, т.е. в виде электрического аналога звука (аналоговая передача), либо в виде специального цифрового кода (цифровая передача).

Попытки использовать технику дискретных (импульсных) сигналов для обработки и передачи звука предпринимались многократно, но до начала 80-х годов не имели особого успеха. И только позже, когда в студиях появились первые цифровые магнитофоны, стало ясно, что переход на цифровую технику открывает самые широкие возможности для совершенствования методов обработки сигналов и их записи. Этому способствовали технологические революции в микроэлектронике, связанные с переходом на более высокие уровни интеграции. В микроэлектронике это означает, что электронные устройства, ранее умещавшиеся разве что в шкафу, уменьшились до карманного размера. Следствия этого технологического прорыва, потрясшего в последние годы компьютерную технику, видео и телевидение, не обошли, разумеется, и технику звукозаписи и обработки звука. Преимущества изображения звуковых сигналов в цифровой форме наиболее отчетливо проявились именно в области записи их на компактные и весьма долговечные носители. Поэтому подробнее о цифровом способе передачи звука и об особенностях эксплуатации цифровой аппаратуры более уместно рассказать в главе, посвященной звукозаписи.

Условимся, что под каналом звукопередачи, на каком бы принципе он ни работал, мы будем понимать 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, звукозаписи или 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 считают 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 выхода в эфир приходится дополнительно преобразовывать энергию электрических колебаний в энергию электромагнитных волн (это преобразование осуществляется с помощью антенны передающей станции), а затем с помощью антенны приемника производить обратное преобразование энергии электромагнитных волн в энергию электрических колебаний. Промежуточные преобразования энергии одного вида в другой происходят также при звукозаписи, но об этом будет рассказано в соответствующей главе. Упомянутые схемы далеко не исчерпывают всего многообразия возможных каналов звукопередачи. Сюда можно было бы добавить линию производства компакт-дисков, а также многое другое, что предлагает современная звукотехника.

В данной главе мы рассмотрим основные электрические характеристики канала, определяющие точность звукопередачи и, следовательно, натуральность (или, как часто говорят, «верность») воспроизведения звука.

## § 1. Уровень передачи звукового сигнала

Важной характеристикой звукопередачи в какой-либо точке канала служит величина электрического напряжения сигнала, от нее в итоге зависит громкость звучания программы у слушателя.

Но уровень сигнала оценивается в единицах электрического напряжения (вольтах или его долях) 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 с частотой 1000 Гц), а измерения можно производить обычным вольтметром, который подключается параллельно электрической цепи. Однако на практике уровень сигнала оценивают обычно в децибелах и пользуются для измерений не вольтметром, а специальным прибором, так называемым измерителем уровня. (Подробнее об этом приборе будет рассказано в § 4.)

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. Единая для акустики и электрических каналов логарифмическая шкала 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:

$$N_{дБ} = 20 \cdot \lg U_2 / U_1,$$

где  $U_1$  и  $U_2$  — сравниваемые напряжения.

Соответствующие им электрические мощности в децибелах представляются несколько иной формулой:

$$N_{дБ} = 10 \cdot \lg P_2 / P_1,$$

где  $P_2$  и  $P_1$  — сравниваемые мощности.

Мощности пропорциональны квадратам напряжений, поэтому изменение напряжения, например, в 10 раз, вызывает соответствующее изменение мощности в 100 раз. Именно поэтому, как уже подчеркивалось, в формулах для напряжений и мощностей уже подчеркивалось (соответственно 20 и 10) различаются в 2 раза. Это позволяет сохранить одинаковое определение децибел независимо от того, какой из электрических параметров сравнивался (напряжение или мощность), результат вычислений будет в любом случае один и тот же. Действительно:

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

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



В случаях когда уровень сигнала понижается, т.е.  $U_2$  меньше  $U_1$ , выраженное в децибелах соотношение приобретает отрицательный знак. Например, если выраженные в вольтах уровни

$$U_1 = 10 \text{ В, а } U_2 = 1 \text{ В, то}$$

$$N = 20 \lg 0,1 = 20(-1) = -20 \text{ дБ.}$$

Часто возникает необходимость оценить абсолютный уровень сигнала в определенной точке цепи. При этом под абсолютным уровнем понимают выраженное в децибелах отношение данного уровня к уровню, условно принятому за нулевой. В технике связи радиовещания 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 единиц измерения добавляется латинская буква u (дБu), а по мощности — латинская m (дБm). Результаты этих двух способов вычисления абсолютных уровней сигнала численно совпадают только при условии, что в данной точке электрической цепи сопротивление равно 600 Ом.

При проектировании аппаратных радиовещания 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 откладываются уровни передачи в разных точках канала, выраженные в децибелах (рис. 9).

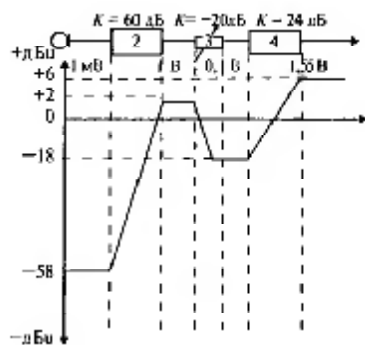


Рис. 9. Типичная диаграмма уровней:  
K — коэффициент усиления

Рассмотрим упрощенный пример диаграммы уровней для цепи тракта, содержащего микрофон, микрофонный усилитель, регулятор уровня и выходной усилитель (см. рис. 9). Чтобы построить ее, надо знать напряжение, развиваемое микрофоном, коэффициенты передачи усилителей, а также следует задать величину запаса по усилению на регуляторе уровня.

Все уровни на диаграмме отсчитываются по напряжению относительно нулевого, за который, как было сказано, принимается 0,775 В.

Чтобы избежать путаницы при определении уровней передачи с помощью измерителя уровня, подключаемого, как правило, либо к магнитофону, либо на выходе аппаратной, надо помнить, что отметка на шкале прибора «0 дБ» (100%) может и не соответствовать абсолютному значению уровня сигнала по напряжению, т.е. 0 дБу (0,775 В). Она лишь указывает точку *относительного* уровня, от которого звукорежиссер ведет отчет всех изменений уровня в процессе передачи, максимально допустимого в данной точке канала.

Например, номинальное значение абсолютного уровня, принятое в студиях радиовещания и звукозаписи нашей страны, нормируется и устанавливается равным +6 дБу, т.е. 1,55 В. Этот уровень выбран потому, что он соответствует оптимальным условиям записи звукового сигнала на магнитофон и передачи его в линию. Поэтому чувствительность измерителя уровня в наших аппаратных 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 дБу, т.е. 1,23 В. Такое несоответствие для работы звукорежиссера не имеет никакого значения, так как, поддерживая в процессе передачи максимальный уровень сигнала до 0 дБу (100%) по измерителю уровня, он не нарушит принятую для данного тракта диаграмму уровней.

## § 2. Амплитудно-частотная характеристика

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

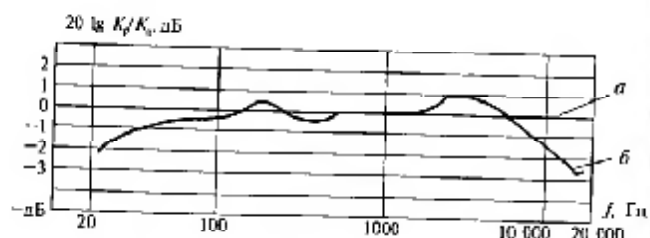


Рис. 10. Амплитудно-частотные характеристики:  
а — идеальная; б — возможный пример реальной. Шкала оси частот — логарифмическая

совершенно определены. Естественно, 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 сигналов на выходе усилителя и его входе.

Подадим на вход какого-либо усилителя переменное напряжение звуковой частоты и, поддерживая неизменным его уровень, начнем менять частоту колебаний, контролируя уровень выходного напряжения. В идеальном случае усиленное выходное напряжение усилителя на всех частотах должно было бы быть одинаковым. Графически частотная характеристика такого усилителя — прямая линия, параллельная оси частот (на рис. 10 — кривая а).

В реальных условиях частотная характеристика в диапазоне звуковых частот (от 20 до 20 000 Гц) не бывает прямолинейной 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 — выраженные в децибелах значения отношений коэффициентов передачи на соответствующих частотах к коэффициенту передачи на средней частоте, например на частоте 1000 Гц, который и принимается за меру сравнения, т.е. за 0 дБ. Частотная

характеристика обычно имеет понижения в области как низших, так и высших частот звукового диапазона (кривая б).

Это означает, что усиление бывает меньше на низших и высших частотах по сравнению со средними. 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.

Рассмотрим теперь, как частотная характеристика влияет на качество воспроизведения. Подъемы и завалы в области высших и низших звуковых частот — суть частотные искажения. Они субъективно воспринимаются обычно так: завалы высших частот (от 3–4 кГц и выше) создают тусклость звучания, ухудшают разборчивость речи. Излишнее усиление (подъем) высших частот приводит к подчеркиванию шипящих и свистящих звуков и к неестественно резкому звучанию музыки, раздражающему слух. Завал низших частот (100–200 Гц и ниже) лишает звучание полноты, сочности, нарушает красоту тембра, а их чрезмерное усиление вызывает ощущение неприятного, бубнящего звучания.

Величина неравномерности частотной характеристики в диапазоне звуковых частот нормируется. При этом 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 аналогового оборудования высшего класса качества — 30–15 000 Гц) не должна превышать 1 дБ, т.е. коэффициенты передачи на разных частотах должны отличаться друг от друга не более чем на 12%.

При проектировании звукового тракта, состоящего из нескольких усилителей и отрезков длинных соединительных линий, приходится принимать меры, чтобы все участки имели частотную характеристику, близкую к прямолинейной. Если этого не удается добиться прямым путем, обычно используют метод компенсации частотных искажений, т.е. последовательно с вносящим искажения элементом включается специальный корректирующий элемент, частотная характеристика которого служит как бы зеркальным отражением частотной характеристики, которую требуется исправить. Например, если длинная линия благодаря наличию емкости между двумя ее проводниками «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.

### § 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, т.е. коэффициент передачи цепи меняет свою величину в зависимости от мгновенных значений уровня сигнала, подаваемого на вход устройства (рис. 11).

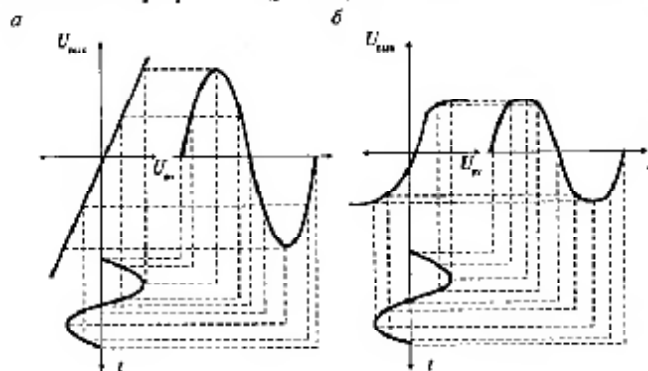


Рис. 11. Нелинейные искажения:

а — сигнал прошел через линейную цепь; б — на выходе нелинейной цепи форма сигнала искажена

Нелинейные искажения при малой их величине изменяют тембр звучания, затрудняют раздельное восприятие звуков инструментов и голосов. При более сильных нелинейных искажениях появляются неприятные хрипы и дребезжание.

Физическая сущность нелинейных искажений особенно ярко проявляется при переходе к спектральному представлению сигнала как совокупности частот. Например, при подаче чистого синусоидального тона на элемент схемы, имеющий нелинейную характеристику, на его выходе появляются отсутствовавшие на входе высшие гармоники, 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 (рис. 12).

Еще более неприятное следствие нелинейности — комбинационные частоты. Они возникают, когда на вход нелинейной системы подается не одно синусоидальное колебание, а два или несколько. Тогда на выходе, кроме проходящих гармоник всех проходящих колебаний, в результате так называемых биений появляются комбинационные частоты, равные суммам и разностям всех 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, возникшие в результате биения гармоник с основными частотами и друг с другом:  $2f_1 + f_2 = 2000 + 1100 = 3100$  Гц;  $2f_1 - f_2 = 2000 - 1100 = 900$  Гц и т.п.

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 самые нежелательные — 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 изменяет в известной мере тембр звучания, но не воспринимается

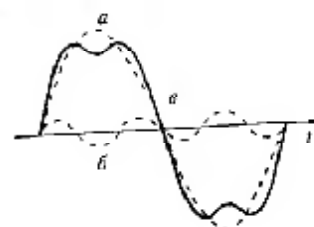


Рис. 12. Сложные колебания, полученные в результате нелинейного усиления:

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 гармоники)



Рис. 13. Схема для определения коэффициента гармоник

столь неприятно, как появление комбинационных тонов, ранее отсутствовавших в сигнале и впервые появившихся в процессе передачи. Именно они воспринимаются слушателем в виде заметных искажений.

Нелинейные искажения оцениваются величиной *коэффициента нелинейных искажений*, по старой терминологии, «клирфактор», что в переводе с немецкого означает «фактор дребезжания». Однако этот термин неточно характеризует сущность искажений, поэтому теперь им не пользуются.

Нелинейные искажения — явление, в общем, сложное, его числовое описание затруднено и даже иногда невозможно. 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, во втором — коэффициентом комбинационных частот. Наиболее используемый способ измерения нелинейных искажений — определение коэффициента гармоник с помощью схемы (рис. 13).

Для этого на вход испытуемого устройства (например, усилителя) от звукового генератора подается синусоидальное напряжение с определенной частотой ( $f$ ), величину его напряжения измеряют на выходе усилителя ( $U_{\text{вых}}$ ). Затем на выходе усилителя включают специальный фильтр, который подавляет основное колебание, но хорошо пропускает все колебания с более высокими частотами. Вольтметр, подключенный на выход фильтра, регистрирует напряжение, создаваемое гармониками, вновь 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 вычислить коэффициент нелинейных искажений по формуле:

$$K_{\text{г}} \% = U_{\text{г}} / U_{\text{вых}} \cdot 100\%.$$

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 это не столь важно, ибо, зная его величину, можно достаточно определенно судить о степени нелинейности усилителя. Нелинейные искажения на слух 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 становится 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 оказаться магнитофонная лента.

#### § 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 в тихих местах исполнения, когда они не маскируются полезным сигналом и потому существенно мешают восприятию звука.

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

Фон проявляется обычно в виде прослушиваемого низкого однотонного гудения с частотой 50 или 100 Гц. Причиной чаще всего является плохая фильтрация переменной составляющей напряжения, выпрямленного в источнике питания и используемого для питания транзисторов или электронных ламп усилителей. Но могут проявиться и внешние наводки за счет электромагнитной свя-

зи цепей передачи звука с посторонними источниками электрических и магнитных полей (например, трансформаторов, силовых электрических кабелей, театральных софитов и т.п.). Так же, путем электромагнитных наводок на токоведущие цепи каналов передачи звукового сигнала, могут проникнуть в канал и так называемые внятные помехи, например посторонние программы близко расположенных мощных радиовещательных станций, и т.п. Для борьбы с наводками любого характера следует тщательно защищать, применяя экранировку, те цепи, по которым протекают слабые токи (например, микрофонные провода).

Принцип действия экранов следующий. Провод, по которому передаются токи звуковой частоты, заключается 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, пермаллоя или других подобных магнитных материалов, выполняют двойную роль: предохраняют трансформатор от воздействия внешних магнитных полей и не дают возможности поля 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, различающиеся не только по интенсивности, но и по тембру и ритму. Но самый характерный и типичный 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 принятым в оптике наименьшим белым цветом, который можно, как известно, получить, смешивая в одинаковых пропорциях все цвета солнечного спектра.

Избавиться от такого шума при звукопередаче — задача не из легких. Единственная радикальная мера — специальный подбор малошумящих транзисторов и резисторов, а также подача на вход первых каскадов усилителей полезного сигнала как можно более

высокого уровня, 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 единиц милливольт) напряжения, на входе обычно устанавливается микрофонный трансформатор, в несколько раз увеличивающий напряжение сигнала, поступающего от микрофона. Однако указанные меры не всегда дают удовлетворительный результат.

В качестве числовой оценки шумовых характеристик усилителя (или всего тракта передачи) используют отношение сигнала к помехе, которое показывает, насколько номинальный (т.е. расчетный, нормальный для данного усилителя) уровень выходного полезного сигнала превышает уровень напряжения помехи на выходе испытуемого устройства. Это отношение определяется формулой и выражается в децибелах:

$$D = 20 \lg U_c / U_{шк}.$$

Часто, когда основной помехой воспроизведению становится только шум усилителей или магнитной ленты (кстати, наиболее неблагоприятный с этой точки зрения участок тракта), оценить качество воспроизведения в усилителе можно по отношению сигнала к шуму. В этом случае его можно рассматривать как характеристику соответствующего участка цепи или канала в целом. Тогда говорят, например: шум тракта минус 60 дБ. Это значит, что уровень собственных шумов канала передачи на 60 дБ ниже, чем номинальное выходное напряжение полезного сигнала (т.е. в 1000 раз).

Но общий уровень шума усилителей зависит в основном от уровня шума первых ступеней усиления, где проходящий полезный сигнал особенно мал и соизмерим 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 сигнала к шуму 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, вследствие чего шумы первых транзисторов (ламп) усиливаются меньше. При пониженном уровне входного сигнала регулятор уровня, наоборот, 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 микшерных пултов по их собственным шумам часто пользуются методом оценки шумов, приведенных ко 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. В этом методе учитывается 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 сигнала к шуму на выходе усилителя и на его входе одно и то же.

И тогда для того, чтобы определить абсолютный уровень шума на входе усилителя (приведенный ко входу шум), достаточно знать, от какого входного уровня производились измерения, и затем к величине этого уровня, выраженной в децибелах относительно нуля (0,775 В), прибавить выраженное также в децибелах отношение сигнала к шуму, измеренное на выходе усилителя. Результат сложения и будет величиной шума, приведенного ко входу усилителя.

К примеру, на вход усилителя подано напряжение:  $U = 250$  мкВ (этот уровень ниже нулевого на 70 дБ, т.е. равен -70 дБ), а на выходе усилителя отношение сигнала к шуму равно 60 дБ. На входе это соотношение сохраняется, поэтому приведенный ко входу шум будет ниже входного полезного сигнала еще на 60 дБ, т.е.  $-70 + (-60) = -130$  дБ (рис. 14).

Такое представление шума не зависит от режима усиления. Действительно, повысим входной уровень сигнала, например, на 20 дБ. Теперь уровень входного сигнала будет не -70, а -50 дБ. Чтобы сохранить уровень выходного сигнала номинальным, следует снизить коэффициент передачи усилителя на 20 дБ. При этом шум на выходе усилителя понизится на те же 20 дБ, отношение сигнала к шуму, таким образом, возрастет с 60 дБ до 80 дБ. Итак, приведенный ко входу уровень шума в этом случае будет равен  $-50 + (-80) = -130$  дБ, т.е. сохранит свое значение и окажется 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 шумов в зависимости от участка спектра, на котором сосредоточена их основная энергия, вос-

приниматься будут по-разному. Очевидно, если основные частотные составляющие шума находятся 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 по характеристике чувствительности приближается к слуховому аппарату человека. Поэтому он лучше реагирует на те частоты, которые слышит наше ухо. Такой способ измерения называется *психометрическим*, а прибор для его осуществления — *психофонетром*.

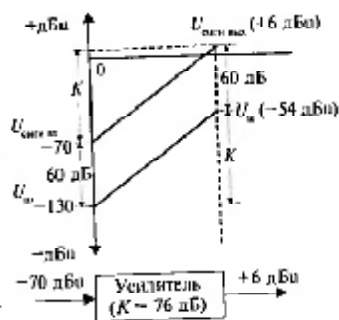


Рис. 14. Приведение шумов к входу усилителя на примере диаграммы уровней сигнала и шума для входа микрофонного усилителя

## § 5. Динамический диапазон передачи

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

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 передавать полностью натуральный динамический диапазон оркестра (70–80 дБ), то уровень сигнала



на пианиссимо следовало бы установить не ниже 40 дБ (чтобы не мешали шумы помещения). Фортиссимо при этом по громкости должно соответствовать 110–120 дБ. Такой уровень неприемлем, хотя бы из-за недостаточной звукоизоляции квартир, но, что еще существеннее, и сам слушатель не выдержал бы столь оглушающей громкости, близкой к пределу возможностей человеческого слуха.

Поэтому динамический диапазон передачи в системах радиовещания и звукового сопровождения телевидения не должен превышать 40 дБ. Это существенно меньше натурального динамического диапазона при «живом» исполнении. Таким образом, в радиовещании, на телевидении и при звукозаписи приходится прибегать к искусственному сжатию динамического диапазона, которое выполняют либо вручную, либо автоматически.



## Глава 3

# ОБОРУДОВАНИЕ ЗВУКОВЫХ СТУДИЙ

Технические средства, необходимые для радиовещательной передачи и звукозаписи, располагаются в двух, обычно смежных, объединенных смотровым окном, но хорошо звукоизолированных друг от друга помещениях — в студии и аппаратной. В студии устанавливаются микрофоны, громкоговоритель для режиссерских команд и прослушивания исполнителями записанной программы и пульта диктора. В аппаратной находятся микшерный (звукорежиссерский) пульт, устройства для дополнительной обработки сигнала (линии задержки, ревербераторы, эквалайзеры и другое оборудование), а также измерители уровня сигнала, магнитофоны, контрольные громкоговорители и многое другое.

## § 1. Микрофоны

### Основные технические характеристики

**Микрофон** — это приемник звука и преобразователь звуковых колебаний в электрические. Известно множество способов преобразования звуковой энергии в электрическую, но любой микрофон, как бы он ни работал, можно описать определенным набором технических параметров, позволяющих судить о качестве и, главное, пригодности его применения в различных целях.

**Чувствительность ( $E$ )** — одна из наиболее важных характеристик микрофона. Она определяется как электродвижущая сила (ЭДС) при работе микрофона без нагрузки или как напряжение, создаваемое на стандартном сопротивлении нагрузки при воздействии на чувствительный элемент микрофона звукового давления, равного 1 Па. За единицу чувствительности принимают отношение одного милливольт к одному паскалю, т.е.  $E = 1 \text{ мВ/Па}$ . (Это определение составлено по системе единиц СИ, до ее введе-

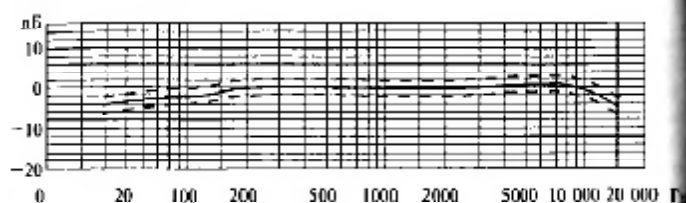


Рис. 15. Частотная характеристика микрофона

ния за единицу чувствительности принимался один милливольт на бар<sup>1</sup>.)

Чувствительность микрофона под нагрузкой и при холостом ходе различна. Однако современные микрофоны обычно подключаются к высокоомным (по сравнению с выходным сопротивлением самого микрофона) входам пульты, т.е. работают в режиме, близком к холостому ходу. Это позволяет под чувствительностью микрофона с допустимой для практики точностью понимать его чувствительность на холостом ходу. Чувствительность микрофонов в зависимости от их конструкции может составлять от 1–2 (динамические микрофоны) до 10–15 мВ/Па (конденсаторные микрофоны). И еще, чувствительность, или уровень передачи, микрофона в большей или меньшей степени зависит от частоты звуковых колебаний. График этой зависимости называют **частотной характеристикой** микрофона (рис. 15).

Очень важный параметр частотной характеристики — ее **неравномерность**, которую представляют в децибелах, вычисленных как отношение значений чувствительности микрофона на какой-то определенной частоте к чувствительности на средней частоте, за которую обычно принимают частоту 1000 Гц. Чувствительности на частоте 1000 Гц условно приписывают уровень 0 дБ и от него отчитывают неравномерность как в положительную, так и в отрицательную сторону.

Способность микрофона реагировать на звуки в зависимости от пространственного расположения источника и направления прихода звуковых волн определяется характеристикой направленности. Она оценивает изменения чувствительности микрофона при смене направлений, по которым звуковые волны приходят к чувствительному элементу. Характеристику или диаграмму направлен-

ности графически представляют в полярной системе координат. Строят эти диаграммы так. В качестве опорного направления ( $0^\circ$ – $180^\circ$ ) используют ось микрофона (фронтальное или перпендикулярное к лицевой стороне микрофона направление). Боковые направления определяются углами прихода по отношению к осевой линии. Вдоль линии, устанавливающей конкретное направление, откладывают отрезок, пропорциональный чувствительности в этом направлении.

Микрофоны принято подразделять по диаграммам направленности на три группы: **ненаправленные**, **двусторонне-направленные** и **односторонне-направленные**. Микрофоном **ненаправленного действия** называют такой, чувствительность которого остается постоянной независимо от направления, по которому приходит к его чувствительному элементу звуковые волны.

Диаграмма направленности такого микрофона имеет форму круга (рис. 16). Это некое идеализированное устройство. В действительности нет и не может быть микрофона, для которого характеристика оставалась бы правильной окружностью во всем частотном диапазоне, так как с повышением частоты, когда длина волны становится соизмеримой с размерами микрофона (например, на частотах 8–10 кГц), длина звуковой волны равна примерно 3–4 см и соизмерима с размерами самого микрофона. Поэтому экранирующее действие корпуса микрофона неизбежно влияет на характеристику направленности. Микрофоны **ненаправленные** на низких частотах звукового диапазона — более 4–5 кГц — проявляют определенную направленность, которая становится значительной на высоких частотах — 10–12 кГц и выше. Поэтому реальная диаграмма направленности, которая приводится в технической документации к микрофону ненаправленного действия, обычно имеет вид, подобный представленному на рис. 17.

Таким образом, говорить о **ненаправленном микрофоне**, конечно, можно, но не забывая об условности этого понятия. К сказанному добавим, что этот термин обычно относят к микрофонам с диаграммой направленности, близкой к круговой, точнее к шаровой, только на низких частотах.

**Двусторонне-направленные микрофоны** имеют одинаковую чувствительность с фронтальной и тыловой сторон подвижного эле-

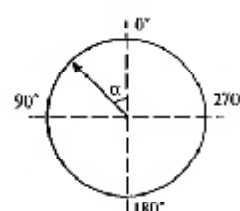


Рис. 16. Идеализированная диаграмма направленности микрофона ненаправленного действия

<sup>1</sup> Бар — единица давления в ныне не применяемой системе единиц СГСЗ; 1 бар = 0,1 Па.

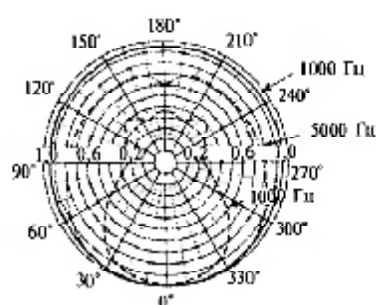


Рис. 17. Зависимость диаграммы направленности от частоты звукового сигнала

мента, а чувствительность их в поперечном направлении практически равна нулю. Диаграммы направленности этих микрофонов имеют форму восьмерки (рис. 18).

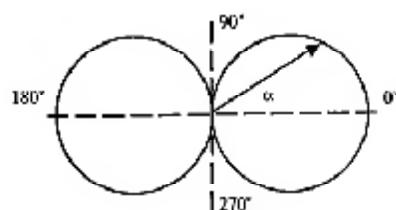


Рис. 18. Диаграмма направленности двустороннего микрофона

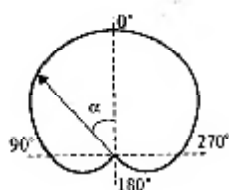


Рис. 19. Кардиоид — типичная диаграмма направленности односторонне направленного микрофона

Односторонне направленные микрофоны воспринимают звуковые колебания, приходящие лишь с фронтальной стороны. Диаграммы направленности подобных микрофонов по форме близки к геометрической фигуре кардиоиде, поэтому их часто называют кардиоидными микрофонами (рис. 19).

Еще одна модификация типовых диаграмм направленного микрофона с узкой, утрированной направленностью — гиперкардиоидой представлена на рис. 20.

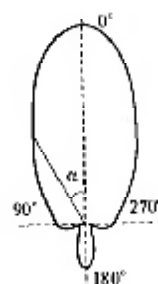


Рис. 20. Гиперкардиоид — характеристика остро направленного микрофона



Рис. 21. Микрофон — приемник давления



Рис. 22. Микрофон — приемник градиента давления

Различные характеристики направленности — итог особых конструктивных ухищрений. Рассмотрим, к примеру, микрофон, к чувствительному элементу которого звуковая волна имеет доступ только с одной стороны (рис. 21).

На него действует сила  $F$ , пропорциональная величине звукового давления  $p$  и площади мембраны (или диафрагмы)  $S$ :  $F = p \cdot S$ .

Такие микрофоны принято называть *приемниками давления*. Пока длина звуковой волны заметно превосходит размеры микрофона и его чувствительного элемента, диаграмма направленности практически остается круговой. Однако есть микрофоны, сконструированные таким образом, что звуковые волны подходят к подвижной системе с обеих сторон (рис. 22).

Эти микрофоны принято называть *приемниками градиента давления* (или *приемниками скорости*). Здесь результирующая внешняя сила  $F$ , действующая на приемник звука, пропорциональна разности давлений, воздействующих на чувствительный элемент с двух сторон. Эта разность возникает за счет разных расстояний, которые проходит звуковые волны до фронта и тыла микрофона и экранирующего действия корпуса самого микрофона:

$$F = (p_f - p_n) \cdot S,$$

где  $p_f$  и  $p_n$  — давления с фронтальной и тыльной сторон чувствительного элемента;  $S$  — площадь мембраны (диафрагмы).

Очевидно, что в этом случае действующая на систему сила максимальна, когда звуковая волна движется параллельно оси слева или справа, и равна нулю, когда волна приходит перпендикулярно оси микрофона и путь ее к обоим сторонам приемника одинаков (так как  $p_f = p_n$  и  $F = 0$ ).

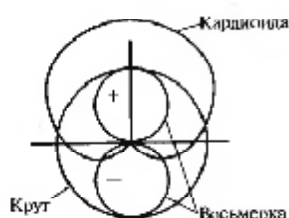


Рис. 23. Формирование кардиоиды

Кардионные, односторонне-направленные микрофоны являются акустически комбинированными приемниками. В них сила, действующая на чувствительный элемент, благодаря специальной конструкции микрофона имеет две составляющие. Одна из них не зависит от угла падения звуковой волны (эта часть соответствует приемнику давления), а вторая изменяется пропорционально косинусу угла падения (соответствует приемнику градиента давления). Напряжение на выходе микрофона также содержит две составляющие, диаграммы направленности которых — круг и восьмерка. При падении звуковой волны с фронта обе составляющие напряжения синфазны, поэтому суммируются; при падении с тыла круг и восьмерка создают противофазные напряжения, которые взаимно уничтожаются. В итоге результирующая диаграмма направленности — типичная кардиоиды (рис. 23).

Диаграмма направленности — одна из самых важных эксплуатационных характеристик микрофона. Звукорежиссер должен уметь для каждого конкретного случая правильно выбрать микрофон с такими диаграммами направленности и чувствительностью, которые обеспечивают наилучшие результаты в работе. Например, когда нужно передать голоса сидящих за круглым столом собеседников, очевидно, самым удобным окажется микрофон с круговой диаграммой направленности.

Для передачи беседы людей, сидящих внавал, наиболее подходит микрофон с диаграммой направленности в виде восьмерки. Двусторонне-направленный микрофон значительно ослабляет мешающее действие шума от источников, расположенных сбоку от беседующих. Но двусторонне-направленный микрофон нежелательно приближать к источнику звука, предел — 30–50 см, так как у всех приемников градиента давления на близких от источника звука расстояниях повышена чувствительность к низким частотам звукового диапазона. Этот так называемый эффект ближней зоны при неумелом использовании микрофона может стать причиной заметных частотных искажений, выражающихся в подчеркивании низких звуковых частот и характерном «бубнении».

При записях и передачах художественных программ широко применяются микрофоны с кардионными диаграммами направ-

ленности, т.е. односторонне-направленные. Оси их максимальной чувствительности ориентируют на отдельные источники звука так, чтобы с помощью нескольких микрофонов создавать разные звуковые планы для отдельных исполнителей, искусственно подбирать микшированием нужный баланс громкостей, устраняться от воздействия отраженных звуковых волн и др.

Остронаправленные, гиперкардионные микрофоны очень удобны, когда речь идет о репортажах из помещений с высоким уровнем собственных шумов, например из заводских цехов, с улиц, со стадионов и т.п. Такие микрофоны, размещенные относительно близко к выступающим, при правильной их ориентации обеспечивают заметное преобладание голоса над посторонним шумом и хорошую разборчивость речи при прослушивании передачи.

## Классификация микрофонов

По способу преобразования акустической энергии в электрическую применяемым в настоящее время микрофоны подразделяются на несколько основных типов.

**Индукционные микрофоны** — это преобразователи акустической энергии в электрическую, в которых используется явление электромагнитной индукции — возникновение электродвижущей силы при движении проводника в постоянном магнитном поле. Конструктивно индукционные микрофоны выполняются либо с подвижной катушкой (*динамические*), либо с подвижной лентой (*ленточные*). Несмотря на общий принцип работы, динамические и ленточные микрофоны существенно различны по своим эксплуатационным характеристикам. В настоящее время ленточные микрофоны в профессиональных студиях используются довольно редко, поэтому в дальнейшем под микрофонами, работающими на основе электромагнитной индукции, будем понимать исключительно динамические.

**Конденсаторные, или электростатические, микрофоны** используют естественную зависимость емкости конденсатора от перемещений его подвижной пластины под действием звуковых колебаний.

**Электретные микрофоны** — по сути, разновидность конденсаторных. Они появились относительно недавно, когда стали доступными электретные материалы — диэлектрики, которые после специальной обработки способны нести электрические заряды, иначе говоря, приобрели свойства, присущие предварительно заряженному конденсатору.

В пьезоэлектрических, или кристаллических, микрофонах используется пьезоэлектрический эффект. Сущность эффекта — в возникновении электрических зарядов на поверхности кристаллов некоторых веществ (например, сегнетовой соли) при их деформации под воздействием какого-либо давления, в том числе звукового. Величина этих зарядов, а следовательно, и электрические напряжения на противоположных гранях пьезоэлемента пропорциональны деформирующей силе.

В электромагнитных микрофонах используется эффект изменения магнитного потока при смещениях в нем некоторого подвижного элемента (якоря).

А действие угольных микрофонов основано на известном свойстве угольного порошка менять сопротивление в зависимости от силы сжатия порохника мембраной, колеблющейся под воздействием звукового давления. Пьезоэлектрические, электромагнитные и угольные микрофоны из-за низкого качества передачи звука (узкий диапазон воспроизводимых частот с большой неравномерностью частотной характеристики, повышенный уровень собственных шумов угольных микрофонов и т.п.) в настоящее время используются в основном только для оперативной связи и в любительских целях. В радиовещании и профессиональной звукозаписи широкое применение нашли динамические (катушечные), конденсаторные и электретные микрофоны.

Остановимся более подробно на их характеристиках.

### Динамические микрофоны

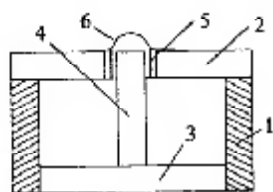


Рис. 24. Динамический (катушечный) микрофон:

1 — постоянный магнит; 2 — верхний фланец; 3 — нижний фланец; 4 — центральный стержень; 5 — катушка; 6 — диафрагма

Магнитная система микрофона с подвижной катушкой — цилиндрический постоянный магнит и магнитопровод, изготовленный из стали (рис. 24). Магнитопровод собран из центрального стержня и двух фланцев. В кольцевом зазоре между отверстиями в верхнем фланце и круглым центральным стержнем помещена подвижная катушка, намотанная на специальный каркас. Используется тонкий (до 0,02 мм) медный или алюминиевый провод. Катушка жестко связана с легкой куполообразной

диафрагмой, которая с помощью гибкого гофрированного воротника прикреплена к неподвижной части микрофона. Под действием звуковой волны она может свободно колебаться в осевом направлении, увлекая за собой катушку. В кольцевом зазоре магнитной системы действует радиальное магнитное поле. При движении катушки в этом поле ее витки пересекают магнитные силовые линии, поэтому в ней возбуждаются переменные индукционные токи. Напряжение, возникающее на выводах подвижной катушки микрофона, передается по экранированному кабелю на микрофонный усилитель.

К достоинствам динамических микрофонов можно отнести: прочность, небольшие размеры и массу, относительно малую по сравнению с другими микрофонами восприимчивость к вибрациям и тряске и другие свойства, дающие возможность использовать этот тип микрофона как в студиях, так и во внестудийных условиях при записи открытых концертов и репортажей. По характеристикам направленности динамические микрофоны делятся на ненаправленные (круговая диаграмма) и односторонненаправленные (диаграмма направленности — кардиоиды).

И те и другие работают в широком интервале частот (от 50 до 16 000 Гц). Их отличает небольшая неравномерность частотной характеристики, хорошая чувствительность — примерно 1,7 мВ/Па. Но их можно различить даже по внешнему виду: микрофоны ненаправленного действия (приемники давления) имеют доступ звуковых волн только с одной стороны. Это типичные приемники давления. В конструкции односторонненаправленного (кардиоидного) микрофона предусмотрены специальные акустические каналы, частично пропускающие звуковые волны к тыльной стороне диафрагмы. Благодаря этому часть диафрагмы работает как приемник давления, а часть — как приемник градиента давления. Суммарная же диаграмма направленности подобной системы имеет вид кардиоиды.

### Конденсаторные микрофоны

Конденсаторный микрофон — это электроакустический преобразователь емкостного типа (рис. 25). Звукоприемник такого микрофона — плоский воздушный конденсатор. Одна из его пластин массивна и неподвижна, вторая, напротив, легка и упруга. Расстояние между пластинами 20–40 мкм. На легкую пластину воздействуют звуковые волны, заставляя ее перемещаться. Эта подвижная пластина играет в микрофоне роль мембраны. К пластинам приложено постоянное (поляризующее) напряжение, величина



Рис. 25. Схема конденсаторного микрофона:

$C$  — капсюль-конденсатор;  $R_L$  — сопротивление нагрузки;  $U_0$  — источник постоянного поляризующего напряжения;  $i$  — сигнал, снимаемый с сопротивления нагрузки;  $P$  — звуковое давление

ется, и конденсатор разряжается через источник питания. При этом зарядно-разрядный ток проходит через сопротивление нагрузки, величина которого — 100 МОм и больше. Сопротивление конденсатора переменному току, как любое емкостное, растет с понижением частоты. Так, на частоте 50 Гц оно достигает 30 МОм. Поэтому сопротивление нагрузки и выбирается столь большим: это позволяет ослабить его шунтирующее воздействие на низких частотах и в конечном итоге выравнять на этих частотах чувствительность микрофона.

При прохождении тока на сопротивлении нагрузки создается переменное напряжение, изменения которого являются электрическим отображением изменений звукового давления, действующего на мембрану конденсаторного микрофона. Однако большая величина сопротивления нагрузки исключает возможность обычного присоединения микрофона к усилителю с помощью кабеля. Даже сравнительно короткий кабель (1,5–2 м) резко снижает чувствительность микрофона (особенно на высоких звуковых частотах) и становится причиной возрастания уровня шума и помех, наводимых на микрофонные цепи. Поэтому в непосредственной близости от конденсатора (в одном с ним корпусе) размещается согласующий усилительный каскад, собранный на электронной лампе или полевом транзисторе. С выхода этого каскада через выходной трансформатор напряжение по кабелю подается на вход микрофонного усилителя. Для питания лампы или транзистора согласующего каскада и подачи на капсюль поляризующего напряжения конденсаторный микрофон имеет специальный выпря-

митель. Выпрямитель (блок питания) ламповых микрофонов (отметим, что интерес звукорежиссеров к ним в последнее время растет) — это отдельное устройство, которое обычно удалено от микрофона и присоединяется к нему с помощью многожильного кабеля.

Для питания транзисторных схем конденсаторных микрофонов применяются сухие батареи, размещаемые в корпусе микрофона. Однако в студийных условиях вместо автономного обычно используется электропитание, поступающее с центрального пункта управления, например непосредственно с микшерного пульта. При этом питающий ток может подводиться к микрофону по сигнальным проводам, передающим звуковые сигналы от микрофона к пульту, с помощью специальных цепей «фантомного» питания.

Конденсаторные микрофоны широко применяются в профессиональной звукозаписи и в звуковом художественном вещании. Их отличает высокая чувствительность (10–15 мВ/Па), широкая полоса воспроизводимых частот, равномерная частотная характеристика. Особо следует отметить чрезвычайно ценную с позиций эксплуатации возможность изменения характеристик направленности блока питания, который размещается непосредственно в аппаратной. Для этого применяются акустически комбинированные приемники звука — капсюли, имеющие для подвижных электрода. Эти электроды — мембраны из высокополимерной пленки с покрытием из молекулярного слоя золота, натянутые на круглые обода. Такие пленочные мембраны — подвижные электроды конденсатора. Между пленками размещен неподвижный электрод с глухими отверстиями, увеличивающими чувствительность устройства, и сквозными каналами, соединяющими друг с другом воздушные объемы под мембранами (рис. 26).

Меняя способы включения капсюля конденсаторного микрофона, можно формировать самые разные диаграммы направленности. Например, в электрическую цепь включена только одна из мембран, именно на нее и на неподвижный электрод подается поляризующее напряжение  $U$ . Вторая

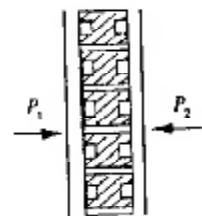


Рис. 26. Акустически комбинированный капсюль конденсаторного микрофона:  $P_1$  и  $P_2$  — звуковое давление с фронта и тыла микрофона



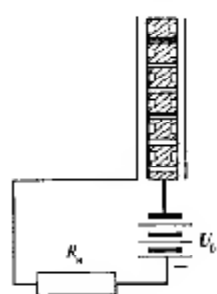


Рис. 27. Схема включения акустически комбинированного капсюля при формировании кардиоидной диаграммы

ся, на низших и средних частотах). Иными словами, мембраны, преодолевая упругость заключенного между ними воздуха, сближаются или отдаляются, но всегда перемещаются в противоположных направлениях.

Вместе с тем мембраны и заключенный между ними воздух можно рассматривать как единую механическую систему связанных поршней. Если звуковые волны из-за различия расстояний до источника звука приходят к левой и правой мембранам не одновременно (со сдвигом по фазе), то давление, действующее на ту и другую мембраны, не одинаково. За счет этой разницы давлений возникает усилие, перемещающее всю систему в сторону меньшего давления. В результате одна из мембран приближается к неподвижному электроду, а другая отдаляется. Разница давлений со стороны фронта и тыла микрофона (градиент давления) зависит, как уже было сказано, от исходного направления звуковой волны. Она максимальна, если звук приходит перпендикулярно плоскости мембраны, и равна нулю, если источник звука находится от микрофона сбоку (в этом случае путь, проходимый волной к фронту и тылу микрофона, одинаков, и разницы между давлениями нет). Таким образом, рассматривая капсюль как приемник градиента давления, можно предположить, что он будет иметь диаграмму направленности в виде восьмерки. В действительности обе составляющие колебательного движения мембран, складываясь между собой, придают капсюлю кардиоидную диаграмму направленности, т.е. делают его односторонне направленным.

мембрана отключена и в создании напряжения на выходе микрофона не участвует (рис. 27). В этом случае капсюль имеет кардиоидную диаграмму направленности и представляет собой комбинированный приемник давления и градиента давления.

Действительно, любое перемещение подвижных электродов-мембран можно представить как сложение двух колебаний: одно определяется звуковым давлением и пропорционально ему, второе — разностью давлений с фронта и тыла микрофона. Перемещения мембран, вызванные звуковым давлением, противофазны, так как звуковое давление и с фронтальной и с тыловой стороны микрофона одинаково (разумеется,

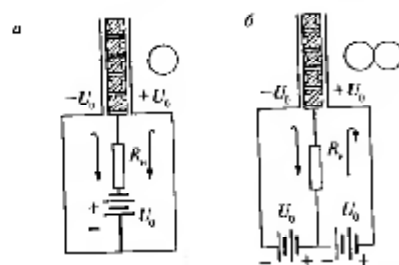


Рис. 28. Схема включения двухмембранного капсюля: а — круговая диаграмма направленности; б — диаграмма направленности в виде восьмерки

Конкретная диаграмма направленности микрофона формируется в зависимости от способа подключения к капсюлю источника поляризующего напряжения. Покажем это на примере.

Пусть в электрическую цепь включена только левая мембрана. Правая при этом также колеблется, однако она не включена в электрическую цепь и не участвует в создании напряжения на выходе микрофона. Таким образом, за счет электрической асимметрии микрофона достигается кардиоидная диаграмма направленности. Обе мембраны, насколько это возможно конструктивно, одинаковы, поэтому, переключая поляризующее напряжение на правую мембрану, можно развернуть рабочую сторону кардиоиды на  $180^\circ$  или, что то же самое, перенести фронт микрофона на другую сторону.

Итак, акустически комбинированный капсюль — это, по сути, два равноценных односторонне направленных приемника звука. Если поляризующие напряжения поданы на обе мембраны, присоединенные к общей нагрузке, то, меняя полярность приложенного к мембранам напряжения, можно формировать различные диаграммы направленности капсюля.

Действительно, если по отношению к неподвижному электроду обе мембраны находятся под напряжением одинакового знака, то в общей нагрузке при любом расположении источника звука формируются синфазные напряжения. Микрофон работает в этом случае как ненаправленный, его диаграмма направленности — круг (рис. 28, а). Если же одна мембрана по отношению к неподвижному электроду находится под отрицательным потенциалом, а другая — под положительным, то переменные напряжения звуковой частоты, возникающие в нагрузке в результате колебаний левой и

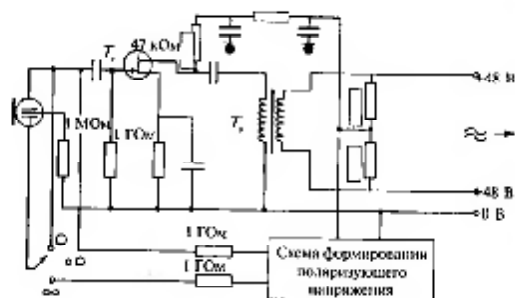


Рис. 29. Упрощенная схема переключения диаграмм направленности конденсаторного микрофона

правой мембран, противофазны. Диаграмма направленности конденсаторного микрофона в этом случае — восьмерка (рис. 28, б).

Рассмотрим упрощенную схему переключения диаграмм направленности конденсаторного микрофона, которая, в частности, применялась в широко известных микрофонах U 87 Ai фирмы *Georg Neumann*, Германия (рис. 29).

Усилительный каскад этого микрофона собран на полевом транзисторе; питание усилителя и поляризующее напряжение на капсулю поступает на микрофон по «фантомной» схеме, т.е. по тем же проводам, по которым от микрофона к пульта звукоинженера передается сигнал звуковой частоты.

В последние годы широкое применение нашли *электретные микрофоны*, в которых используются некоторые диэлектрики, на поверхности которых после специальной обработки (нагрев и воздействие сильного электрического поля) появляются заряды. Эти материалы — электреты — применяются как диэлектрическое заполнение конденсатора, что позволяет формировать поляризующее напряжение на капсуле без подключения к посторонним источникам питания. В этом случае электрическая энергия необходима лишь для питания усилителя.

При работе с конденсаторными микрофонами не следует забывать некоторые их специфические особенности. Так, во время работы капсуля находится под напряжением, поэтому двигать и переставлять микрофон рекомендуется только при отключенном питании. Иначе сотрясения могут привести к пробое конденсатора, и микрофон выйдет из строя. По той же причине ни в коем случае не следует дуть в микрофон (обычный «испытательный тест»

перед работой!). Лучше слегка поводить ногтем по корпусу микрофона или же негромко произнести несколько слов на расстоянии 10–15 см от него.

### Использование микрофонов

Вопрос о количестве, технических характеристиках и расстановке используемых при записи микрофонов — один из наиболее важных, но вместе с тем и наиболее сложных вопросов, стоящих перед звукоинженером в процессе его повседневной работы. К сожалению, практика показала, что часто приводимые в литературе схемы расстановки микрофонов для звукопередачи тех или иных программ не могут быть приняты как абсолютные. Они, как правило, имеют только информационное значение, позволяя ознакомиться с основными принципами микрофонной работы. Дело в том, что акустические параметры студий настолько различны, а задачи звукоинженеров так многообразны, что в каждом конкретном случае лишь тщательные микрофонные репетиции в том помещении, из которого предполагается вести запись, могут помочь получить желаемые результаты. Разумеется, значительно легче добиться хорошего звучания, имея достаточный опыт эксплуатации данной студии, изучив ее особенности и влияние акустических свойств на звучание различных музыкальных инструментов и ансамблей разного состава.

Поэтому весьма полезна пресметственность в звукоинженерской работе, обмен опытом между звукоинженерами и обобщение этого опыта применительно к конкретным задачам. Однако многолетний опыт проведения звукозаписей разных форм в различных по акустике студиях позволяет дать звукоинженерам некоторые общие рекомендации по использованию микрофонов.

Прежде всего, для качественного звучания передач следует строго соблюдать нормы заполнения студии исполнителями. Наряду с этим надо иметь в виду, что хотя акустические свойства студии важны для получения высокого качества звучания, не только они определяют успех работы звукоинженера.

В каждой точке студии, где установлен микрофон, на него влияют энергия прямого звука  $W_{пр}$ , действующего на микрофон непосредственно прямым лучом (эта энергия уменьшается пропорционально квадрату расстояния от источника звука), и энергия диффузного (рассеянного) звука  $W_{диф}$  как результат большого числа отражений звуковых волн от преград. Эта составляющая звуковой энергии от точки к точке студии, как правило, не меняется.

В связи с этим большое значение имеет правильность подбора на микрофонных репетициях **акустического отношения**, под которым понимают соотношение между отраженными и прямыми звуками в какой-либо точке студии ( $A = W_{\text{отп}}/W_{\text{пр}}$ ). А это отношение зависит от расстояния микрофона до источника звука.

Наш слух различает обе составляющие звукового поля и определенным образом воспринимает соотношение между ними. Но слушатель, находящийся непосредственно в студии, благодаря бинауральному восприятию звука может определить направление прямых звуковых волн, сосредоточить свое внимание на их приеме и отстроиться от восприятия отраженных волн. Радиослушатель же лишен подобной слуховой избирательности, так как микрофон «слышит» как бы одним ухом и принятым им сумма прямых и отраженных звуков воспроизводится из одной точки — громкоговорителя. В этом случае естественность звучания, тембр и впечатление о реверберации помещения зависят от акустического отношения в значительной большей степени, чем при естественном прослушивании.

При установке микрофона на близком расстоянии от исполнителя, когда акустическое отношение невелико ( $A = W_{\text{отп}}/W_{\text{пр}} < 1$ ), т.е. когда преобладает прямой звук, а действие отраженных волн ничтожно, реверберация на слух кажется значительно меньшей, чем на самом деле; даже в гулком большом помещении этим приемом удается создать четкое «сухое» звучание, соответствующее, как говорят, близкому или крупному звуковому плану.

Располагая микрофон на значительном расстоянии от исполнителя, можно попасть в зону, где влияние отраженных звуков (диффузного поля) значительно больше, чем прямых ( $A = W_{\text{отп}}/W_{\text{пр}} > 1$ ). Тембр звучания в этом случае изменится, оно будет более гулким, размытым, передача пойдет дальним звуковым планом, и субъективное ощущение реверберации значительно увеличится. Этим приемом пользуются, например, в сильно заглушенных помещениях, ставя один из микрофонов далеко от исполнителей для придания звучанию пространственности («воздушности»). Таким образом, в то время как реверберация студии практически неизменя, выбирая место микрофона относительно исполнителя, можно изменять акустическое отношение и, следовательно, зависящее от него субъективное ощущение реверберации.

Субъективное ощущение реверберации, зависящее от соотношения прямых и отраженных звуков в данной точке студии, называют **эквивалентной реверберацией**. Умело используя этот эффект, можно даже в обычной монофонической передаче в какой-то степени восполнить потерю звуковой перспективы (т.е. объемности звучания). Это достигается применением нескольких микрофо-

нов и подбором нужных звуковых планов для отдельных исполнителей.

Например, чтобы звуковая картина не была плоской, а воспринималась протяженной в глубину, бывает полезно выделить крупным планом солиста (для этого микрофон устанавливается на близком от него расстоянии) на фоне аккомпанемента, воспроизводимого через более отдаленный микрофон и поэтому воспринимаемого с более далекого расстояния, как бы из глубины сцены. Такая многоплановость звукопередачи делает звучание более естественным и приятным.

Таким образом, *расположение и количество микрофонов в студии зависят от реверберации помещения, характера передачи и характеристик микрофонов.*

Многие звукорежиссеры предпочитают вести запись даже крупных исполнительских коллективов, обходясь минимальным количеством микрофонов (и в некоторых случаях это может обеспечить естественную передачу тембров и ясность музыкальной фактуры). Однако добиться таким образом удовлетворительного музыкального баланса и прозрачности звучания, как правило, не удастся (особенно при монофонической системе передачи). Трудности здесь возникают в первую очередь из-за взаимной маскировки сигналов, проявляющейся при микрофонной передаче в большей степени, чем в натуре. Они могут также усугубиться недостатками акустики студии, качеством исполнения и, наконец, инструментарной (аранжировкой) данного музыкального произведения, неудобной для записи.

Чтобы иметь возможность активно влиять на качество передаваемой звуковой картины, звукорежиссер вынужден обычно устанавливать в студии большое количество микрофонов (иногда при передаче произведений крупных форм — до 30–40 штук) для разных групп исполнителей, чтобы получить с помощью индивидуальных регуляторов уровня на микшерном пульте необходимый музыкальный баланс. Правда, при этом надо иметь в виду, что звуковой сигнал от одного и того же источника может воздействовать не только на свой, близко расположенный микрофон, но и на соседние микрофоны, установленные у других оркестровых групп. Так как расстояния от данного источника до микрофонов различны, то излучаемые им звуковые колебания придут к микрофонам не одновременно и, следовательно, с разными фазами.

Например, если данный источник наряду с прочими гармониками излучает звуковую волну с частотой 100 Гц (что соответствует длине волны  $\lambda = C/f = 340/100 = 3,4$  м), то у двух микрофонов, установленных в точках, расположенных друг от друга на расстоя-

нии, равном половине длины волны (т.е. 1,7 м в направлении распространения звука), звуковое давление в каждый данный момент времени будет противофазно: максимальное сжатие воздушной среды у одного микрофона и разрежение у другого. Естественно, и электрические сигналы в цепях этих двух микрофонов окажутся противофазными, и после их смешивания в тракте микшерного пульта (в результате интерференции колебаний) результирующий сигнал будет существенно ослаблен и выпадет из общего спектра звуковой информации. Это послужит причиной искажения тембра звучания.

Не следует забывать также, что отраженные от стен помещения сигналы любого источника звука воздействуют на все установленные в студии микрофоны. Поэтому регулировка уровня (микширование) любого из микрофонных сигналов неизбежно сказывается не только на тембре, но и на звуковых планах всех остальных инструментов, так как они зависят от соотношений между прямыми и отраженными сигналами.

Избежать отмеченных недостатков, связанных с применением полимикрофонной (многомикрофонной) системы передачи, удается с помощью акустического разделения отдельных источников благодаря специальному размещению исполнителей, использованию односторонне-направленных микрофонов, расположенных на близких от исполнителей расстояниях, а также установке в студии акустических щитов (ширм), оказывающих экранирующее действие и отделяющих одну группу исполнителей со своими микрофонами от других. Для этого микшерный пульт должен иметь большое число микрофонных входов с возможностью не только раздельной регулировки уровней передаваемых сигналов, но и их дополнительной индивидуальной обработки с помощью частотной коррекции, ограничения, компрессирования, использования искусственной реверберации. Только в результате таких действий достигаются оптимальный баланс и естественность звучания оркестра.

## § 2. Стерефония

### Преимущества двухканальной стереофонической системы

Вряд ли надо сейчас доказывать, что стереофоническое звучание по сравнению с монофоническим способно в значительно большей степени приблизить звучание к естественному — «живо-

мую», как бы перенести слушателя в то помещение, где исполняется данное произведение, не говоря уж о достаточно сложных многоканальных системах воспроизведения звука *Surround Sound* (о них разговор пойдет далее). Даже привычная сегодня двухканальная стереофония за время своего существования хорошо себя зарекомендовала и полностью завоевала потребительский рынок.

Пытаясь определить главную причину предпочтения слушателями стереофонического звучания монофоническому, проще всего предположить, что этому способствует в первую очередь субъективно воспринимаемая *локализация кажущихся источников звука*, т.е. возможность определить, как они расположены в пространстве. Это достоинство стереофонии ярче всего проявляется при записи спектаклей (см. Приложение 2). На радио, где видеоряд отсутствует, стереофония позволяет звукоинженеру с помощью правильно построенных звуковых мизансцен в известной мере дополнить общее впечатление о сценическом действии и благодаря имитации перемещений исполнителей по сцене сделать образ более «зримым». А на телевидении с помощью стереофонии удается припестить звукояд в пространственное соответствие с «картинкой» и за счет этого усилить эстетическое воздействие передачи на зрителя.

Преимущества стереофонии обнаруживаются весьма отчетливо и при воспроизведении полифонической музыки — симфонической и эстрадной. И в этом случае монофоническое и стереофоническое звучание уверенно различается по качеству. Однако здесь гораздо чаще искушенный слушатель отмечает не локализацию отдельных инструментов в пространстве, а так называемый *эффект присутствия* — ощущение акустической обстановки концертного зала, куда переносит слушателя стереофоническая запись, если она сделана квалифицированным звукоинженером.

Кроме того, при стереофоническом воспроизведении неизменно обращает на себя внимание и еще одно свойство звучания, которое называют *прозрачностью*, когда слушатель в состоянии отчетливо выделить из общей звуковой массы партию того или иного инструмента и даже отличить друг от друга унисоны разных инструментов. На первый взгляд может показаться, что прозрачность звучания связана только с локализацией источников в пространстве.

Действительно, локализация источников способствует улучшению разборчивости соответствующих сигналов и помогает настроиться на один из многих одновременно звучащих источников, разнесенных в пространстве. И это — одна из удивительных особен-

ностей человеческого слуха. Однако, слушая симфоническую музыку в зале, в удалении от оркестра, когда отраженная звуковая энергия значительно преобладает над прямой, мы локализуем звуковой образ лишь в направлении эстрады, ощущаем только угловую ширину звуковой картины и, может быть, расположение ее центра, но не можем отчетливо определить взаимное расположение отдельных инструментов. Звуковой образ воспринимается как сложно разветвляющийся во времени многообразие и в то же время расчленение на более простые составляющие, соответствующие партиям отдельных инструментов и групп.

Попробуем разобраться, чем этот эффект обусловлен.

При прослушивании музыки в концертном зале сигналы, принимаемые левым и правым ухом, не тождественны, несмотря на высокую степень их сходства. Осциллограммы этих сигналов после приведения к общему началу и масштабу могут не совпадать. Это связано с незначительными различиями временной структуры и фаз сигналов в двух близких, но все же пространственно разделенных точках поля, в которых располагаются приемники сигналов, уши. Причем от степени этого различия зависит и восприятие общей звуковой картины.

Например, различие по структуре сигнала, в частности по множественным соотношениям их фаз, сильнее для звуков двух расположенных по краям оркестра инструментов или для отраженных от стен студии сигналов. Это различие уменьшается при одновременном приеме левым и правым ухом с небольшой задержкой по времени сигналов от одного и того же инструмента. В последнем случае фазы сигналов имеют между собой жесткие статистические связи, а так как слух человека обладает определенной накопительной способностью (слуховой памятью), принимаемая информация усредняется, сравнивается слуховым анализатором, обогащается, благодаря этому обостряется чувство формы сигнала, и звук воспринимается слитно, в виде локального образа.

Тому обстоятельству, что прозрачность звучания в некоторых случаях сохраняется и в отсутствие четкой локализации отдельных элементов ансамбля, мы, очевидно, обязаны тем, что наш слуховой анализатор (ухо — кора головного мозга) способен различать издаваемые источниками сигналы по их «форме». Можно сказать, что эстетическое восприятие музыки должно включать в себя такое разделение сигналов, воспринимаемых правым и левым ухом, которое позволяет слушателю из первых рядов зала или от пульта дирижера уверенно различить отдельные инструменты, расположенные в разных точках пространства.

Под формой звукового сигнала следует понимать совокупность всех его признаков, благодаря которым слушатель предугадывает — иногда правильно, иногда с ошибкой — неизвестный ему последующий ход сигнала, сохраняя в кратковременной памяти ход ранее принятых элементов сообщения. Происходит как бы экстраполяция «прошлого» в «будущее», и это возможно лишь в том случае, когда звуковой сигнал несет информацию, в данном случае эстетическую, а не является бесформенным широкополосным шумом.

Выделяя из сложной звуковой ткани партию того или иного инструмента, мы вслушиваемся в звучание музыки и анализируем ее, зачастую подсознательно. При этом мы подмечаем те элементы, которые связываются в непрерывно экстраполируемые последовательности.

Таким образом, наряду с динамическими и спектральными характеристиками сигналов немалый интерес представляют их так называемые **корреляционные функции**, отображающие статистическую (усредненную за некоторый отрезок времени) связь между двумя зависимыми друг от друга сигналами (взаимная корреляция) или между сигналом и его запаздывающим повторением (автокорреляция).

Действительно, если исходить из того, что в основе звукопеленгации, т.е. определения расположения источника звука, лежит сложение образов, создающихся в левом и правом каналах органа слуха, а оно, в свою очередь, принципиально невозможно, если фазы находятся в произвольных соотношениях (например, два разных инструмента или отражения сигнала слева и справа), то звук в этом случае не локализуется, а кажется «разлитым» в пространстве. При полной, с точностью до фазы, идентичности сигналов образ представляется расположенным прямо перед слушателем, на линии головы. Следовательно, механизм звукопеленгации сводится к сравнению левого и правого сигналов по взаимному сопоставлению их фаз, т.е. к уже упомянутым корреляционным способам обнаружения и локализации звукового образа.

Недостатки монофонической передачи, при которой утрачиваются эти важные свойства натурального восприятия звуковой информации, в известной степени могут быть восполнены при стереофоническом воспроизведении. В этом случае несовпадения фаз сигналов, принимаемых двумя ушами и определяющих специфику бинаурального слуха, имитируется благодаря различию сигналов, передаваемых по двум стереофоническим каналам.

## Принцип работы стереофонической системы

Основной принцип, заложенный в основу двухканальной стереофонической передачи, заключается в том, что два одинаковых по уровню и совпадающих между собой с точностью до фазы сигнала, излучаемые одновременно двумя, расположенными на некотором расстоянии друг от друга громкоговорителями, воспринимаются слушателем как слитный звуковой образ, находящийся как бы между громкоговорителями. (По принятой терминологии, расстояние между громкоговорителями называют *базой*.)

Причем, меняя соотношения уровней левого и правого стереофонических сигналов, можно создать ощущение перемещения кажущегося источника по базе в сторону большего уровня. Этот же эффект достигается, если ввести в один из каналов задержку по времени, настолько малую, что не нарушить корреляционные связи между фазами канальных сигналов. Ощущение сдвига кажущегося источника в сторону громкоговорителя, излучающего опережающий сигнал, называется *эффектом предвращения*, или, по имени акустика, обнаружившего это свойство слуха, — *эффектом Хааса*.

Основные эстетические свойства стереофонического воспроизведения, которые делают этот вид передачи предпочтительным по сравнению с монофоническим, можно кратко сформулировать следующим образом:

- локализация отдельных компонентов ансамбля в пространстве, определение их взаимного расположения по фронту, ощущение ширины звуковой картины;
- хорошая различимость отдельных инструментов в ансамбле, уменьшение эффекта взаимной маскировки сигналов и, как следствие этого, улучшение прозрачности звучания и правильность передачи тембров;
- более естественная передача акустической обстановки (амбиенции), существовавшей в студии при исполнении, за счет того, что отраженные сигналы, передаваемые по левому и правому стереофоническим каналам, не совпадают между собой по фазам, подчиняющимся случайному закону распределения. Это соответствует фазовым соотношениям сигналов, приходящих при естественном прослушивании к левому и правому уху слушателя, и поэтому создают, по выражению психологов, «эффект присутствия».

Все это и называют *стереозффектом*, т.е. комплексом эстетических качеств стереофонической записи, отличающих ее от одноканальной — монофонической.

## Требования, предъявляемые к стереофоническим системам

Стереофоническая система звукопередачи имеет ряд существенных особенностей по сравнению с обычной монофонической.

К электрическому тракту стереофонической передачи предъявляются некоторые дополнительные требования:

- различие коэффициентов передачи сигналов в обоих каналах не должно превышать определенной малой величины во всем рабочем диапазоне частот;
- между каналами должно быть достаточное переходное затухание, чтобы не допустить проникновения сигналов из одного канала в другой;
- соотношения фаз сигналов на выходе тракта должны быть теми же, что и на входе.

Невыполнение первого условия повлечет за собой перекося звуковой картины, например, кажущийся сдвиг центра оркестра к краю базы. Недостаточное переходное затухание между каналами и, как следствие этого, прослушивание левого сигнала через правый громкоговоритель, наоборот, резко ухудшает отчетливость локализации, сужает базу, делает звучание малостереофоничным.

По первостепенное значение имеют правильная фазировка стереофонических трактов и идентичность их фазовых характеристик, что обеспечивает **совместимость** передачи, обязательное и очень важное требование к стереофонической звукопередаче и соответственно стереофонической фонограмме. Под **совместимостью стереофонической фонограммы** понимается возможность ее воспроизведения в монофоническом канале (в котором суммируются сигналы как левого, так и правого канала) с сохранением всех технических и художественных свойств записи, за исключением лишь специфической для стереофонии пространственной локализации отдельных звуковых источников. Уровень воспроизведения, музыкальный баланс, прозрачность, тембральная окраска звучания и другие свойства записи должны при этом сохраниться.

Совместимость стереофонических записей и передач необходима для того, чтобы при параллельном существовании двух систем — стерео и моно — слушатели, располагающие обычными монофоническими приемниками, могли бы прослушивать пере-

даваемые в эфир стереофонические записи с удовлетворительным качеством, потеряв при этом лишь эффект стерео.

При стереофонической передаче звука от инструментов, находящихся в центре ансамбля, воздействуют на микрофоны таким образом, что в левом и правом каналах создаются синфазные электрические сигналы. Если на выходах тракта передачи между ними возникнет сдвиг фаз, то это приведет к тому, что при суммировании сигналов для получения монофонической версии передачи в результате интерференции колебаний произойдет усиление одних и ослабление других гармонических составляющих.

В самых неблагоприятных случаях несовместимость может выражаться наряду с искажениями тембров музыкальных инструментов в снижении общего уровня передачи и даже в пропадании некоторых голосов в ансамбле.

## Микрофонные стереофонические системы

Реализация стереофонической передачи осуществляется несколькими способами. Например, при помощи микрофонной системы АВ.

Допустим, имеются два (или несколько, объединенных в две группы) обычных монофонических микрофона, расставленных по фронту перед исполнителями (например, оркестром) и воспринимающих звуковые волны, исходящие от одних и тех же инструментов с разными фазами, зависящими от того, на каком расстоянии от источника звука расположен данный микрофон. Так, если скрипки располагаются в оркестре слева, а контрабасы — справа, то левый микрофон с опережением во времени воспринимает звуки скрипок, а правый — звучание контрабасов. Источник звука, например солист, стоящий в середине оркестра между микрофонами и на одинаковом от них расстоянии (на так называемой акустической оси), воздействует на оба приемника звука одновременно и с одинаковой силой и вызывает в цепях обоих микрофонов синфазные (совпадающие по фазам) сигналы (рис. 30).

Если разделить ирешать звуки от левого и правого микрофонов по двум каналам передачи и воспроизводить их соответственно через два громкоговорителя, то слушатель, находящийся перед громкоговорителями на одинаковом от них расстоянии, будет ощущать звуки скрипок исходящими от левого громкоговорителя, контрабасов — от правого, а солиста — из точки, расположенной точно между громкоговорителями. Эффект локализации обуславливается в этом случае разностью во времени прихода к слушателю

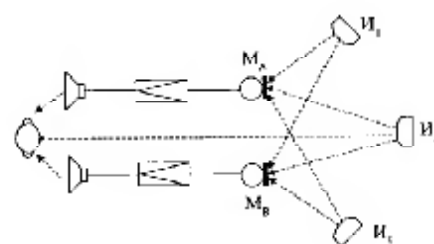


Рис. 30. Стереофоническая система АВ:  
 $I_1, I_2, I_3$  — источники звука;  $M_A, M_B$  — микрофоны

для звуковых сигналов слева и справа в каждый момент благодаря эффекту Хааса. Поэтому система АВ — система временной, или фазовой, стереофонии.

Использование в системе АВ микрофонов направленного действия при соответствующей их ориентации может увеличить разницу во времени прихода и в интенсивности приходящих к левому и правому микрофонам сигналов, что сделает локализацию отдельных источников еще более отчетливой.

В некоторых случаях (при сравнительно небольших ансамблях) стереофоническая запись с помощью двух обычных монофонических микрофонов по системе АВ дает неплохие результаты: четкую локализацию инструментов на базе и хороший стереоэффект. Но вследствие различия во времени прихода звуковых волн от исполнителя к двум находящимся на разных расстояниях микрофонам фазы сигналов будут различаться. А это (в случае неблагоприятных фазовых соотношений) может при монофоническом воспроизведении фонограммы (т.е. сложении правого и левого сигналов) стать причиной интерференционных искажений, приводящих к несовместимости. Поэтому звукорежиссер в процессе записи должен проверять ее совместимость по приборам (об этом будет рассказано) и путем выборочного прослушивания суммы правого и левого сигналов с помощью одного громкоговорителя.

Впечатление локализации источников звука, т.е. левой и правой сторон звукового изображения, можно обеспечить и с помощью разности интенсивностей, воздействующих на микрофоны сигналов (это так называемая интенсивностная стереофония). Для реализации совместимой системы интенсивностной стереофонии применяется микрофонная система ХУ, когда используются стереофонические совмещенные микрофоны (рис. 31).



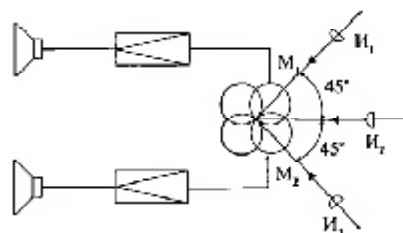


Рис. 31. Стерефоническая система XY

По этой системе два микрофона направленного действия конструктивно объединены так, чтобы чувствительные элементы были расположены на одной вертикали и по возможности ближе друг к другу. Оси максимальной чувствительности двух акустических систем ортогональны или, во всяком случае, находятся под определенным углом друг к другу, чтобы линия, делящая угол между этими осями пополам, была направлена на условный центр записываемого исполнительского коллектива по его акустической оси. Диаграммы направленности и чувствительности обоих приемников звука должны быть одинаковыми.

Например, оба микрофона могут иметь кардиоидные характеристики направленности или должны быть двусторонненаправленными (диаграммы в виде восьмерки). Так как микрофоны при этом находятся практически в одной точке, звуковые волны приходят к ним одновременно при любом расположении источника звука, и различия в фазах сигналов в обоих каналах нет. Однако, когда падение звуковых волн на приемники звука направленного действия несимметрично, величины напряжения на выходах микрофонов будут не одинаковыми. Различие тем больше, чем больше угол, под которым по отношению к акустической оси симметрии воздействовал звук. Вследствие этого при прослушивании создается впечатление локализации отдельных источников и протяженности исполнительского ансамбля по фронту.

Звуковые источники, находящиеся в центре ансамбля на акустической оси симметрии, создадут абсолютно идентичные напряжения в обоих стерефонических каналах и будут одинаково воспроизводиться обоими громкоговорителями. Слушателем в этом случае звук воспринимается исходящим как бы из точки, расположенной точно между двумя громкоговорителями.

Модификацией системы интенсивностной стереофонии служит система MS, так же как и система XY, использующая стереофонический микрофон. Эта система с точки зрения результатов

ности эквивалентна системе XY, но, как это будет показано далее, имеет некоторые эксплуатационные преимущества.

В системе MS стереофонический сигнал делится на «сигнал середины» (или сигнал M, от немецкого *Mitte* — середина) и «сигнал направления» (сигнал S, от немецкого *Seite* — сторона). Разделить стереофонический сигнал можно, расположив в одной точке два микрофона. Микрофон M должен иметь диаграмму направленности в виде круга или кардиоиды, а микрофон S — быть приемником градиента давления с диаграммой направленности в виде восьмерки, ось максимальной чувствительности которой располагается перпендикулярно направлению на условный центр исполнительского коллектива (рис. 32).

Рассмотрим эту микрофонную систему подробнее. Предположим, что на некотором расстоянии от микрофона по дуге полуокружности перемещается источник звука. Для наглядности изобразим характеристики направленности микрофонов системы MS в прямоугольной системе координат, в которой график зависимости чувствительности микрофона с круговой характеристикой направленности будет иметь вид прямой линии, параллельной оси угла падения звуковой волны, а для восьмерки — отрезка косинусоиды (рис. 33).

Напряжение M микрофона с круговой диаграммой направленности будет неизменным при любом расположении источника звука. Это обычная моноинформация, представляющая собой суммарное изображение левой и правой сторон звуковой картины.

Напряжение S на выходе микрофона с диаграммой направленности в виде восьмерки зависит от положения источника звука по отношению

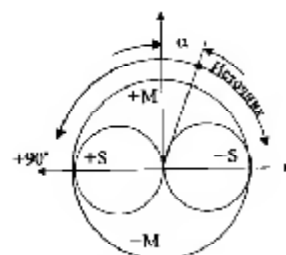


Рис. 32. Стерефоническая передача по системе MS

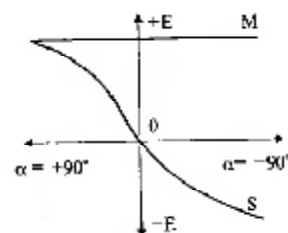


Рис. 33. Характеристики направленности микрофонной пары MS в прямоугольной системе координат

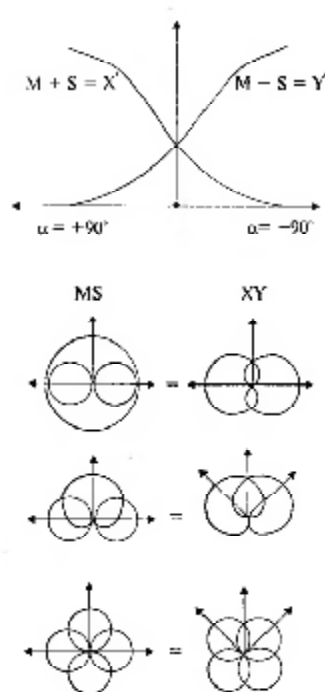


Рис. 34. Преобразование информации системы MS в информацию системы XY: график зависимости выходных напряжений от углов падения волн после суммарно-разностного преобразования; переход от системы MS к системе XY

преобразовать в информацию системы XY, произведя для этого суммарно-разностное преобразование соответствующих электрических сигналов. Если в одном канале напряжение сигналов M и S сложить, а в другом из величины напряжения сигнала M вычесть величину напряжения сигнала S, то для каждого канала зависимость выходного напряжения от угла падения звуковой волны представится кривыми  $M + S$  и  $M - S$  (рис. 34).

к микрофону. При перемещении источника на  $90^\circ$  по дуге влево это напряжение будет равно напряжению микрофона с круговой характеристикой и совпадет с ним по фазе ( $+S = +M$ ).

Если источник звука располагается посередине, то напряжение S равно нулю, и, наоборот, если он переместится на  $90^\circ$  вправо, напряжения с обоих приемников будут одинаковыми, но противоположными по фазе ( $-S = +M$ ). Таким образом, сигнал S служит носителем информации о расположении отдельных источников звука в студии, так как он соответствует разности интенсивностей звуковых волн от одного и того же источника, воздействующих на чувствительный элемент микрофона с двух сторон — слева и справа. Сигналы M и S непригодны для непосредственного прослушивания. Это еще не полностью сформированные стереофонические сигналы — левый и правый, а как бы полуфабрикаты, содержащие необходимую для их формирования информацию: о звуке и направлении на отдельные его компоненты.

Нетрудно убедиться, что информацию системы MS легко

А так как

$$M = X + Y \text{ и } S = X - Y,$$

то

$$M + S = X + Y + X - Y = 2X$$

и

$$M - S = X + Y - X + Y = 2Y.$$

Из изложенного видно, что эти две системы интенсивностной стереофонии эквивалентны по результатам.

Понятно, что при передаче звучания группы исполнителей, имеющей в студии определенную протяженность, уменьшение напряжения сигналов S влечет за собой сужение базы. В этом случае для слушателя крайние источники звука звучат не с краев базы, ограниченной расстояниями между двумя громкоговорителями, а как бы из точек, находящихся ближе к середине. На этом обстоятельстве основана регулировка базы, заключающаяся в том, что, уменьшая значение приходящего на регулятор сигнала S, можно сузить звуковую картину от полной ширины базы до звучания из одной точки, расположенной посередине между громкоговорителями. Этот крайний случай определяется условием равенства нулю значения сигнала информации S. После преобразования в канал X (левый) и в канал Y (правый) попадают одинаковые напряжения сигнала: суммарный  $M + 0 = M$  и разностный  $M - 0 = M$ .

Система MS требует введения в схему звукоорежиссерского пульта дополнительных узлов (суммарно-разностных преобразователей, стереорегуляторов), однако она имеет перед системой XY преимущество, заключающееся в том, что техника микширования при ее использовании более проста, во многом идентична технике микширования обычной монофонической передачи и дает звукоорежиссеру возможность регулировать как ширину участков базы, занятых отдельными группами исполнителей, так и направления на них.

На стереофоническом звукоорежиссерском пульте (рис. 35) регулировочные функции разделены: ширина базы регулируется из-

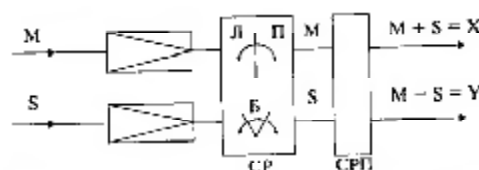


Рис. 35. Блок-схема входных каналов стереофонического пульта для работы по системе MS:

СР — стереорегулятор; СРП — суммарно-разностный преобразователь

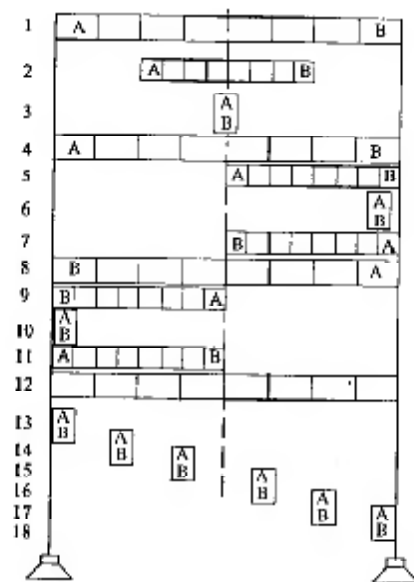


Рис. 36. Воздействие стереорегулятора на звуковую картину на стороне слушателя

менением величины электрического напряжения в цепи передачи сигнала  $S$ , а направления — путем подмешивания в канал  $S$  сигнала  $M$  в разных дозах и с фазой, либо совпадающей с фазой сигнала  $S$ , либо с противоположной (рис. 36).

В строчке 1 приводится оригинальная звуковая картина при среднем положении регулятора направления, при полной ширине базы. Эта звуковая картина может быть сужена до точки (стр. 2 и 3). В строчках 4–12 показаны воздействие регулировки направления и поворот сторон звукового изображения на обратные, начиная с положения «Середина» (стр. 4), через точку «Вправо» (стр. 6), «Середина перевернутого изображения» (стр. 8), «Влево» (стр. 10) и кончая основным положением (стр. 12). В стр. 13–18 показано действие регулятора направления при его повороте слева направо и закрытом регуляторе базы.

Наряду с системами стереофонической передачи АВ, XY и MS звукорежиссеры чаще всего используют так называемый по-

лимикрофонный способ записи, когда в студии устанавливается большее количество монофонических микрофонов, каждый из которых предназначен для передачи звучания одного инструмента или определенной группы инструментов. При этом чаще всего используются односторонне-направленные микрофоны; они устанавливаются на близком от исполнителей расстоянии (в поле прямого звука).

Тем самым создается возможность избежать взаимного проникновения звучания одних инструментов ансамбля в микрофоны, установленные у других источников, и благодаря этому звукорежиссер на микшерном пульте выполняет раздельную регулировку и обработку звучания каждого инструмента, подбирая оптимальные их соотношения по уровням и добившись естественности тембров и хорошей прозрачности общей звуковой картины. Для создания стереофонической панорамы при использовании многомикрофонной техники в каждом из индивидуальных микрофонных каналов включается *панорамный регулятор*.

Панорамный регулятор представляет собой простую электрическую схему, с помощью которой монофонический сигнал распределяется между двумя стереофоническими выходными каналами с любыми выбранными звукорежиссером соотношениями по уровню. Это даст возможность расположить звуковое изображение данного инструмента в любой точке базы стереофонического прослушивания.

### Многоканальные стереофонические системы *Surround Sound*

Еще в начале 1970-х годов предпринимались попытки сделать звук еще более естественным, чем при двухканальной стереофонии, которая по сравнению с моно имеет большие преимущества. Однако здесь звук приходит к слушателю только из пространства между двумя громкоговорящими, а это ведет к потере ощущения объемности помещения, где происходит передаваемое звуковое событие. Поэтому была предложена более сложная система — **квадрафония**, когда используются *четыре громкоговорителя*: левый и правый перед слушателем, как при обычном стерео, и левый и правый позади слушателя для создания ощущения объемности звука, достигающего ушей слушателя не только спереди, но и сзади. Однако квадрафония в то время не прижилась. Хотя квадрафонические музыкальные аудиозаписи звучали интереснее, чем простое стерео, но это улучшение было неадекватно существенно воз-

росшим расходам, которые должен был понести любитель-меломан на приобретение подобного оборудования. А домашних кинотеатров, для которых объемный звук давал бы неоспоримые преимущества, в то время еще не было.

Для использования в больших кинотеатрах подобная система, безусловно, имела бы смысл. Для этого специалисты лаборатории Dolby предложили изменить конфигурацию расстановки громкоговорителей, принятую при квадрафонии, придав ей вместо прямоугольной ромбическую форму. Вместо передних, левого и правого, и двух задних громкоговорители расположили по-иному: спереди установили левый, центральный и правый, а четвертый, так называемый *surround*-громкоговоритель, — сзади. Этот задний громкоговоритель был предназначен в основном для передачи диффузного звукового поля помещения, из которого ведется передача, т.е. сигналов реверберации, создающих эффект объемности звука, его «обволакивающего» воздействия на слушателя. (Собственно, выражение *surround sound*, давшее название многоканальным системам звукопередачи, в переводе с английского и означает «обволакивающий звук».)

Но чтобы использовать эту систему на практике, надо было разработать специальный кодировщик, который для записи на кинолентку кодировал бы информацию, объединяя четыре канала в более простой для размещения на звуковых дорожках кинолентки двухканальный формат. Для воспроизведения в кинотеатре с помощью декодера производилось обратное преобразование: выделение из этих двух кодированных сигналов первоначальных четырех. Таким образом, был создан формат *Dolby Stereo* — первая **матричная** многоканальная система объемного звучания кинофильмов. Сегодня звук большинства фильмов копируется именно в формате Dolby Stereo.

В конце 1970-х и до начала 1980-х годов домашние видеосистемы VHS и Beta стали поддерживать высококачественные стереозвуковые дорожки (VHS HiFi и Beta HiFi). Кодированные по системе *Dolby Stereo* звуковые дорожки при записи видеофильмов передавались на эти ленты под форматом *Dolby Surround*. Это были аналоговые **матричные** системы, которые до середины 1990-х оставались основным форматом видеофильмов. Информация, передаваемая по всем четырем каналам — тремя передними и одним задним (*surround*), — для записи преобразовывалась с помощью кодирования в два стереоканала. Чтобы отличить *surround*-кодированные аудиосигналы от обычных стереосигналов, их стали обозначать L1 и R1 (левый общий и правый общий). Эти сигналы можно было слушать в виде обычного двухканального стереозвуча-

ния, а имея декодер в кинотеатре или дома, разделить на левый, центральный, правый и *surround*-каналы. В этом и состоит принцип *Dolby Surround* кодирования и декодирования.

Вскоре домашняя аудио- и видеотехника стала оснащаться декодерами *Dolby Surround*, а позднее и более совершенной их модификацией *Dolby Pro Logic*. Последняя значительно увеличивала ощущение разделения между каналами, что достигалось с помощью логики, заложенной в электронных схемах декодеров *Dolby Pro Logic*. Таким образом, *surround*-звук стал доступен для потребителя не только в кинотеатрах, но и дома, в том числе и для владельцев телевизоров, рассчитанных на прием стереофонического звука по одной из принятых в нашей стране эфирных систем (например, NISAM 728).

В середине 1990-х годов появились первые цифровые *surround*-системы, позволяющие отказаться от матричного преобразования сигналов и перейти на «дискретную» многоканальную передачу, в которой каждый сигнал передавался к потребителю отдельно, без какого-либо промежуточного матричного преобразования.

Компания Dolby разработала формат AC-3, который в настоящее время более известен под названием *Dolby Digital*. Цифровой способ записи позволял вести передачу в первое время по 5 отдельным высококачественным аудиоканалам (левому L, центральному C, правому R, левому *surround* LS и правому *surround* RS) и в дополнение использовать еще один канал, так называемый LFE (*Low Frequency Extension*). Этот шестой, или 0,1, дополнительный канал, ограниченный по полосе пропускания (его наивысшая частота не более  $80 \div 120$  Гц), предназначается для создания низко-

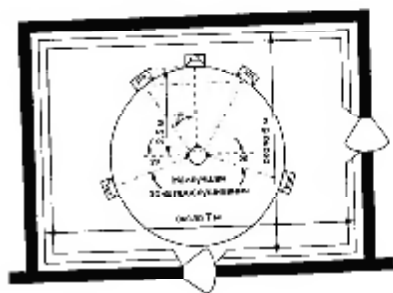


Рис. 37. Стандартное расположение громкоговорителей по системе 5.1 (без сабвуфера)

частотных эффектов (взрыв бомб, грозových раскатов и т.п.). Он подключается к сабвуферу (*subwoofer*), громкоговорителю, рассчитанному на излучение сверхнизких частот звукового диапазона и расположенному обычно спереди под центральным громкоговорителем или немного левее его. Поскольку такая система воспроизведения состоит из 5 основных и одного дополнительного канала, за ней закрепилось обозначение «5.1» (рис. 37).

Сначала предполагалось использовать эту систему только в кинотеатрах. Но затем, когда цифровая техника с DVD-дисками и цифровыми приемниками появилась на потребительском рынке, система *Dolby Digital* стала использоваться в домашних условиях. Она была принята во всем мире как стандарт для звуковых треков DVD и стала применяться в цифровом, кабельном и спутниковом телевидении во многих странах мира.

### § 3. Обработка и контроль звукового сигнала

#### Задачи звукорежиссуры

Звукорежиссер — это специалист, имеющий как музыкальную, так и техническую подготовку. Имея представление об электроакустических процессах, происходящих в тракте звукопередачи, зная особенности и специфику радиовещательного сигнала и аппаратуры для его обработки, он принимает участие в творческом процессе формирования высококачественного звукового образа и его звукозаписи. Конечная цель этого процесса — предоставление достаточно точной и полной информации о звуковом событии, с тем чтобы даже при радиовещании возникающие у слушателя ассоциации могли восполнить отсутствие зрительного образа и доставить ему полное эстетическое удовлетворение.

Эта задача не из легких, так как электроакустическая звукопередача не в состоянии воспроизвести звуковую картину без известного нарушения натуральности звучания. Во многих случаях нельзя передать естественный динамический диапазон исполнения без его искусственного сжатия. Воспроизведение фонограмм в жилой комнате, как правило, ведется на уровне громкости меньшем, чем естественная громкость при исполнении произведения в зале. При обычном одноканальном (монофоническом) воспроизведении звуковой программы через один громкоговоритель неестественность воспроизведения усугубляется тем, что все звуки слышатся исхо-

дящими из одной точки, и слушатель утрачивает ощущение взаимного расположения и протяженности (размеров по ширине) отдельных источников звука. Теряется то специфическое качество слухового ощущения, которое принято называть пространственной перспективой. Поскольку слушатель не может локализовать отдельные инструменты в пространстве, эффект взаимной маскировки одних групп исполнителей другими сказывается сильнее, чем в натуре. Это влечет за собой нивелирование отдельных оркестровых партий, а иногда и нарушение их соотношений в оркестре — музыкального баланса. Отметим также, что восприятие отраженных от стен помещения звуковых сигналов при прослушивании через динамики несколько отличается от их восприятия слушателем в зале или студии.

Все перечисленное (не говоря уже о заметных иногда на слух искажениях, появляющихся из-за несовершенства аппаратуры электроакустического тракта) позволяет говорить о неискáженной передаче в известной мере лишь условно. Имеется в виду, что передача, способная вызвать у слушателя представление об исполнении на основе прежнего опыта посещения концертов. Основываясь на таком подходе, можно объяснить и разницу в задачах, стоящих перед звукорежиссером при передаче различных форм музыкального материала. Например, звучание серьезной музыки (симфонической, оперной, хоровой, камерной) хорошо известно и привычно слушателям. Поэтому задача звукорежиссера в этом случае сводится к тому, чтобы, используя доступные ему технические средства, добиться наибольшей естественности звучания голосов и музыкальных инструментов.

Несколько иначе обстоит дело с эстрадной музыкой, с появившимися в последнее время многочисленными ансамблями поп-музыки, использующими электронные музыкальные инструменты, звучание которых весьма специфично и знакомо широкой публике главным образом благодаря звукозаписи. Здесь выработался современный стиль звучания, ставший своеобразной модой, который во многом определяется технологическими возможностями электроакустической аппаратуры. Этот стиль настолько отличается от естественного звучания, что эстрадные исполнители, даже выступая в концертах на эстраде, предпочитают прибегать к помощи микрофонов, микшерных пультах и других специальных средств обработки сигнала, чтобы слушатели в зале через системы звукоусиления могли получить то звучание, которое стало привычным. Совершенно очевидно, что работа звукорежиссера в таких условиях непростая, очень ответственная и существенно отличается по характеру от передачи классической музыки.

При звукозаписи музыкальных произведений различных жанров, содержания и формы звукорежиссер должен иметь возможность обрабатывать звуковые сигналы и формировать программы в соответствии со стоящими перед ним конкретными задачами, ориентируясь при этом в основном на свой опыт и художественный вкус. Разумеется, для этого ему необходимо располагать соответствующими техническими средствами. Именно поэтому современная студийная электроакустическая и звукозаписывающая аппаратура очень разнообразна по составу, схемам и довольно сложна.

### Микшерный пульт

Функции микшерного пульта — усиление напряжений сигналов звуковой частоты, регулировка, обработка и смешивание в нужных соотношениях сигналов от различных источников: микрофонов, магнитофонов, внешних линий и т.п. При формировании музыкальных художественных программ одновременно используется несколько источников, что делает микшерный пульт неотъемлемой частью любой студии радиовещания и звукозаписи. Схемы микшерных пультов различных типов в отдельных деталях могут отличаться друг от друга — это зависит от специализации и конструктивного решения, однако все они имеют общие черты. Например, в составе всех современных микшерных пультов есть блоки (модули) с определенными рабочими функциями. Из таких стандартных блоков конструкторы формируют пульти самого разного назначения. Рассмотрим устройство микшерного пульта, чтобы представить работу подобных устройств (рис. 38).

Звуковые колебания подаются на входные каналы пульта. Их может быть от 4—6 в пультах, предназначенных для малых студий, до 32 и даже 48 — для больших концертных студий.

Переключатель источников сигнала (ПИ) позволяет подключать к любому из входных каналов микрофоны, уровень сигнала которых — около единиц милливольт или сигналы «высокого» уровня, например, с внешней линии или с выхода магнитофона. В этом случае номинальное напряжение сигнала составляет обычно 1,55 В (+6 дБ), т.е. примерно в 1000 раз (на 60 дБ) выше, чем от микрофона. Чтобы уравнивать входные уровни сигналов, поступающих на пульт, например от микрофонов с разной чувствительностью, и не допустить перегрузок первых ступеней усиления входных усилителей (ВхУ), на практике звукорежиссер с помощью «аттенуаторов» — установочных, ступенчатых регуляторов уровня (УР) приводит все входные уровни к расчетной, номинальной для данного типа усилителей величине.

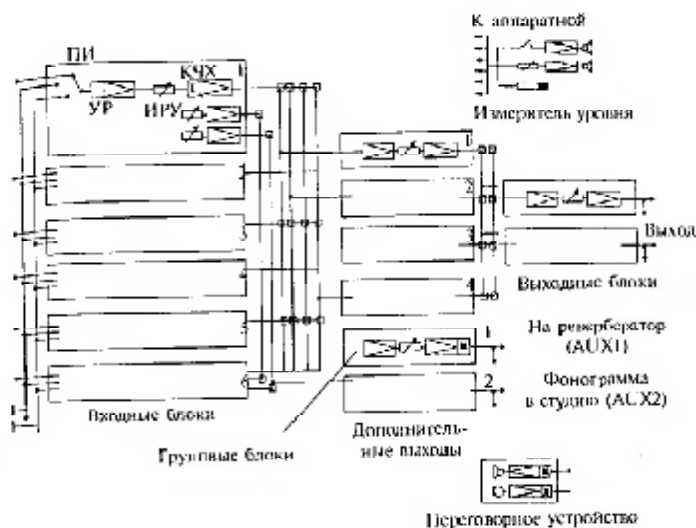


Рис. 38. Типовая блок-схема студийного микшерного пульта:

ПИ — переключатель источников сигнала; УР — установочный регулятор уровня; ВхУ — входной усилитель; ИРУ — индивидуальный регулятор уровня; КЧХ — корректор частотной характеристики

Оперативная регулировка уровней сигналов, к которой звукорежиссер прибегает в процессе исполнения произведения, определяя пропорции их последующего смешивания (микширования), выполняется с помощью индивидуальных регуляторов уровня (ИРУ), установленных за входными усилителями. Такая последовательность не случайна. Любые регулировки, выполняемые по ходу передачи, в принципе могут стать источником помех: шорохов, потрескиваний и т.п. В этом случае предпочтительнее регулировать сигнал более высокого уровня, помехи будут менее заметны благодаря маскирующему действию мощного сигнала.

Известны различные конструкции регуляторов уровня. Чаще всего в микшерных пультах применяются простые по конструкции потенциометрические регуляторы, изготовленные из угольных токопроводящих элементов (пластин). Величина сопротивления и соответственно уровень выходного напряжения сигнала регулируется в них с помощью плавно скользящих по угольной поверхности шеток-ползунков. Такие регуляторы обычно включа-

ют между усилительными ступенями, чтобы исключить взаимное влияние регулировки уровня в одном канале на уровень сигнала от других источников в соседних каналах. В современных микшерных пультах иногда используется система управления коэффициентами передачи усилителей с помощью постоянного (медленно меняющегося) напряжения, подаваемого на их управляемые цепи. Причем это напряжение можно менять по величине либо установленными на пульте регуляторами, либо дистанционно, что позволяет автоматизировать этот процесс, используя микропроцессоры и компьютеры.

Следующая ступень передачи — *корректор чистоты характеристик* (КЧХ). Корректоры того или иного типа, как правило, устанавливаются в каждом из входных каналов. Это дает возможность корректировать тембры звучания отдельных инструментов раздельно. О практическом применении корректоров речь пойдет далее.

Для смешивания сигналов, передаваемых по входным каналам, и для формирования готовой программы в пульте имеются *сборные шины*, представляющие собой пассивные смесители на резисторах, в которых затухание уровня сигналов на развязывающих сопротивлениях компенсируется усилителем, установленным непосредственно после шины. Сборные шины конструктивно оформлены также в виде блоков, на верхних панелях которых размещены коммутационные кнопки. С помощью этих кнопок любой из входных каналов может быть подключен к соответствующей сборной шине. При этом в пультах, имеющих большое число входных каналов, применяется несколько сборных шин, с помощью которых входные каналы собираются в группы. Последние, в свою очередь, коммутируются на главные сборные шины, формирующие выходной сигнал. Число групповых и выходных каналов может быть разным, и оно зависит от назначения пульта.

Если пульт универсален, т.е. предназначен как для моно-, так и стереофонической записи, он должен иметь по меньшей мере два выходных канала. А в пультах для многодорожечной записи предусматривается дополнительная возможность подключения индивидуального (входного) и группового канала прямо ко входу многодорожечного магнитофона, минуя выходные каналы пульта. Такое решение называют схемой *in line*. Схемы современных пультов позволяют подать любые входные и групповые сигналы на тракт ревербератора или эхо-камеры с подключением этих трактов до или после соответствующего регулятора уровня или корректора. Для этого предусмотрены специальные дополнительные выходные

шины, которые, по международной терминологии, обозначаются английским сокращением слова Auxiliary — *Aux* (что переводится: вспомогательные, добавочные). В состав микшерных пультов в виде отдельных блоков обычно входят автоматические регуляторы уровня передачи: ограничители и компрессоры. О принципах работы этих устройств более подробно речь пойдет далее.

Переговоры звукорежиссера с исполнителями, находящимися в студии, команды о начале записи и ее остановках ведутся с помощью *переговорного устройства*, чаще всего входящего в комплект микшерного пульта. Для соблюдения нормальной диаграммы уровней сигналов при их прохождении через тракт пульта и для предупреждения звукорежиссера о возможных перегрузках тех или иных звеньев схемы в пульте предусмотрены специальные *индикаторы перегрузок*, представляющие собой схемы сравнения, зажигающие лампочки на том усилительном блоке, на входе которого появился сигнал с уровнем больше допустимого. В этом случае звукорежиссер должен регулятором уровня предыдущего звена снизить уровень сигнала до нормального.

## Автоматические регуляторы уровня (АРУ)

Автоматические регуляторы уровня сигнала работают по принципу изменения коэффициента передачи усилителя в зависимости от среднего уровня сигнала, подаваемого на вход этого усилителя. Это интерпретационные приборы, т.е. их реакция на уровень передачи быстра, но не мгновенна, благодаря чему форма звуковой волны не успевает исказиться — меняется лишь ее уровень. Существует несколько модификаций автоматических регуляторов уровня: усилители-ограничители (лимитеры), сжиматели (компрессоры) и расширители (экстендеры). Причем конструктивно эти устройства могут быть как составными частями микшерного пульта, так и самостоятельными автономными блоками.

**Усилитель-ограничитель** работает как простой усилитель до того момента, пока поданный на его вход сигнал не превысит по уровню установленный предел. При дальнейшем возрастании сигнала коэффициент передачи начинает уменьшаться пропорционально росту среднего значения уровня сигнала. Благодаря этому выходной уровень не может превысить максимально допустимой величины (рис. 39).

**Сжиматель** отличается от ограничителя тем, что его амплитудная характеристика принципиально криволинейна (рис. 40).



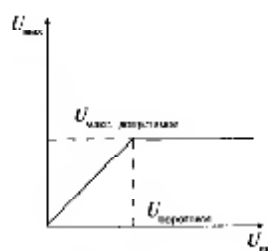


Рис. 39. Идеализированная амплитудная характеристика усилителя-ограничителя в линейном масштабе

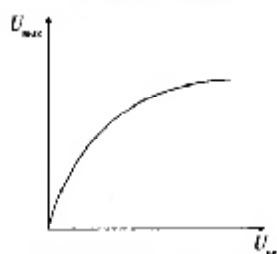


Рис. 40. Амплитудная характеристика компрессора в линейном масштабе

дачи программ радиовещания, радиопередатчики и т.п.) от перегрузок. У сжимателей помимо основной есть и дополнительные функции: усиливая слабые сигналы, они повышают тем самым средний уровень передачи. Все это приводит к существенному выигрышу по мощности и в конечном итоге по громкости звучания, что, естественно, очень важно в радиовещании, так как способствует увеличению дальности приема радиопередатчи-

Расширитель в тракте звукопередачи применяется редко, этот прибор чаще используется в различных системах шумоподавления. Например, компрессор вместе со слабыми сигналами неизбежно поднимает и уровень шума усилителя, поэтому в схему вместе с компрессором приходится вводить и специальное устройство — шумоподаватель, который при малых уровнях сигнала работает по принципу экспандера, подавляющего шум в паузах между полезными сигналами.

При малых входных уровнях крутизна характеристики компрессора велика (коэффициент усиления слабых сигналов наиболее высок). С ростом уровня амплитудная характеристика компрессора становится все более пологой, т.е. коэффициент усиления уменьшается. Таким образом, компрессор на выходе поднимает малые уровни и понижает высокие, сжимая таким образом динамический диапазон до величины, установленной при настройке прибора.

Расширитель имеет амплитудную характеристику, зеркальную по отношению к характеристике компрессора. Экспандер на выходе подавляет малые и усиливает высокие уровни, тем самым расширяя динамический диапазон.

Усилители-ограничители устанавливаются обычно на выходе тракта, чтобы предохранить последующие его звенья (вход записи магнитофона, линию пере-

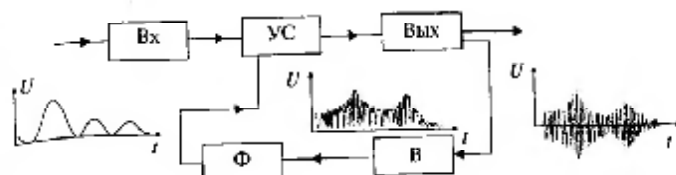


Рис. 41. Блок-схема автоматического регулятора уровня: Вх — входная ступень; УС — управляемая ступень; Вых — выходная ступень; В — выпрямитель; Ф — фильтр

Все рассмотренные приборы имеют одни и те же принципы работы, пояснить которые можно с помощью общей блок-схемы (рис. 41).

Сигнал подается на входную, затем на управляемую и, наконец, на выходную ступень прибора. С выхода, а иногда и со входа прибора (это не принципиально) он возвращается и попадает на управляющую цепь, состоящую из двухполупериодного выпрямителя и фильтра. На выходе выпрямителя напряжение имеет постоянную полярность, но его величина меняется со звуковой частотой и в зависимости от среднего уровня сигнала в канале передачи. Мгновенные изменения напряжения, которые претерпевает сигнал в интервале каждого своего колебания, не должны влиять на автоматическую систему, иначе будет искажаться его форма. Как мы уже говорили, автоматический регулятор уровня — прибор интерпретационный. Фильтр подавляет все составляющие напряжения звуковых частот, и на его выходе формируется напряжение, пропорциональное среднему значению выпрямленных колебаний. Естественно, среднее значение возрастает, когда повышается уровень сигнала, и снижается, когда сигнал мал. Это сравнительно медленно меняющееся напряжение и используется в качестве управляющего. Оно изменяет коэффициент усиления управляемой ступени так, чтобы устройство имело ту амплитудную характеристику, которая соответствует типу данного автоматического регулятора уровня: ограничителя, компрессора или экспандера.

Характеристики работы авторегуляторов уровня для звукозаписи будут более наглядны, если их изобразить не в линейном, а в логарифмическом масштабе (рис. 42). В этом случае по горизонтальной оси откладывается выраженный в децибелах динамический диапазон сигнала на входе регулятора ( $D$ ), а по вертикальной, тоже в децибелах, динамический диапазон на его выходе ( $d$ ). Вели-

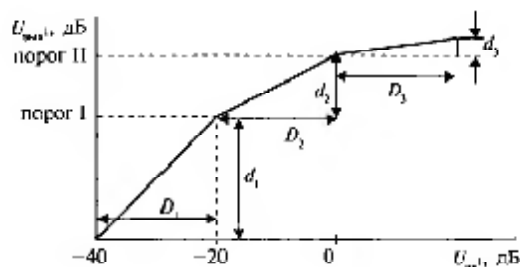


Рис. 42. Амплитудная характеристика компрессора-ограничителя, изображенная в логарифмическом масштабе

чина изменения динамического диапазона звукового сигнала после прохождения авторегулятора ( $\rho$ ) — важнейшая характеристика его работы. Называется она *коэффициентом сжатия* (англ. *ratio*). Принято считать, что коэффициент сжатия  $\rho = D/d$ . Таким образом, коэффициент сжатия для обычного усилителя —  $\rho = 1$ , для компрессора —  $\rho > 1$  (обычно 2–5), для ограничителя  $\rho$  — от 20 и до бесконечности, а для экспандера —  $\rho < 1$ .

В настоящее время существуют автоматические регуляторы уровня с комбинированными амплитудными характеристиками, которые на разных уровнях сигнала работают по-другому. Например, на высоких уровнях прибор может работать как ограничитель, а на средних — как компрессор.

Звукорежиссер по своему усмотрению обычно устанавливает точки начала включения того или иного режима работы прибора, так называемые пороги срабатывания (*threshold*). На рис. 42 видно, что в диапазоне уровней от нуля до первого порога срабатывания динамический диапазон на входе и выходе одинаков,  $\rho = 1$  (режим усиления), после первого и до второго порога —  $\rho > 1$  (компрессия) и, наконец, после достижения второго порога сигнал на выходе не увеличивается вовсе, наступает режим ограничения. Причем в таких приборах по желанию звукорежиссера могут изменяться и подбираться не только амплитудные характеристики, но и динамические параметры, ощутимо влияющие на качество звучания: время срабатывания (*attack*), иными словами, скорость реакции регулятора на изменение входного уровня и время восстановления коэффициента передачи прибора в исходное состояние (*release*).

Время срабатывания авторегуляторов обычно невелико — около 1,5 мс, а время восстановления может широко изменяться в за-

висимости от особенностей звукового материала — от 100 мс и до 1–2 с.

Современная техника допускает очень высокую степень автоматизации процесса регулирования уровней. И тем не менее никакая автоматизация не исключает и не способна заменить квалифицированного звукорежиссера. Дело в том, что автоматическое сжатие динамического диапазона влечет за собой более или менее заметные нарушения художественных нюансов, может лишить произведение контрастности, сделать исполнение маловыразительным. Поэтому в художественном радиовещании и звукозаписи регулировка динамического диапазона обязательно должна возлагаться на квалифицированных специалистов — звукорежиссеров, имеющих музыкальное образование, технические навыки, умеющих находить компромиссное решение между требованиями техническими и художественными.

Следя по партитуре за ходом исполнения, звукорежиссер чаще всего с помощью ручных регуляторов уровня, ориентируясь на показания прибора — измерителя уровня и слуховое восприятие программы по контрольному громкоговорятелю, доводит динамический диапазон до нормы, не нанося существенного ущерба замыслу композитора и исполнителей. Автоматическими регуляторами динамического диапазона звукорежиссеры пользуются только как вспомогательным средством. Предположим, что необходимо выделить и подчеркнуть в оркестровом звучании какую-либо группу инструментов, например медные духовые. В этом случае выгодно увеличить их средний уровень, поскольку громкость, как известно, зависит от среднего уровня сигнала. Но при этом трудно уследить за мгновенными, не допустимыми по величине пиками — выбросами уровня, их следует своевременно понизить вручную для защиты последующих звеньев тракта звукопередачи от перегрузок. В этой работе существенную помощь звукорежиссеру может оказать включенный в тракт микрофона компрессор или ограничитель. Компрессор, сжав в необходимой степени динамический диапазон передачи данных инструментов, увеличит их средний уровень, сделает звучание более интенсивным, «компактным». Для этой же цели можно воспользоваться и ограничителем. Подсоединив его к микрофонному тракту и исключив, таким образом, возможность перегрузки тракта, можно соответственно повысить средний уровень сигнала с микрофона и также достичь эффекта увеличения громкости данного инструмента.

Однако не всегда удается искусственным путем добиться сжатия динамического диапазона так, чтобы это осталось незамеченным для квалифицированного слушателя. Тогда приходится прибегать к помощи самих исполнителей. К примеру, опытный дирижер, понимающий специфику радиовещания и звукозаписи, при работе в студии следует советам звукорежиссера и сам старается уменьшить громкость на фортиссимо и усилить звук на пианиссимо, сохраняя при этом необходимые нюансы, звуковые контрасты и соотношения.

## Частотная коррекция

Включение в схему микшерного пульта электрических фильтров различных типов дает звукорежиссеру возможность в необходимых случаях оперативно корректировать тембр звучания как отдельных инструментов, так и ансамбля в целом. Частотная коррекция (которую, если говорить строго, правильнее было бы назвать введением в тракт звукопередачи преднамеренных частотных искажений) используется сейчас при всех видах звукозаписи, но наиболее широкое распространение она получила при записях эстрадной и развлекательной музыки. Некоторая вольность, предоставляемая звукорежиссеру в выборе звуковых окрасок в этом случае, тенденция к использованию разнообразных звуковых эффектов и трюковых приемов для придания звучанию своеобразного блеска и оригинальности делают применение электрических фильтров при записи совершенно необходимыми. В обычных же случаях управление частотной характеристикой тракта звукопередачи может помочь сгладить возможные недостатки акустики студии (например, ее формантный характер), а также улучшить четкость звучания отдельных инструментов, искусственно подчеркивая характерные для них спектральные составляющие.

Существует несколько видов *корректирующих устройств*, различающихся функциями.

**Фильтр среза низших частот** (по принятой в литературе терминологии, **фильтр высших частот**) устанавливает нижнюю границу рабочего диапазона путем резкого подавления всех сигналов с частотами, меньшими заданной частоты среза. Частоту среза можно изменять, используя переключателем, установленным на панели регулировок микшерного пульта (рис. 43, а). Чтобы работа фильтра была эффективной, крутизна среза частотной характеристики должна быть не менее 6 +12 дБ на октаву. Например, если частота среза 120 Гц, то ее уменьшение на октаву, т.е. до 60 Гц, должно вызывать падение уровня передачи в 2 или 4 раза (т.е. на 6 или 12 дБ).

Фильтр низших частот пропускает без ослабления лишь низшие звуковые частоты до какой-то определенной частоты, выбранной в качестве граничной. На более высоких частотах фильтр подавляет сигналы, обеспечивая крутизну спада частотной характеристики не менее 6 или 12 дБ на октаву (рис. 43, б).

Широко применяются звукорежиссерами и другие виды корректоров частотных характеристик — эквалайзеров: параметрических и графических.

С помощью **параметрического эквалайзера** осуществляется подъем и завал частотной характеристики передачи с возможностью выбора

регулируемых параметров: максимальной величины подъема или спада (дБ) на крайних частотах диапазона ( $f$ ) и при этом крутизны хода частотной характеристики ( $Q$ ).

При пении или игре на музыкальных инструментах звуковая энергия по всему спектру звуковых частот, излучаемых данным источником, распределяется неравномерно. Многие из натуральных звучаний характеризуются ярко выраженными формантами, т.е. подъемами уровня в строго определенных, иногда довольно узких участках спектра. Например, значительный подъем спектральной характеристики в области 2,8–3 кГц придает мужскому певческому голосу то качество, которое принято называть постановкой голоса (рис. 44).

В перечень функций параметрического эквалайзера входит искусственное формирование формантных образований, благодаря которым звукорежиссер может добиться как бы приближения исполнителя к микрофону, сделать звучание более отчетливым и конкретным, т.е.

создать эффект присутствия. Поэтому фильтр, с помощью которого осуществляется подъем частотной характеристики в узких полосах частотного диапазона, называется фильтром присутствия. В современных параметрических эквалайзерах предусматривается произвольный выбор средней частоты полосы, выделяемой фильтром присутствия, а также величины подъема (рис. 45).

Еще более универсален **графический эквалайзер**. Действие его основано на том, что подаваемый на вход сигнал с помощью включенных параллельно полосовых фильтров с большой крутизной

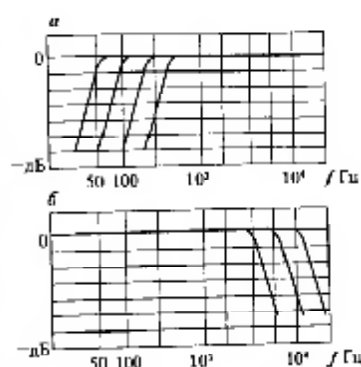


Рис. 43. Частотные характеристики фильтров:

а — высших частот; б — низших частот

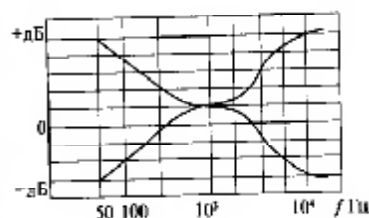


Рис. 44. Частотные характеристики параметрического эквалайзера

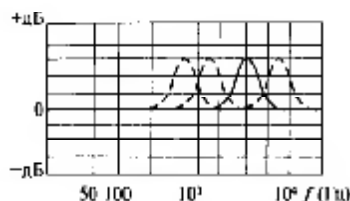


Рис. 45. Частотная характеристика фильтра при отсутствии

сигнала за пределами их полосы пропускания делится на отдельные частотные полосы (обычно октавной, полуоктавной или третьоктавной ширины). Далее эти полосы на выходе прибора сдвигаются, причем сохраняется возможность регулирования при помощи профильных регуляторов уровней каждой полосы в отдельности, чтобы подобрать нужные соотношения между ними. Положения ручек профильных регуляторов на лицевой панели прибора очень наглядно, как бы графически изображают сформированную таким образом частотную характеристику передачи.

Все описанные виды корректоров могут быть встроены в микшерный пульт в качестве его составных частей или представлять собой отдельные самостоятельные блоки, монтируемые обычно в стойках спецэффектов, которыми оснащаются современные студии.

Несколько слов еще об одном полезном приборе — эксайтеере. Эксайтрование — обогащение сигнала гармониками, утраченными при записи. Эксайттер сам достраивает высшие гармоники, отталкиваясь от отбывающих основных тонов.

Рассмотренные в этой главе устройства не исключают друг друга, наоборот, они могут с успехом использоваться в комплексе, давая звукорежиссеру дополнительный инструмент для формирования звукового образа в соответствии с поставленными задачами и собственным художественным вкусом.

## § 4. Контрольно-измерительные приборы

По ходу записи или передачи звукорежиссер должен непрерывно контролировать качество звукового сигнала по встроенному в пульт измерителю уровня, стереофонический эффект — по специальным приборам: коррелометру и стереогониометру, а качество звучания — на слух по установленным в аппаратной контрольным агрегатам (громкоговорящим устройствам прослушивания). Контрольные устройства подключаются к различным точкам

схемы кнопочным коммутатором, расположенным на панели управления пульта.

### Измеритель уровня

Измеритель уровня обеспечивает визуальный контроль уровня передачи и ее динамического диапазона. Это специальные электрические приборы переменного тока, подключаемые, подобно вольтметрам, параллельно какому-либо элементу канала радиовещания или звукозаписи. Обычные вольтметры переменного тока рассчитаны на измерение синусоидальных напряжений, соответственно градуируются их шкалы — в действующих (эффективных) значениях напряжения, которые в 1,41 раза (квадратный корень из двух) меньше амплитудных. Звуковой сигнал имеет довольно сложную форму и по характеру ближе к импульсному, чем гармоническим. К тому же это случайный сигнал. При контроле уровня нас должны интересовать его текущие значения.

Для точной регистрации изменений уровня звукового сигнала можно было бы иметь быстродействующий, практически безынерционный прибор, например электронный осциллограф, отражающий на своем экране мгновенные изменения уровня передачи. Однако скорость этих изменений настолько велика, что глаз человека не в состоянии уследить за мельканиями луча-указателя. И что также очень важно, слух человека обладает некоторой инерцией — способностью накапливать и усреднять воздействующую на барабанную перепонку информацию. Именно благодаря инерции слуха воспринимаемая громкость кратковременного звукового импульса зависит не только от его уровня, но и от продолжительности. Так, кратковременный звук длительностью 10–20 мс кажется менее громким, чем звук той же интенсивности, но продолжительный, например, 150–300 мс.

Итак, громкость определяется средним по некоторому интервалу времени значением энергии звуковой волны. Измеритель уровня громкости поэтому должен быть инерционным прибором, показывающим усредненные значения энергии измеряемых сигналов. Это достигается применением специальной схемы (рис. 46), в которой усреднение (интеграция) сигнала происходит при помощи быстрого заряда конденсатора выпрямленным напряжением звуковой частоты, т.е. через интегрирующую RC-цепь ( $D-R_1-C$ ). Конденсатор затем медленно разряжается через цепь  $C-R_2$  на показывающий прибор И. На заряд конденсатора требуется определенное время, которое зависит от параметров зарядной цепи схемы прибора. Произведение RC определяет постоянную времени заряда и фактически интервал интеграции (усреднения) зву-

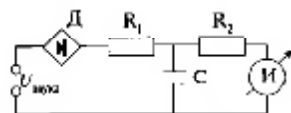


Рис. 46. Интегрирующая цепь измерителя уровня:

Д — выпрямляющий диод;  $R_1$ ,  $R_2$  — сопротивления соответственно цепей заряда конденсатора С; И — измерительный прибор, например тока

возврата указателя в исходное положение (обычно оно равно 1,3–1,7 с).

Измерители уровня имеют логарифмическую шкалу. Это необходимо для наблюдения за уровнем передачи в большом динамическом диапазоне. Кроме того, показания прибора с логарифмической шкалой, отградуированной в децибелах, более точно соответствуют восприятию органом слуха изменений громкости звука. Показания измерителя логарифмируются специальной схемой логарифматора, входящей в состав входного усилителя прибора. Шкала отградуирована в децибелах и в процентах. За максимально допустимый уровень передачи обычно принимают отметку шкалы 100% (0 дБ). Динамический диапазон измерений у разных типов приборов разный, но обычно он равен примерно 50 дБ (от –45 до +5 дБ относительно нулевой отметки.) Уже подчеркивалось, что постоянная времени, или время интеграции, — одна из основных характеристик измерителя уровня, она существенно влияет на точность показаний прибора. Время интеграции можно определить, построив *временную характеристику измерителя уровня*. Делается это так. На вход измерителя подаются тональные импульсы — отрезки (пакеты) синусоидального напряжения звуковой частоты разной длительности. Затем строится временная характеристика. Для этого по оси абсцисс в соответствующем масштабе откладывают значения длительности тональных импульсов, а по оси ординат — максимальные показания прибора в процентах (за 100% обычно принимают установившиеся показания при длительном воздействии тонального сигнала на прибор). Обычно временную характеристику строят для интервала длительностей тональных импульсов от самых коротких, например 5 мс, и до продолжительных — 200 мс (рис. 47).

Длительность импульса, при которой указатель прибора отклоняется на 80%, принимают за время интеграции измерителя уровня  $\tau_{\text{и}}$ . Так, на рис. 47 кривая а соответствует прибору со временем интеграции  $\tau_{\text{и}} = 5$  мс, а кривая б — прибору со временем интеграции  $\tau_{\text{и}} = 200$  мс. В аналоговом радиовещании и звукозаписи в разных странах мира используются именно эти два типа приборов (с постоянными времени 5 и 200 мс).

Быстродействующие приборы с малым временем интеграции ( $\tau_{\text{и}} = 5$  мс) удобны, когда наблюдение ведется за самыми короткими выбросами уровня — пиками, которые могут вызвать нелинейные искажения. Такие приборы называют измерителями квазипиковых значений. Международное их обозначение PPM (Peak Programme Meter) или более точно — QPPM (Quasi-Peak Programme Meter). Они стандартизованы в России и в большинстве европейских стран. Однако показания измерителей квазипиковых значений не всегда соответствуют субъективному восприятию громкости. Различные по форме звуковые материалы могут создавать сигналы с разной временной структурой — с быстрыми или более медленными изменениями напряжения, что влияет на показания прибора. Кроме того, сигналы звуковых программ могут различаться по пикфактору — коэффициенту отличия пиков программы от среднего значения уровня. Пикфактор при одном и том же пиковом уровне, в сущности, и определяет громкость.

Сигнал с ярко выраженным импульсным характером, среди мгновенных значений которого преобладают резко меняющиеся от максимума до нуля (например, при игре пианино на струнных инструментах), воспринимается не так громко, как сигнал с той же зарегистрированной прибором максимальной величиной, но в котором преобладают относительно длинные участки с медленно меняющимся уровнем (например, протяженная нота, исполненная на трубе, тромбоне, флейте и т. п.). Перепады громкости особенно заметны в передачах, в которых есть резкие переходы от речевых фрагментов к музыкальным и наоборот. Несоответствие громкости речи и музыки, имеющих разный пикфактор, при их одинаковом уровне по прибору квазипиковых значений часто вызывает активное недовольство слушателей, заставляя их в ходе передачи либо прибавлять громкость

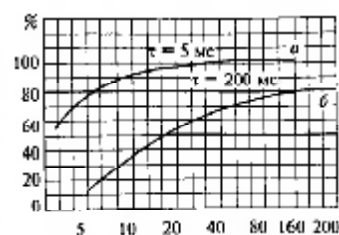


Рис. 47. Временные характеристики измерителя уровня

речи, либо приглушать музыку. Раздражает также иногда излишне громкая телевизионная реклама на фоне обычно более спокойного звучания передачи. Происходит это из-за того, что звук рекламных роликов специально компрессируется при записи для уменьшения пикфактора сигнала и увеличения его средней мощности, а следовательно, и громкости. Ведь рекламодатель заинтересован в первую очередь в том, чтобы на его товар обратили внимание, и именно за это он платит деньги. Об этом звукорежиссеру не следует забывать. Звукорежиссер, контролирующий в процессе передачи предельно допустимые уровни громкости не только по прибору, но одновременно прослушивающий программу через громкоговоритель, должен, ориентируясь именно на свой слух, регулировать уровни отдельных компонентов звукоряда так, чтобы добиться наилучшего художественного баланса громкостей.

Общую картину громкости передачи более правильно и точно отражают измерители уровня с большой постоянной интегрирования. Такие приборы называют измерителями средних значений, или VU-метрами (*Volume Units-meter*). Время их интеграции  $\tau_n = 200$  мс, что соответствует стандарту, принятому в Америке.

В наших студиях, разумеется, можно использовать любой из упомянутых измерителей уровня. Однако при контроле максимально допустимых уровней по прибору средних значений (VU-метру) следует делать поправки на его инерционность. Вернемся к временным характеристикам (см. рис. 47). Сравнение кривых *a* и *b* показывает, что импульсы длительностью 5 мс (а они часто присутствуют при воспроизведении музыки и речи) отклоняют указатель VU-метра менее чем на 20% шкалы. По сравнению с импульсами длительностью 200 мс (отклонение 80%) показания такого прибора на импульсах 5 мс такой же величины записываются более чем в 2,5 раза, или на 8–9 дБ.

Трудность работы с измерителями средних значений связана с тем, что поправки к показаниям прибора зависят от частоты появления и величины коротких импульсов в звуковом сигнале. Значения таких поправок находятся в довольно широком интервале — 3–9 дБ. Основываясь на статистических данных, можно считать, что невидимые на шкале VU-метра истинные максимальные, но короткие пики уровня (например, длительностью 5–10 мс) за счет большой инерционности прибора могут оказаться большими, чем их регистрирует прибор, примерно на 6 дБ. Да и точность поддержания максимального уровня передачи звукорежиссером составляет  $\pm 3$  дБ. Поэтому тем, кто работает с измерителем средних значений с временем интеграции 200 мс, можно рекомендовать делать поправку на эти ошибки. Например, если, по приня-

той в наших звуковых вещательных сетях диаграмме уровней, максимальный выходной уровень на пиках не превышает 1,55 В (+6 дБ), чувствительность прибора следует отрегулировать так, чтобы калибровочный синусоидальный сигнал с частотой 1000 Гц при показаниях VU-метра — 100% или 0 дБ был по напряжению меньше максимально допустимой пиковой величины не менее чем на 9 дБ, т.е. 0,55 В (–3 дБ). При такой калибровке прибора звукорежиссер остается следить, чтобы максимальные видимые пики уровня не превышали отметки 100 % (0 дБ). В этом случае истинный пиковый уровень сигнала не выйдет за пределы допустимых 1,55 В (+6 дБ). Таким образом, учитывая инерционность прибора, мы создадим резервную зону 9 дБ (*headroom*), предохраняющую канал от перегрузок. Еще более значим выбор резервной зоны перегрузок по уровню в каналах цифровых систем звукопередачи и цифровой звукозаписи. Цифровая система чувствительна к малым и кратковременным перегрузкам, которые при традиционном аналоговом методе передачи не внесли бы существенных искажений и остались незамеченными. Импульсы короче 5 мс слушателями не воспринимаются, но если их даже мгновенный уровень превышает допустимые пределы, в канале цифровой передачи это вызывает специфические искажения в виде хрипов и щелчков, которые способны сделать звук совершенно непригодным по качеству. Измерители уровня квазипиковых значений, традиционно применяемые в аналоговом радиовещании и аналоговой звукозаписи в нашей стране, не регистрируют импульсы короче 5 мс. Поэтому в цифровой аппаратуре применяются практически безинерционные измерители уровня, реагирующие на импульсы длительностью менее 0,1 мс. Их, в отличие от квазипиковых измерителей, называют PPM FAST. Показания таких приборов заметно отличаются от показаний измерителей уровня квазипиковых значений и тем более VU-метров.

Надо учитывать разницу показаний измерителя уровня на пульте звукорежиссера и пикового, безинерционного прибора, установленного на входе цифрового магнитофона. Выбор величины *headroom*, т.е. резервной зоны перегрузок цифрового магнитофона, решает указанную задачу, но следует помнить о зависимости этого выбора от типа измерителя уровня на пульте звукорежиссера. Если там установлен измеритель квазипиковых значений, *headroom* по цифровому прибору в соответствии с международным стандартом принимается равным 9 дБ (см. ранее), а при работе с более инерционным VU-метром этот запас по уровню увеличивается до 18 дБ.

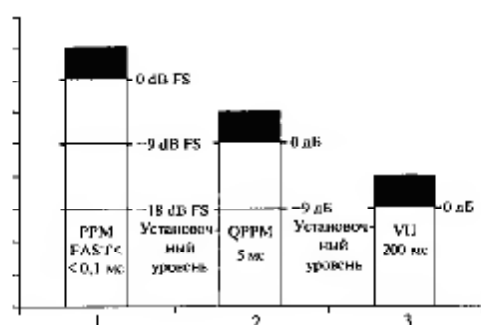


Рис. 48. Установка уровня передачи по измерителям разных типов в соответствии с международной рекомендацией

Для того чтобы облегчить проблему согласования уровней звуковых сигналов, в разных пунктах канала передачи, в том числе и на его цифровых участках, при использовании измерителей уровня разных типов, Международный союз телекоммуникаций (ITU) в разработанном документе — ITU-R BS.645-2 — рекомендует при настройке звуковых уровней пользоваться эталонным **установочным уровнем** — синусоидальным сигналом с частотой 1000 Гц. Но показания приборов различных типов на этом установочном синусоидальном сигнале должны различаться, чтобы учесть различия в показаниях измерителей разных типов на реальном программном материале. Если выполнять эти рекомендации по настройке усиления канала по установочному уровню (рис. 48), то звукорежиссер независимо от того, каким прибором он пользуется, поддерживая максимальные пики передачи так, чтобы их величина не превышала отметку 0 дБ (100%), будет гарантирован от случайных, даже кратковременных, перегрузок канала. Однако не следует путать термин «установочный уровень» (*Alignment Level*) с «максимально допустимым программным уровнем» (*Permitted Maximum Level*), который часто называют «номинальным» и который в вещательных каналах России в соответствии с ГОСТом, как уже упоминалось, равен 1,55 В (+6 дБ<sub>U</sub>).

Во многих студиях, в том числе и в России, сложилась практика калибровки канала передачи не на установочном уровне, а на максимально допустимом (номинальном). Поэтому для цифровой записи с аналогового пульта, оснащенного измерителем уровня квазипиковых значений (а такая ситуация наиболее характерна для

наших отечественных студий звукозаписи или звукового вещания), может быть рекомендованы несколько иные правила настройки канала записи, но не противоречащие международным:

- установить на выходе пульта по квазипиковому измерителю уровень синусоидального сигнала частоты 1000 Гц на номинальную величину, т.е. на 0 дБ;
- чувствительность входа цифрового звукозаписывающего устройства установить так, чтобы цифровой прибор на входе записи показывал бы -9 дБ FS;
- в ходе записи поддерживать максимальный уровень передачи по квазипиковому измерителю, не допуская превышения сигналом отметки 0 дБ по шкале прибора.

*Примечание.* В соответствии с принятыми в вещательных организациях правилами эксплуатации технических средств допускаются лишь отдельные кратковременные превышения номинального уровня, но не более чем на 2–3 дБ.

Защита цифровой части канала от перегрузок в этом случае будет полностью соблюдена.

## Коррелометр и стереогониометр

Как уже было сказано, совместимость — необходимое требование к стереофоническим фонограммам и передачам, идущим в прямой эфир. Только выполнение этого требования дает возможность широко развивать и внедрять стереофонию как на радио, так и в телевизионном вещании.

Проблема заключается в том, что при переходе от стерео- к монорежиму, когда сигналы стереоинформации суммируются в монофоническом канале (например, при использовании стереофонических записей на телевидении или при передаче их по трансляционной сети), не должно быть потерь уровней отдельных частотных составляющих сигнала, уж не говоря о снижении уровня передачи в целом.

Но уровни стереофонических сигналов складываются арифметически только в тех случаях, когда сигналы в обоих каналах синфазны, т.е. когда совпадают моменты существования максимального уровня передачи в каждом канале. Это будет соблюдено, если, во-первых, каналы при их подключении техниками правильно сфазированы между собой, а во-вторых, если сигналы возбуждаются в обоих каналах одним и тем же источником звука, находящимся на одинаковом от обоих микрофонов расстоянии.



Если же источник расположен относительно микрофонов не симметрично из-за неодинакового времени прихода от него звуковых волн к микрофонам, некоторые частотные составляющие спектра сигнала из-за различия длины их волн в каналах могут оказаться в противофазе. При сложении в результате интерференции происходит их взаимное подавление, и требование совместности не удовлетворяется.

Но чаще по двум каналам передаются сигналы разных инструментов, например скрипки, расположенной у левого микрофона, и виолончели — у правого. Такие сигналы, спектры и структура которых коренным образом различаются, устойчивых фазовых соотношений между собой не имеют. С точки зрения статистики вероятность того, что фазы левого и правого сигналов в какие-то моменты времени совпадут, равна вероятности их противофазности.

Такая пара сигналов не имеет между собой корреляции, при сложении в монофоническом канале они не интерферируют между собой, и их сумма, определяющая уровень передачи, на 3 дБ меньше уровня источников звука, располагавшихся в центре ансамбля.

При слуховом контроле стереофонической передачи левый и правый звуковые сигналы излучаются громкоговорителями обоих каналов раздельно и создают в звуковом пространстве помещения прослушивания сложную интерференционную картину. Но эта интерференция благодаря разнесению громкоговорителей в пространстве имеет совсем не тот характер и иначе воспринимается слушателем, чем интерференция, возникающая при суммировании информации обоих стереофонических каналов в монофоническом тракте передачи с одним громкоговорителем в качестве конечного звена. Поэтому при записи нельзя быть заранее уверенным, что электрическое сложение левого и правого сигналов даст полноценную и с технической, и с художественной точки зрения информацию.

На микрофонных репетициях приходится очень тщательно выбирать схему расположения микрофонов в студии и их характеристики, прослушивая фрагменты передачи не только в стереофоническом, но и в монофоническом режиме, суммируя оба сигнала и подавая их для воспроизведения на один громкоговоритель. Подобную операцию следует проводить периодически и в процессе записи. В цепях контроля микшерного пульта предусматривается схема, дающая возможность суммировать стереофонические сигналы и прослушивать их в монофоническом режиме через один громкоговоритель, не нарушая при этом режима работы основного канала стереофонической передачи.

Дополнительную помощь звукорежиссеру в оценке достигнутого стереоэффекта и в контроле совместности непосредственно в ходе самой записи может оказать прибор для объективного сопоставления по фазам двух одновременных сигналов левого и правого каналов, т.е. оценка взаимной корреляции. Здесь корреляционный метод контроля

представляет не только метрологический, но и чисто практический интерес. Такой контроль осуществляется с помощью индикатора совместности — коррелометра либо стереогониометра.

Благодаря коррелометру звукорежиссер может оценить степень взаимной корреляции левого и правого стереофонических сигналов, а от этого, как было сказано, зависит совместность фонограммы и ощущение локализации звукового образа. Коррелометр имеет шкалу от +1 до -1, разделенную на две части: выше и ниже нуля. Это может быть стрелочный прибор, либо его шкала может представлять собой набор светодиодов, а во многих компьютерных звуковых программах функции коррелометра отображаются на интерфейсе пользователя в виде виртуального прибора (рис. 49).

Из математики известно, что степень взаимной корреляции двух протекающих во времени процессов, например пары стереофонических сигналов, может быть охарактеризована величиной произведения  $wv$ , в котором  $w$  и  $v$  — отклонения от нулевого значения фаз левого и правого сигналов соответственно.

Если положительные отклонения (+ $w$ ) сопровождаются такими же отклонениями (+ $v$ ), то и произведение этих двух сигналов положительно. То же произойдет при одновременных отрицательных отклонениях (- $w$  и - $v$ ). Но при фазовых расхождениях между сигналами — разных их знаках (например, + $w$  и - $v$ ) — значение их произведения  $wv$  отрицательно.

Если исключить тем или иным способом влияние абсолютных уровней сигналов на величину этого произведения, а также проинтегрировать (усреднить) его за время ( $T$ ), которое свойственно сигналу как стационарному процессу, мы получим величину, пропорциональную коэффициенту корреляции.

При сфазированных сигналах их произведение после усреднения становится положительным. Если в каналах преобладают сигналы в противофазах, их усредненное за время  $T$  произведение



Рис. 49. Шкала стрелочного коррелометра

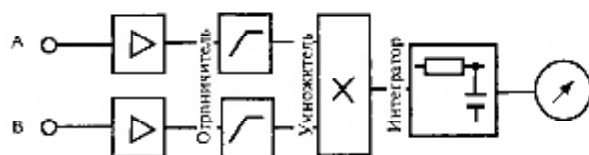


Рис. 50. Принципиальная схема коррелометра

отрицательно. Если за время  $T$  синфазные и противофазные моменты равновероятны, среднее значение произведения сигналов равно нулю.

Таким образом, при правильном фазировании микрофонов коэффициент корреляции, а следовательно, и показания прибора будут в правой части шкалы — от +1 (монозапись) до 0. Это говорит о том, что в стереофонической паре сигналов преобладают синфазные составляющие (запись совместима).

При неправильном фазировании (стрелка прибора отклоняется в отрицательную область шкалы — от 0 до -1) преобладают противофазные составляющие, и запись несовместима. Колебания стрелки прибора в зоне, близкой к нулю, означает отсутствие корреляции между правым и левым сигналами. В этом случае звучание, сохраняя совместимость, воспринимается наиболее стереофоническим, с широкой стереобазой.

Например, корреляция отсутствует между звуками двух расположенных по краям оркестра инструментов или между воспринимаемыми двумя «общими» микрофонами, отраженными от стен студии диффузными сигналами. Эти случаи характеризуются произвольными и случайными знаками фаз сигналов  $x$  и  $y$ , и среднее значение их произведения  $xy$  с увеличением продолжительности времени усреднения стремится к нулю. При отсутствии одного из сигналов коэффициент корреляции также стремится к нулю.

Таким образом, прежде чем пользоваться коррелометром, надо с помощью соответствующих электронных схем выполнить умножение двух сигналов, а затем проинтегрировать их произведение. Прибор должен действовать независимо от входных уровней сигналов. С этой целью сигналы предварительно проходят через ограничители (рис. 50).

Еще большей информативностью обладает **стереогониометр** (рис. 51). Это прибор состоит из осциллооскопа без блока временной (горизонтальной) развертки и двух усилителей горизонталь-

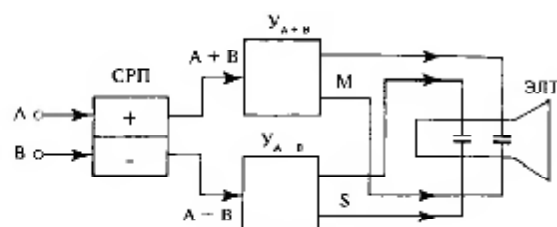


Рис. 51. Принципиальная схема стереогониометра

ного и вертикального отклонения луча электронно-лучевой трубки (ЭЛТ). Усилители прибора имеют автоматическую регулировку усиления (логарифмирование), что позволяет наблюдать за разностью фаз в большом динамическом диапазоне сигналов. Перед усилителями включен блок суммирования и вычитания входных сигналов (суммо-разностный преобразователь — СРП).

Принцип действия прибора следующий. На два входа подаются сигналы  $A$  и  $B$ , которые с помощью суммо-разностного преобразователя преобразуются в сигналы  $A+B$  и  $A-B$ . После усиления суммарный сигнал  $A+B$  подается на пластины вертикальной развертки электронно-лучевой трубки, а разностный сигнал  $A-B$  — на пластины горизонтального отклонения (рис. 52).

Изображения на экране стереогониометра соответствуют входным сигналам и позволяют обнаружить сдвиг фаз между сигналами, вплоть до полной инверсии (поворота на  $180^\circ$ ) одного из них, а также соотношение уровней в левом и правом каналах.



Рис. 52. Характерные фигуры на экране стереогониометра:

$a$  — совместимость соблюдена;  $b$  — совместимость отсутствует;  $в$  — звуковое изображение смещено влево;  $г$  — звуковое изображение смещено вправо;  $д$  — в правом и левом каналах присутствуют сигналы от различных инструментов, не связанные между собой по положению фаз и создающие на экране пятно неправильной формы и быстроменяющееся по концентрации (запись совместима, база звукового изображения широкая)

При подаче на вход прибора сигналов реальной стереофонической программы изображения на экране приобретают более сложный вид, соответствующий непрерывным изменениям сигналов А и В во времени. Но при некотором опыте по изображениям на экране стереогониометра можно определить правильность передачи звуковой картины, распределение направлений на отдельные виртуальные источники, наличие или отсутствие баланса, фазовые соотношения и совместимость передачи.

Например, передача совместима, если весь экран трубки засвечен сложным узором примерно одинаковых размеров по различным направлениям (широкая база) или фигуры на экране трубки растянуты в основном вдоль вертикальной оси (база более узкая). Передача несовместима, когда фигуры на экране растянуты вдоль горизонтальной оси.

Если же большая ось изображения на экране прибора длительное время имеет наклон к горизонтали, то это означает, что нарушен стереофонический баланс, например панорама сдвинута влево или вправо.

Благодаря универсальности применения и обилию сведений, содержащихся в осциллограммах, стереогониометр (его часто называют гониометром) стал популярным прибором, применяемым при записи и обработке стереофонограмм, а также при измерении и настройке студийной аппаратуры.

## Громкоговорящий контрольный агрегат

Контроль качества сигнала передачи по приборам не может заменить звукорежиссеру слуховой контроль, который в профессиональных студиях обычно осуществляется с помощью специального громкоговорящего устройства. Контрольный агрегат содержит мощный усилитель и акустическую систему, состоящую из одного, а чаще нескольких громкоговорителей, установленных в специальном ящике. К качеству самих контрольных агрегатов предъявляются очень жесткие требования. Кроме неискаженной звукопередачи они должны обеспечивать по возможности одинаковый тембр звучания, а для этого иметь строго стандартизованные технические параметры с малыми допусками отклонений от нормы. Только при одинаковых условиях прослушивания в разных радиодомах и студиях звукозаписи можно наиболее объективно судить о качестве звукозаписей и передач.

В качестве преобразователя электрической энергии в акустическую в контрольных агрегатах чаще всего используются *конусные электродинамические громкоговорители — динамики* (рис. 53, 54).

Основа магнитной системы громкоговорителя — постоянный магнит, выполненный в виде стакана, его верхний фланец имеет круглый вырез. Центральный цилиндрический керн входит в верхний вырез заподлицо с поверхностью фланца. Между керном и вырезом фланца оставлен зазор, в котором действует радиальное магнитное поле. В зазоре магнитной системы размещена катушка медного провода, намотанного на легкий каркас, жестко связанный с конусом из бумажной массы, так называемым диффузором. Диффузор и есть излучатель звуковых колебаний. Диффузор и катушка образуют подвижную колебательную систему, которая гибко крепится к ободу диффузородержателя с одной стороны центрирующей шайбой, с другой — гофром конуса. Центрирующая шайба позволяет отрегулировать центровку катушки в зазоре.

Когда на выводы звуковой катушки подано переменное напряжение звуковых частот, текущий через нее ток создает вокруг переменное магнитное поле, которое взаимодействует с полем постоянного магнита. Возникающие при этом электродинамические силы заставляют катушку колебаться в зазоре, а она в свою очередь увлекает за собой диффузор. В итоге система начинает излучать звуковые колебания. Для контрольных агрегатов, предназначенных для профессиональных студий звукозаписи, очень важно подобрать такие громкоговорители, которые отвечали бы высоким требованиям контрольного прослушивания создаваемых программ.

О качестве громкоговорителя можно судить по следующим основным техническим характеристикам.

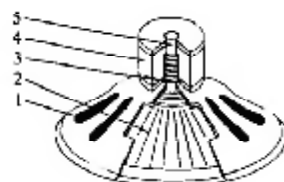


Рис. 53. Конструкция электродинамического громкоговорителя:

1 — диффузородержатель; 2 — диффузор; 3 — звуковая катушка; 4 — постоянный магнит; 5 — цилиндрический керн

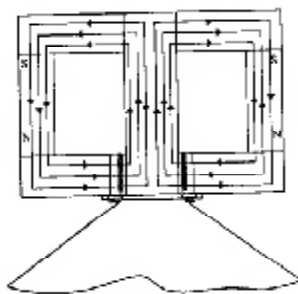


Рис. 54. Магнитная и подвижная системы динамика. (Стрелками указаны силовые линии постоянного магнитного поля.)

**Номинальная** (нормированная) мощность громкоговорителя определяется как наибольшая мощность, при которой вносимые громкоговорителем искажения гармонического (синусоидального) сигнала еще не превосходят допустимой техническими условиями величины. Она вычисляется в вольтамперах (ВА). Когда амплитуды поданного на громкоговоритель сигнала чрезмерно велики, система оказывается перегруженной, нарушается пропорциональность между скоростью движения подвижной части и изменениями тока в катушке. При этом форма излучаемых звуковых колебаний не будет точно соответствовать форме тех электрических колебаний, которые подведены к громкоговорителю. Перегрузка громкоговорителя воспринимается на слух как дребезжание и хрипы. Сигналы, мощность которых выше номинальной, могут вызвать тепловые или механические повреждения громкоговорителя. Величина номинальной мощности громкоговорителя оговаривается предприятием-изготовителем.

Эффективность работы громкоговорителя определяется его **чувствительностью**, т.е. величиной звукового давления, создаваемого громкоговорителем на расстоянии 1 м от него, при условии что на звуковую катушку подано такое напряжение, которое развивает в ней электрическую мощность, равную 1 ВА.

Чувствительность громкоговорителя может оказаться неодинаковой на разных частотах сигнала. Его **частотная характеристика** — отражение зависимости чувствительности от частоты звукового сигнала. Чем шире интервал звуковых частот, который воспроизводится громкоговорителем, и чем ровнее его частотная характеристика, тем лучше аппарат. Однако создать громкоговорители с совершенно ровной частотной характеристикой очень трудно, поскольку она во многом зависит от его размера и механических свойств подвижной системы. При этом требования к равномерности излучения низких и высоких частот противоречивы. Диффузоры с большим конусом и массивной звуковой катушкой хорошо излучают низкие частоты. Высоких частот, напротив, требуют малые излучатели с малой массой подвижной системы.

Частотную характеристику громкоговорящих контрольных агрегатов обычно выравнивают, используя двухполосные или даже трехполосные устройства. Высокие частоты в них воспроизводит громкоговорители небольших размеров, низкие — больших. Звуковой сигнал специальными полосовыми электрическими фильтрами делится на две или три части, каждая из которых воспроизводится соответствующими громкоговорителями. Полосовое разделение сигнала чаще всего выполняется пассивными фильтрами, размещаемыми на выходе широкополосного усилителя мощности (рис. 55).

Некоторые фирмы выпускают контрольные агрегаты с двумя или тремя усилителями мощности. Каждый из этих усилителей пропускает только определенную частотную полосу (низких, высоких и средних частот) и на выходе имеет наиболее подходящий для воспроизведения данной полосы частот громкоговоритель. Делить частоты на полосы приходится еще и потому, что низкие частоты при прочих равных условиях имеют большие амплитуды и могут повредить высокочастотный излучатель.

Направленность громкоговорителя определяется рабочим пространством, покрываемым излучением данного громкоговорителя. Низкие частоты звукового диапазона всегда создают в помещении практически ненаправленное звуковое поле, т.е. интенсивность их излучения одинакова в любом направлении. Вышшим же частотам присуще излучение, максимально направленное к акустической оси громкоговорителя, которое быстро спадает при прослушивании звука под углом к этой оси.

Чтобы звуковая картина не изменялась при различных размещениях слушателей и контрольного агрегата, часто используют два (или более) высокочастотных излучателя, что позволяет перекрыть звуковым полем максимальное пространство. Контрольные агрегаты монтируются в специальных ящиках или деревянных тумбах, от конструкции, материала и внутренней акустической обработки которых во многом зависит качество воспроизведения. Усилитель контрольного агрегата, как было сказано, повышает мощность до уровня, достаточного, чтобы поддерживать требуемую громкость воспроизведения. Мощность обычно выбирается с запасом, обеспечивающим передачу даже самых интенсивных коротких выбросов без искажений. Контрольный агрегат профессионального назначения должен излучать такой звуковой поток, который на расстоянии 1 м от громкоговорителя может создать звуковое давление примерно 100–105 дБ относительно порога слышимости.

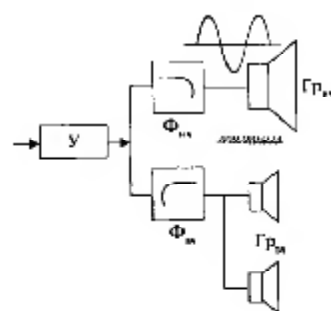


Рис. 55. Схема подключения громкоговорителя (Гр) к выходу усилителя (У) мощности через полосовые фильтры (Ф)

## Оценка качества звучания фонограмм

Умение профессионально оценить качество звукозаписи — одно из важнейших условий успеха работы звукорежиссера, звукооператора и инженера звукозаписи. Следует стремиться к тому, чтобы оценки были по возможности объективны. Техническое качество фонограммы не должно рассматриваться обособленно, в отрыве от ее эстетической оценки, т.е. от того, как будет воспринимать слушатель все ее художественные достоинства и недостатки.

Однако всесторонний подход к оценке работы звукорежиссера в известной мере субъективен. Поэтому нужно одинаково, с одних и тех же позиций, пользуясь единой терминологией, научиться формулировать свое отношение к качеству данной записи. Если экспертизу выполняет не один специалист, а группа опытных экспертов, мнения которых совпадают, их оценки можно с большой степенью достоверности считать объективными.

Для облегчения поставленной перед экспертами задачи существует перечень параметров качества фонограмм. Основная идея этого предложения заключается в строгой конкретизации отдельных параметров звучания, поддающихся оценке и в совокупности определяющих качество звучания в целом.

Прослушивание фонограммы для ее квалифицированной оценки следует проводить в специальном, отвечающем акустическим нормам помещении. После прослушивания и всесторонней оценки звучания по всем параметрам качества эксперт в протоколе ставит соответствующую оценку по пятибалльной системе: 5 (отлично), 4 (хорошо, с небольшими дефектами), 3 (удовлетворительно), 2 (из-за серьезных дефектов может быть принято лишь условно, как документ), 1 (запись непригодна).

Рассмотрим параметры качества.

**Пространственное впечатление** оценивается по переданной в записи акустической обстановке в студии (зале), соответствию размеров студии количеству исполнителей и характеру музыкального произведения, времени и характеру реверберации, а также акустическому балансу, т.е. соотношению прямых и отраженных звуков. Важным достоинством музыкальных записей считается ощущение звуковой перспективы в глубину, т.е. иллюзия различных расстояний от слушателя до групп инструментов оркестра, ощущение многоплановости звуковой картины, в некоторой степени воссоздающей объемность звучания, которая, как известно, теряется особенно заметно в монофонических записях.

Однако если многоплановость подменяется многопространственностью, это следует считать недостатком звукорежиссерской работы. Под многопространственностью понимается такое ощущение звучания различных инструментов, как если бы они были расположены в разных помещениях, различающихся акустическими свойствами. Если она не предусмотрена специально режиссерскими планами для создания необходимых мизансцен, то считается существенным нарушением естественности звукопередачи. Причинами многопространственности звучания могут быть неудачные расположение микрофонов в студии (при полимикрофонном способе записи) или применение искусственной реверберации.

Под **прозрачностью** понимают хорошую различимость звучания отдельных инструментов в оркестре, ясность музыкальной фактуры, разборчивость текста при пении и т.п. Прозрачность находится в прямой зависимости от акустической обстановки при записи, музыкального и акустического балансов и в значительной мере от инструментовки исполняемого произведения. При монофонической звукопередаче в результате большего эффекта взаимной маскировки сигналов добиться прозрачности значительно труднее, чем при стереофонии.

**Музыкальный баланс** — это соотношение между громкостью звучания различных оркестровых групп, определяемое в основном уровнем прямых звуковых сигналов, приходящих непосредственно от исполнителя к микрофону. Найти при записи оптимальный музыкальный баланс — одна из труднейших задач звукорежиссера. Приходится учитывать различия в восприятии звука через динамики и естественного прослушивания оркестра в натуре и делать соответствующие поправки при расстановке микрофонов и микшировании отдельных компонентов оркестра. Однако правильный музыкальный баланс при записи достигается обычно легче, если оркестр в студии был хорошо сбалансирован.

**Тембр** звучания музыкальных инструментов и голосов певцов должен быть передан естественно, без искажений, что зависит от расположения исполнителей и микрофонов в студии, характера студийной акустики, частотной характеристики тракта звукопередачи и звукозаписи, характера и дозы реверберации. Тембр существенно изменяется при повышенных нелинейных искажениях в тракте передачи, детонации и зависит также от нестационарных процессов, возникающих в аппаратуре и искажающих в первую очередь звуковые атаки, т.е. фронты нарастания музыкальных импульсных сигналов, специфических для определенных инструментов и способов звукоизвлечения.

**Помехи**, которые возникают при прослушивании музыки, мешающие ее восприятию. В понятие «помехи» входит:

- шумы, проникающие в студию в результате несовершенства звукоизоляции и создаваемые самими исполнителями (шелест переворачиваемых нотных страниц, стуки клапанов духовых инструментов, скрип мебели, паркета или подставок для хора, шум зрительного зала при трансляционных записях и т.п.);
- электрические наводки, фон, шумы усилителей, шум магнитной ленты в паузах, модуляционный шум, копирэффект;
- импульсные помехи: электрические трески, шелчки и т.п.;
- сильные нелинейные искажения, заметная на слух детонация, помехи от монтажных склеек, а также от сбавляющих автоматических регуляторов уровня и т.п.

**Исполнение.** Оценке подвергаются как трактовка исполнителем данного произведения, так и само исполнение: темп, интонировка, чистота интонирования и другие художественные качества записи.

**Инструментовка (аранжировка).** В некоторых случаях дополнительно к основным оценкам приходится определять пригодность данного произведения для записи с точки зрения его инструментовки (или аранжировки эстрадного материала). Излишне насыщенная инструментовка иногда может сделать произведение настолько неудобным для записи, что самая совершенная техника и любые способы звукоинженерии не помогут добиться удовлетворительного музыкального баланса и хорошей прозрачности.

**Звукоинженерская техника.** Оценивается правильность подбора и расстановки микрофонов, целесообразность использования спецэффектов, качество микширования и другие стороны создания звукоинженером звукового образа, не отраженные в предыдущих пунктах оценки.

**Стерефонический эффект.** Оценка качества стерефонической фонограммы будет неполной, если ее давать лишь с позиций критериев, принятых для оценки обычной одноканальной записи. Отличительные качества стерефонического воспроизведения — объемность звучания и естественность акустической перспективы — можно оценить с помощью некоторых дополнительных показателей, не имеющих смысла при монофонической технике передачи и звукозаписи.

К эстетическим показателям оценки стереофонии следует отнести:

- угол слышимости, под которым слушатель воспринимает звуковое изображение;

- стереофоническую разрешающую способность, т.е. определяемую субъективно локализацию отдельных элементов звукового изображения в определенных точках пространства в пределах угла слышимости;
- акустическую атмосферу и эффект возникновения у слушателя ощущения присутствия в том помещении, где происходит передаваемое звуковое событие;
- совместимость.

Иногда, анализируя стереофоническое воспроизведение, пытаются выделить причину предпочтения слушателями стереовоспроизведения обычному монофоническому. Считается, что в первую очередь этому способствует субъективно воспринимаемая локализация кажущихся (виртуальных) источников звука, т.е. возможность определить, как они расположены в пространстве. Однако, как уже отмечалось, слушатель, находящийся в задних рядах концертного зала с довольно большим временем реверберации, воспринимает звуки, приходящие со сцены, под малым углом слышимости и как бы сквозь призму многократных звуковых отражений от стен, потолка и других ограничивающих помещения поверхностей. В этих условиях локализация отдельных инструментов оркестра не отчетлива и поэтому не может играть решающей роли в слуховом восприятии. Тем не менее в хорошем концертном зале и в этом случае сохраняются прозрачность звучания и ощущение непосредственного присутствия слушателя в звуковом поле источника.

Все изложенные соображения и должны лечь в основу оценки работы звукоинженера при записи по воссозданию им полноценного стереофонического звучания. Окончательная оценка фонограммы является усреднением оценок всех экспертов по всем параметрам качества.



## Глава 4

# ЗАПИСЬ ЗВУКОВОЙ ИНФОРМАЦИИ

**Звукозапись** — это процесс переноса звуковых сигналов с помощью специального устройства на движущееся тело. В процессе звукозаписи изменяется физическое состояние или форма поверхности материала. Эти изменения могут быть подобны форме звукового сигнала, такую запись называют аналоговой. Запись можно вести, применяя кодовые послышки, — это кодовая запись. Коды могут быть различными, но нас будут интересовать только те, что связаны с цифровой кодировкой звуковых сигналов и, соответственно, с цифровой записью звука. Материал, используемый при звукозаписи и сохраняющий информацию, называется носителем записи. След на носителе после записи звуковой информации в виде череды аналоговых или кодовых изменений физического состояния материала называют фонограммой, а место расположения фонограммы на носителе — дорожкой.

**Воспроизведение** — процесс, обратный звукозаписи, его конечная цель — восстановление сигналов звуковой информации.

Известно довольно много способов и, соответственно, систем звукозаписи. Мы опишем только те, что находят применение в профессиональной звукозаписи. Их можно разбить на следующие группы: механическая, фотографическая, магнитная, оптическая и магнитооптическая системы.

## § 1. Механическая и фотографическая системы звукозаписи

**Механическая звукозапись** — первая попытка зафиксировать звук и затем воспроизвести его. Первоначально механическая запись велась на покрытых воском валиках (фонограф Эдисона), потом на дисках, но во всех случаях использовался один принцип. Диа-

фрагма с прикрепленным к ней резцом перемещалась под действием звуковых колебаний. Резец режет канавки, глубина которых соответствует форме записанного сигнала. Позже перешли к системе записи с поперечными перемещениями резца, размах которых пропорционален уровню звука.

При воспроизведении игла звукоснимателя перемещается вдоль канавки, совершая колебания в соответствии с ее искривлениями или изменением глубины. Игла толкает диафрагму, которая повторяет движения при записи звука. Перемещения диафрагмы воспроизводят соответствующие изменения звукового давления, существовавшие в момент записи звука. Конечно, точность соответствия записываемого и воспроизводимого звука в описанной системе не идеальна. Но сохранение определенного подобия очевидно.

Рассмотренная схема механической записи звука оказалась на редкость консервативной и дошла от Эдисона до наших дней, хотя и претерпела многие технические усовершенствования, главная цель которых всегда заключалась в повышении степени подобия сигналов на входе и выходе. А для этого требовалось расширение частотного диапазона канала записи—воспроизведения, снижение шума и коэффициента нелинейных искажений.

Примером массового тиражирования фонограмм, выполненных на основе механической записи, служат всем памятные и до последнего времени хранящиеся у коллекционеров-меломанов грампластины. Процесс производства грампластинок довольно сложен. Станок механической записи звука имеет массивную планшайбу, приводимую в движение двигателем. Последний связан также с механизмом перемещения записывающего устройства (рекордера) в радиальном направлении. Запись ведется на алюминиевом диске, покрытом специальным лаком. Диск крепится на поверхности планшайбы. К рекордеру, являющемуся преобразователем электрической энергии в механическую, подводится ток звуковой частоты. В современной практике производства грампластинок первичная запись обычно осуществляется на магнитофоне, а уже потом магнитная фонограмма перезаписывается на станке описываемым здесь способом. Рекордер снабжен резцом, колеблющимся в плоскости, параллельной поверхности вращающегося диска (рис. 56).

Постепенно, двигаясь от края диска к центру, рекордер своим резцом прорезает в его лаковом покрытии спиральную извилистую канавку. Извилины этой канавки по форме повторяют форму записываемых звуковых колебаний и тем больше, чем больше размах этих колебаний. Выполненная таким образом запись — исход-



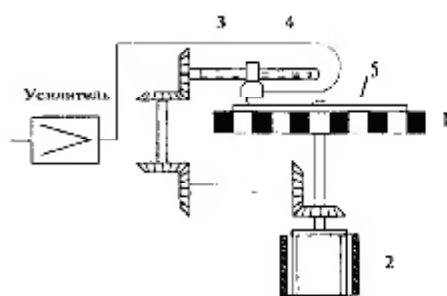


Рис. 56. Станок механической записи звука:

1 — планшайба; 2 — двигатель; 3-4 — механизм управления записывающим устройством; 5 — записывающий диск

ная для матрицы, с которой затем прессованием изготавливают граммпластинки.

Оригинал, или мастер-диск, делают так. Лаковую поверхность исходного диска поверх уже сделанной записи, используя определенные химические процессы, серебрят. Тонкий слой серебра необходим как хорошо проводящий электрод. Далее следует гальванические процессы. На серебре наращивают слои металлов (никеля, затем меди). Слой серебра точно повторяет сделанный при механической записи рисунок, а гальванопластика сохраняет его. Теперь остается удалить слой лака — и металлическая копия первичной записи готова. Однако это копия — негатив, там, где на лаковом диске были углубления, на металлической поверхности — выступы, и наоборот. Так получают первый оригинал, с помощью которого уже можно печатать пластинки. Однако эта негативная матрица быстро изнашивается, поэтому процесс гальванического копирования продолжают, чтобы сохранить первый оригинал и обеспечить высокий тираж пластинок. С первого оригинала снимают несколько позитивных металлических копий (вторые оригиналы). Вторые оригиналы — исходные материалы для снятия третьих оригиналов (новых негативных копий), они-то и поступают на заводы в качестве матриц для прессования пластинок. Ресурс каждой такой матрицы — около 1000 пластинок, материалы для их изготовления — особые синтетические смолы (например, винилит и др.).

Звук с граммофонной пластинки воспроизводится с помощью звукоусилителей — электромагнитных или пьезоэлектрических

преобразователей механической энергии в электрическую. Игла звукоусилителя при воспроизведении движется по канавке и, следуя ее изгибам, колеблется, повторяя смещения резца при записи. В результате на выходе звукоусилителя формируются переменные электрические колебания звуковых частот, их усиливают и подают на громкоговоритель. Время воспроизведения граммофонных пластинок зависит от их диаметра, скорости вращения и шага записи, т.е. от расстояния между соседними канавками — дорожками записи. Существует несколько стандартных скоростей вращения пластинок: 78, 45 и 33 об/мин. Соответственно и устройства воспроизведения граммофонных записей — проигрыватели — имеют различные, переключающиеся скорости вращения диска. Большая длительность воспроизведения — малый шаг записи. При малой скорости вращения и малом шаге записи плотность «упаковки» канавок или дорожек возрастает, длительность записи — воспроизведения растет, причем пропорционально квадрату уменьшения названных параметров. Квадратичная зависимость информационной плотности записи от размеров минимального элемента характерна для всех поверхностных носителей. Долгоиграющие пластинки при этом имеют очень высокие качественные показатели звучания.

**Фотографическая запись** применяется в производстве кинофильмов (рис. 57). Звуковой сигнал через усилитель (У) поступает на специальное устройство — модулятор света (МС), где воздействует на световой луч, падающий на светочувствительную киноплёнку.

Запись звука ведется на звуковые дорожки, размещаемые у края пленки. Используется тот же химический процесс, что и при фотографировании изображений.

Для модуляции света могут использоваться два способа. Первый связан с модуляцией светового луча по яркости, он широко применялся в первые годы звукового кинематографа. Фонограмма в этом случае представляется изменениями плотности зачернения пленки вдоль дорожки. Такая запись известна как *продольная фотографическая запись звука*. Большое распространение получила применяемая и сегодня *поперечная запись*. В этом случае модулятором является ска-

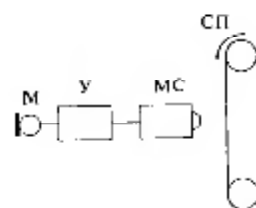


Рис. 57. Фотографическая запись звука:

М — микрофон; У — усилитель; МС — модулятор света; СП — светочувствительная пленка

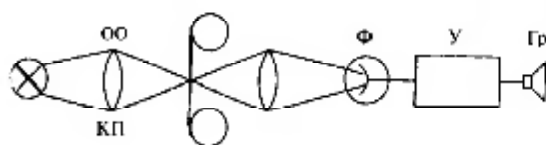


Рис. 58. Воспроизведение фонограммы кинофильма:  
лампа ОО — оптическая система; КП — кинолента; Ф — фотоприемник;  
У — усилитель; Гр — громкоговоритель

нер, перемещающий световой пятно в направлении, ортогональном оси звуковой дорожки. Размах этих колебаний пропорционален уровню записываемого сигнала. Плотность зачернения фонограммы меняется относительно слабо и не является элементом, несущим информацию, которая заключена в изменениях ширины зачернения дорожки.

Главный недостаток фотографической записи звука в том, что для ее осуществления требуются вспомогательные фотохимические процессы: проявление и закрепление негативной фонограммы, копирование и вновь проявление и закрепление позитива.

Рассмотрим процесс воспроизведения звука с фотографической фонограммы (рис. 58).

Свет от лампы фокусируется оптической системой в узкий пучок и падает на звуковую дорожку киноленты. В соответствии с шириной (или плотностью при продольной записи) освещенного участка фонограммы меняется прошедший световой поток. Модулированный таким образом свет попадает на фотоэлемент — фотодиод, через который протекает ток, пропорциональный мощности светового потока, а значит, подобный сигналу на фотографической фонограмме. Затем этот сигнал проходит через усилитель и может быть воспроизведен, например, громкоговорителем.

Фотографическая система записи звука и воспроизведения удобна в кинопроизводстве для получения фотограмм, синхронных с изображением. Этим область ее применения и ограничивается, поскольку качественные показатели системы записи невысокие и пленку сложно обрабатывать.

## § 2. Магнитная запись звука

Немногим более 60 лет назад на фирме BASF была создана первая магнитная лента и тем самым заложен фундамент современной магнитной записи. Сегодня трудно представить радиове-

дение, телевидение, студии фондовой записи звука, впрочем, как и компьютерную технику, исследовательские лаборатории, быт современного человека без магнитной записи.

Многие годы эта техника и ее носители совершенствовались, но основной принцип сохранился. И хотя сейчас все чаще используются дисковые накопители (о них мы расскажем позже), ленточные магнитофоны также достаточно широко распространены, и эта ситуация, вероятно, сохранится в обозримом будущем.

### Принципы магнитной записи информации

Основа магнитной записи — намагничивание ферромагнитных материалов и сохранение этого состояния после прекращения действия поля, причем практически неограниченно долго. Запись выполняется с помощью специального устройства — записывающей магнитной головки, возбуждающей переменное магнитное поле. Относительно этой головки и в контакте с ней перемещается носитель с ферромагнитным рабочим слоем. На этом слое остается след остаточного намагничивания. След — это дорожка записи, остаточное намагничивание — сигналограмма (в устройствах записи звука — фонограмма). Считывание фонограммы — процесс, обратный рассмотренному. Магнитное поле носителя, перемещающегося относительно считывающей головки, возбуждает в ней индукционный электрический ток — фактически электрический сигнал звуковой частоты.

В этой главе речь пойдет только об аналоговой записи магнитных сигналограмм. Любые аналоговые преобразования, как уже отмечалось, опираются на принцип подобия. Это означает, что при любых преобразованиях сигнала во всех звеньях каналов записи — считывания сохраняется относительная форма сигнала. Любое нарушение подобия ведет к нелинейным искажениям — фактору, как подчеркивалось в гл. 2, очень неприятному. Главная задача разработчиков магнитофонов, а затем и обслуживающего их технического персонала заключается в максимально возможном сохранении подобия в каналах записи и воспроизведения. Задача это непростая и, строго говоря, не имеющая точного решения. Отклонения были, есть и будут. Их не избежать, но можно и потому необходимо снизить до минимально допустимого уровня. Это путь компромиссов, без которых магнитная запись практически невозможна.

Прежде чем перейти к описанию процессов магнитной звукозаписи и воспроизведения, следует вспомнить некоторые определения и явления, относящиеся к основам теории магнитного поля.

## О физике магнитной записи

Напряженность магнитного поля традиционно обозначается латинской буквой  $H$ . Если в этом поле разместить магнитовосприимчивый материал, он намагничивается, т.е. в нем возникает магнитная индукция. Величина намагниченности материала обозначается латинской буквой  $I$ , а магнитное поле, создаваемое им, оценивается по потоку магнитной индукции  $\Phi$ . В системе единиц измерений СИ за единицу магнитного потока принимается 1 Вебер (Вб). Однако чаще пользуются производными этой единицы: 1 нВб (нановебер) =  $10^{-9}$  Вб или 1 пВб (пиковебер) =  $10^{-12}$  Вб. Поле магнитной индукции пропорционально полю магнитной напряженности. Коэффициент пропорциональности  $\mu$ , называемый магнитной проницаемостью, различен для разных веществ, поэтому при одной и той же напряженности магнитного поля его индукция в разных средах будет различной.

По магнитным свойствам все материалы делятся на три группы: парамагнитные, диамагнитные и ферромагнитные. *Парамагнитные материалы* практически невосприимчивы к магнитному полю, их магнитная проницаемость близка к единице и почти не отличается от магнитной проницаемости вакуума. Парамагнетики реагируют на магнитное поле, но относительно слабо. Однако главное в том, что при снятии поля магнитная индукция в них исчезает, что делает парамагнетики попросту бесполезными для магнитной записи.

Магнитная проницаемость *диамагнетиков* меньше единицы, поэтому магнитное поле буквально выталкивает их. Диамагнетики применяются в магнитных головках для эффективного формирования поля рассеяния. Без диэлектрической прокладки поле в рабочем зазоре почти не выходит наружу.

*Ферромагнетики* — вещества, в которых атомные носители магнетизма обладают собственным магнитным моментом, т.е. представляют собой малые магниты. Для таких материалов энергетически выгодной может оказаться дальняя упорядоченность, когда в достаточно большой (в сравнении с атомными расстояниями) области моменты атомных носителей магнетизма выстраиваются в одном направлении. Такая среда (ниже некоторой критической температуры, называемой точкой Кюри) распадается на домены — области, где магнитные моменты элементов ориентированы одинаково.

Собственные магнитные моменты доменов при этом могут быть ориентированы случайно, и конечная намагниченность окажется нулевой. Однако внешнее магнитное поле с напряженностью выше

некоторой пороговой, способно выстроить магнитные моменты доменов преимущественно в одном направлении. В последней фразе есть некоторые оговорки, касающиеся существенно важных моментов. Если внешнее магнитное поле переключает магнитные моменты доменов разом в одном направлении, это хорошо, но для цифровой записи. А вот в средах, в которых ориентирующее действие магнитного поля сказывается «преимущественно», т.е. в определенных границах напряженность магнитного поля и поля магнитной индукции оказываются пропорциональными, обеспечивается подобие — то, что надо для аналоговой записи. К сказанному следует добавить, что ферромагнетики при температурах ниже точки Кюри обладают «памятью» и способны сохранять остаточную намагниченность довольно долго — более 10 лет практически без изменений! Это нужно для записи и долговременного хранения. Магнитное состояние вещества обратимо: вновь воздействуя магнитным полем, его можно видоизменить нужным образом, т.е. переписать информацию.

Ферромагнетики — наиболее общий случай магнитоупорядоченного состояния веществ, поддающегося внешнему управлению. В магнитной записи применение нашел более узкий класс ферромагнетиков — *ферромагнитные материалы (ферромагнетики)*. К ним относятся железо, кобальт, никель и сплавы этих элементов переходной (по таблице Менделеева) группы металлов.

## Намагничивание ферромагнетиков, гистерезис

График зависимости намагниченности от величины напряженности внешнего магнитного поля позволяет наглядно представить интересное и сложное явление магнетизма, называемое *гистерезисом*. Это явление исключительно важно для понимания процессов магнитной записи, поэтому о нем поговорим подробнее. Намагниченность материала, как и напряженность магнитного поля, — векторные функции поля. Одинаково важно знать величину (модуль) вектора и его направление. Предположим, что магнитный вектор сохраняет пространственную ориентацию, но меняет направление на  $180^\circ$  (рис. 59), что условно принимается за положительные и отрицательные направления ( $H$ ). То же самое можно сказать и о положительных, и об отрицательных значениях вектора магнитной индукции, а следовательно, намагниченности ( $I$ ).

При возрастании напряженности поля от нулевого значения до некоторой величины  $+H_{max}$  намагниченность тела возрастает от нуля до  $+I_{max}$  по кривой ОМ, называемой начальной кривой на-

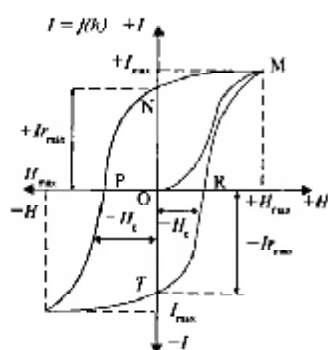


Рис. 59. Зависимость намагниченности от напряженности внешнего магнитного поля. Петля гистерезиса

магнитничавания. На ней нет линейных участков, что говорит о несоразмерности изменении магнитной индукции. Причина — зависимость величины магнитной проницаемости ферромагнитного материала от напряженности внешнего магнитного поля.

При значениях напряженности, близких к  $I_{\text{max}}$ , рост намагниченности замедляется, а потом вовсе прекращается. Наступает момент так называемого магнитного насыщения (на графике ему соответствует точка M с координатами  $H_{\text{max}}, I_{\text{max}}$ ). При уменьшении напряженности магнитного поля  $H$  намагничен-

ность также падает, но этот процесс идет медленнее, уже не по начальной кривой намагничивания, а по новой — MN.

При нулевом значении поля ( $H = 0$ ) намагниченность сохраняет некое остаточное значение  $+I_{\text{res}}$ . Именно это остаточное намагничивание и лежит в основе магнитной записи.

Для того чтобы устранить остаточную намагниченность, необходимо далее менять напряженность внешнего магнитного поля, направляя его, но в сторону отрицательных величин. Тогда намагниченность станет все быстрее уменьшаться и достигнет нулевой отметки при отрицательном значении напряженности внешнего магнитного поля, равном некоторой величине  $H_c$ . Эта напряженность магнитного поля, преодолевающая остаточную намагниченность, называется коэрцитивной силой. Значения остаточной намагниченности и коэрцитивной силы — параметры, определяющие характерные свойства ферромагнитного материала.

Продолжим изменять внешнее магнитное поле и проследим при этом за изменениями магнитного состояния материала. При дальнейшем увеличении напряженности поля в сторону отрицательных значений намагниченность среды возрастает, но с поляриностью противоположного знака и достигает S — точки насыщения при  $-I_{\text{max}}$ . Меняя напряженность внешнего магнитного поля от  $-H_{\text{max}}$  до  $+H_{\text{max}}$ , можно построить вторую ветвь кривой, известной как петля гистерезиса.

Итак, при изменении напряженности внешнего магнитного поля намагниченность ферромагнитной среды меняется по кривой MNPSTRM, называемой предельной петлей гистерезиса. По форме петли и судят о магнитных свойствах материала (рис. 60). Широкая петля гистерезиса указывает на магнито-жесткий материал с большой коэрцитивной силой. Применяются такие материалы для изготовления постоянных магнитов и носителей магнитной записи. Магнитомягкие материалы имеют, напротив, узкую петлю гистерезиса, спадающие участки кривой, близкие к вертикали. Это материалы с малой коэрцитивной силой и большой магнитной проницаемостью. Намагниченность у них быстро растет при малых напряженностях поля. Такие материалы выгодны для изготовления сердечников трансформаторов, магнитных головок, т.е. таких устройств, которые должны служить хорошим проводником магнитного потока и легко перемагничиваться без больших затрат энергии.

Если действующее на материал магнитное поле не достигает величины, вызывающей намагничивание до насыщения, изменение магнитного состояния происходит по кривым, лежащим внутри предельной петли гистерезиса, по так называемым частным петлям перемагничивания (рис. 61).

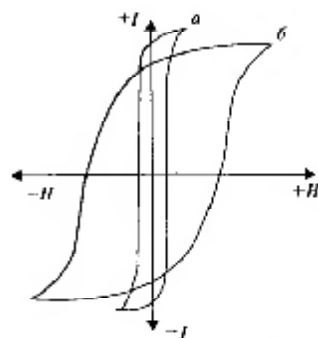


Рис. 60. Петля гистерезиса (условно):

a — магнитомягкого материала;  
b — магнитожесткого материала

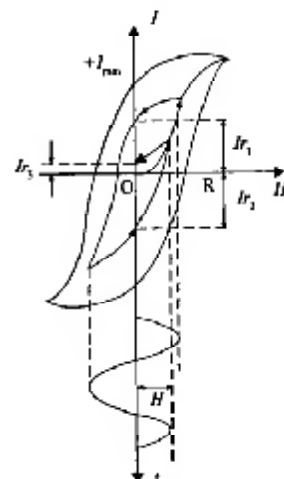


Рис. 61. Частные циклы перемагничивания

## Схема аппарата магнитной записи и его отдельные узлы

Большинство современных магнитофонов — стереофонические. Они отличаются от монофонических конструктивно только тем, что имеют спаренные стереофонические головки записи и воспроизведения, а также по два усилителя записи и соответственно по два усилителя воспроизведения. Оба канала записи—воспроизведения стереофонического магнитофона идентичны. Поэтому далее ограничимся описанием монофонического варианта магнитофона.

Современный магнитофон — сложное радиоэлектронное устройство, однако в принципе он мало чем отличается от первых аналогов. Любой магнитофон начинается с *лентопротяжного механизма*. Его функции просты, но ответственны: равномерное перемещение *магнитной ленты* — носителя записи относительно *магнитных головок*, установленных чаще всего (но это не правило) на его верхней панели. Назначение *усилителей записи* и воспроизведения очевидно (далее мы поясним, зачем нужен *генератор тока высокой частоты* стирания и подмагничивания).

В современных магнитофонах в качестве носителя записи применяется тонкая эластичная лента с основой из ацетата, поливинилхлорида или полиэфира (рис. 62). Поверх этой ленты наносится слой ферролака — связующего вещества с мельчайшими частицами

порошка окислов железа, двуокиси хрома или подобных им ферромагнетиков и различных добавок. По действующему стандарту для студийной профессиональной звукозаписи магнитная лента имеет ширину 6,25 мм (1/4 дюйма). Однако все более широко начинают применяться носители с иными параметрами. В бытовых кассетных магнитофонах используется более узкая лента — шириной 3,81 мм, а в профессиональных, предназначенных для многодорожечной записи магнитофонов — более широкая: 1/2, 1 и даже 2 дюйма.

*Канал записи* (именно по нему звуковые сигналы, например преобразованные с помо-

щью микрофона в электрические колебания звуковых частот, поступают через усилитель к записываемому элементу — головке записи) — это электромагнит. Его катушка из медного провода (обмотка) намотана на кольцевой (тороидальный) сердечник (в последнее время его форма ближе к прямоугольной).

Сердечник (рис. 63) собирается из двух половинок, их основа — магнитомягкие материалы: пермаллой, альфенол или специальные ферриты.

Монофоническая студийная запись ведется по всей ширине ленты, поэтому высота сердечника головки должна соответствовать размеру ленты, т.е. 6,25 мм. Стереофонические магнитные головки — это две самостоятельные головки, механически соединенные в общей конструкции. Запись ведется одновременно на двух дорожках (верхней и нижней), каждая из которых имеет ширину 2,75 мм. Между ними остается раздельный промежуток.

Токи звуковой частоты, протекая по обмотке головки записи (рис. 64), создают в катушке переменное магнитное поле. Магнитные силовые линии замыкаются через сердечник головки, создавая в нем поток магнитной индукции. В сердечнике две половины, между ними при сборке с передней и задней сторон головки оставляют зазоры. Передний, так называемый рабочий зазор (шириной 10—20 мкм) заполняется немагнитным материалом, имеющим большое магнитное сопротивление (например, фольгой из бериллиевой бронзы). Благодаря этому образуется магнитное поле рассеяния, магнитные силовые линии выходят из

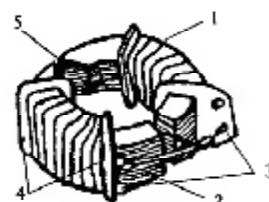


Рис. 63. Магнитная головка: 1 — обмотка; 2 — сердечник из феррита; 3 — шпильки обмотки; 4 — каркас; 5 — передний (рабочий) зазор

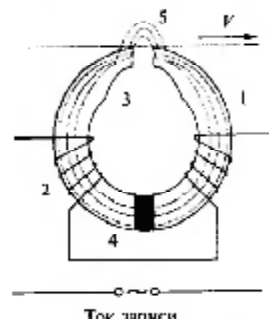


Рис. 64. Магнитная головка: 1 — сердечник-магнитопровод (тонкие линии — магнитное поле); 2 — обмотка; 3 — рабочий зазор; 4 — дополнительный зазор; 5 — поле рассеяния магнитного потока, действующего на носитель записи

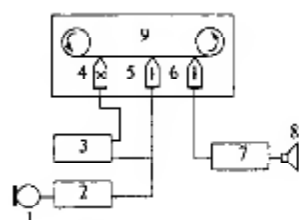


Рис. 62. Аппарат магнитной записи:

- 1 — микрофон; 2 — усилитель;
- 3 — генератор тока высокой частоты; 4 — головка записи;
- 5 — головка воспроизведения; 6 — усилитель;
- 7 — громкоговоритель; 8 — лентопротяжный механизм

сердечника наружу, замыкаются через рабочий слой проходящей у рабочего зазора магнитной ленты и намагничивают ее. С противоположной стороны сердечника головки записи размещен второй дополнительный зазор (шириной около 150–300 мкм). Он нужен для того, чтобы при включении магнитофона для записи ток, мгновенно возрастающий в обмотке головки, не намагнитил бы ее сердечник.

Магнитная лента, пересекая магнитные силовые линии потока рассеяния головки, намагничивается. Ее намагниченность меняется по длине ленты от точки к точке, следуя изменениям звуковой частоты, подаваемой в обмотку головки записи. Допустим, что записанный таким образом сигнал — это цепь постоянных магнитов, полюса которых замыкаются силовыми линиями, образующими магнитное поле в непосредственной близости от ленты. Напряженность поля зависит, как уже было сказано, от величины силы тока в обмотке головки записи в момент прохождения ленты, а длина намагниченных участков — от частоты этого тока  $f$  и скорости движения ленты.

Связь между длиной волны записи (рис. 65), т.е. отрезком ленты, на котором укладывается полный цикл колебания намагниченности с частотой и скоростью движения ленты, выражается формулой  $\lambda = V/f$ . Например, при скорости движения ленты 381 мм/с и частоте записанного тона 1000 Гц длина волны записи будет:  $\lambda = 381/1000 = 0,381 \text{ мм} = 381 \text{ мкм}$ .

Канал воспроизведения — та часть тракта магнитной звукозаписи, которая формирует считываемый звуковой сигнал. При воспроизведении лента перемещается с той же скоростью, что и при записи. Она соприкасается со вторым электромагнитом — головкой воспроизведения, подобной головке записи и внешне мало чем отличающейся от нее. Однако рабочий зазор ее более узкий (не более двух микрон), а дополнительного заднего зазора нет. В стереофоническом варианте головки воспроизведения, как и головки записи, содержат две объединенные в одной конструкции головки, расположенные одна над другой. При воспроизведении магнит-

ное поле, создаваемое соответствующим участком ленты, намагничивает сердечник головки воспроизведения. Переменный магнитный поток ленты замыкается через сердечник головки (рис. 66) и, воздействуя на обмотку, возбуждает в ней переменную ЭДС электромагнитной индукции.

Сигналы, снимаемые магнитной головкой в виде наведенной ЭДС, очень малы (порядка единиц милливольт). Поэтому напряжение звукового сигнала с воспроизводящей головки по хорошо экранированному проводу подается на вход усилителя воспроизведения, где оно усиливается примерно в 1000 раз.

В студийных аппаратах усилитель воспроизведения работает на выходную линию, микшерный пульт или усилитель мощности внешнего контрольного устройства. По принятому у нас стандарту, номинальный выходной уровень студийного магнитофона составляет +6 дБн (1,55 В).

В магнитофонах, предназначенных для любительских целей, непосредственно на выходе усилителя воспроизведения подключается громкоговоритель. А для работы на внешнюю линию предусматривается дополнительное выходное гнездо с уровнем сигнала около 300 мВ. Головка воспроизведения в магнитофонах размещена за головкой записи по ходу ленты. Это позволяет контролировать запись и немедленно устранять возникшие дефекты.

Генератор тока высокой частоты — специальное устройство, обеспечивающее стирание уже сделанных записей и подмагничивание ленты. Возможность многократного использования носителя записи — самое ценное преимущество магнитной звукозаписи. Магнитную фонограмму довольно просто уничтожить размагничивающим полем, создаваемым стирающей головкой, которая установлена (по ходу ленты) до головки записи. Ее конструкция почти такая же, как у головок записи и воспроизведения, но зазор здесь несколько больше (500 мкм). В обмотку стирающей головки подается ток высокой (ультразвуковой) частоты (обычно более 80 кГц) от генератора, который включается одновременно с режимом записи магнитофона. Высокочастотное поле буквально встряхивает магнитный материал, разрушая любую созданную ранее в нем магнитную упорядоченность, и тем готовит к новой записи.

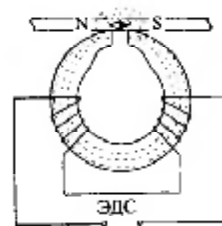


Рис. 66. Воспроизведение фонограммы с магнитной ленты

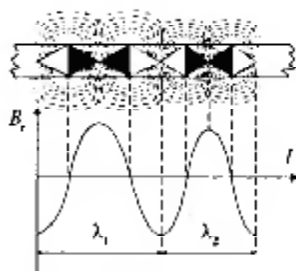


Рис. 65. Магнитная фонограмма при двух различных длинах волны

Генератор тока высокой частоты создает синусоидальные колебания не только для стирания записей, но и для так называемого подмагничивания ленты, устраняющего нелинейные искажения при записи. Подробнее процессы, происходящие в носителе записи при стирании и записи, будут рассмотрены далее. Сейчас же важно отметить, что только при одновременном воздействии на ленту магнитного поля, создаваемого током подмагничивания, и поля звуковой частоты намагниченность ленты оказывается пропорциональной магнитному полю записываемого сигнала. Это и есть условие подобия, необходимое для того, чтобы звуковые колебания записывались без нелинейных искажений.

### Лентопротяжный механизм

Лентопротяжный механизм был и остается самым важным узлом магнитофона. Он имеет, казалось бы, простую функцию: равномерно перемещать магнитную ленту относительно магнитных головок. Но для ее обеспечения конструкторам и технологам фирм, разрабатывающим магнитофоны, приходится решать совсем не простые задачи, чтобы выполнить основные требования к механизму: постоянная скорость перемещения ленты, отсутствие вибраций и подергиваний, плавная и бесшумная работа механизма.

В стационарных аппаратах обычно используются механизмы с *тремья двигателями*: ведущим и двумя боковыми. Лента перемещается роликом-насадкой на валу ведущего двигателя и прижатая к нему свободно вращающимся обрезиненным прижимным роликом. Зажатая между этими двумя вращающимися деталями лента движется с постоянной скоростью, зависящей только от количества оборотов ведущего двигателя и диаметра насадки на его валу. Поэтому *ведущий двигатель* должен обладать высоким постоянством числа оборотов и малой зависимостью скорости вращения от изменений параметров сети электропитания (напряжения и частоты).

В магнитофонах старых конструкций (например, в отечественном аппарате типа МЭЗ-28 или венгерском STM200) — они до сих пор работают в некоторых студиях — в качестве ведущего применялись гистерезисные синхронные двигатели, у которых число оборотов вала хотя и не зависит от напряжения сети, но определяется ее частотой. Поэтому из-за нестабильности частоты сети электропитания число оборотов таких двигателей, а следовательно, и скорость движения магнитной ленты могли меняться на 1–1,5%. Это усложняло монтаж музыкальных фонограмм и вносило ошибки в хронометраж перелач.

В современных магнитофонах применяются ведущие двигатели, работающие от специальных, стабилизированных кварцем генераторов, благодаря чему их скорость вращения поддерживается строго постоянной. Скорость движения ленты  $V$  (см/с) определяется диаметром ведущего ролика  $d$  (мм) и числом его оборотов  $n$  (об/мин). Она вычисляется по формуле:

$$V = \pi d n / 600 \text{ см/с.}$$

В настоящее время используется несколько стандартных скоростей движения магнитной ленты: 76,2; 38,1; 19,05; 9,53 и 4,76 см/с. Последние две скорости характерны для репортажных магнитофонов и магнитофонов, предназначенных для любительских записей. Для профессиональной студийной записи используется скорость в основном 38,1 см/с.

Для *боковых двигателей* лентопротяжных механизмов имеют мягкие механические характеристики, их вращающие моменты зависят от скорости вращения (чем меньше оборотов в минуту делает ролик двигателя, а это зависит от изменяющегося в процессе рабочего хода диаметра рулона, тем большим становится вращающий момент). *Правый двигатель* обеспечивает плавное подматывание ленты на сердечник или катушку, закрепляемые на его валу, без образования петель. *Левый двигатель* при записи и воспроизведении обычно работает, получая относительно небольшое напряжение. Он подтормаживает движение ленты, создавая легкое натяжение, что гарантирует ее достаточно плотное прилегание к магнитным головкам. Этот же двигатель, когда на него поступает полное напряжение, служит для обратной перемотки ленты после записи или воспроизведения.

В современных магнитофонах размещение магнитных головок соответствует стандартизованному способу намотки ленты — рабочим слоем внутрь рулона. Об этом надо помнить потому, что старый стандарт намотки ленты отличался от современного. Во избежание искажений звучания раньше записи наматывались на сердечник рабочим слоем наружу. Перед воспроизведением их необходимо перемотать.

Важную роль в работе лентопротяжного механизма играют *тормозные устройства*. Торможение двигателей используется для быстрой остановки ленты, они же предотвращают образование петель при запусках и остановках. Торможение должно быть достаточно сильным и вместе с тем плавным, чтобы не допустить чрезмерного натяжения, приводящего к обрыву и растягиванию ленты. Управление лентопротяжным механизмом осуществляется с помощью *клавиатуры*, размещенной на панели управления.



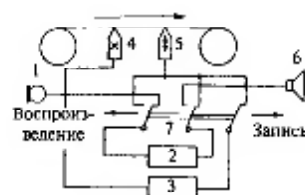


Рис. 67. Бытовой магнитофон с универсальным усилителем: 1 — микрофон; 2 — универсальный усилитель; 3 — генератор высокой частоты; 4 — головка стирания; 5 — универсальная головка; 6 — громкоговоритель; 7 — переключатель

мощью механических передач. Лента движется с малыми скоростями (9,53 или 4,76 см/с). Она либо наматывается на катушки, либо находится в закрытых кассетах. Любительские записи производятся не по всей ширине ленты, а по более узким дорожкам: двум, чаще четырем (рис. 68). Для этого сердечник магнитной головки должен быть меньше по высоте, а его рабочий зазор расположен так, чтобы записывать или воспроизводить только одну из дорожек.



Рис. 68. Дорожки кассетных магнитофонов

## Магнитные процессы в носителе записи при стирании

Уничтожение старых записей для подготовки ленты к новым — довольно ответственный момент: надо либо намагнитить ленту по

всей длине так, чтобы ее намагниченность была близка к насыщению, либо полностью размагнитить ее. В настоящее время применяется высокочастотное стирание, т.е. размагничивание ленты под воздействием магнитного поля высокой частоты. Головка стирания автоматически включается при установке режима «Запись». Образованное ею высокочастотное магнитное поле стирания наиболее интенсивно воздействует на ленту непосредственно перед рабочим зазором и постепенно убывает по обе стороны от него, сходя на нет (рис. 69). Ширина рабочего зазора около 500 мкм.

Стирающая головка перемагничивает ленту в максимумах практически до насыщения, затем, когда лента проходит через зону убывающей интенсивности поля, соответственно спадают поля намагничивания и постепенно лента размагничивается до нуля. Процесс размагничивания происходит по постепенно сходящимся к началу координат частным петлям гистерезиса (рис. 70).

Важно правильно выбрать частоту тока стирания в соответствии со скоростью движения ленты. Частота тока стирания выбирается в интервале 70—80 кГц.

## Магнитные процессы при записи

Магнитная лента движется, соприкасаясь с головкой записи и прилекая к ее рабочему зазору. Магнитные силовые линии, как уже было сказано, выходят у рабочего зазора из сердечника и образуют поток рассеяния.

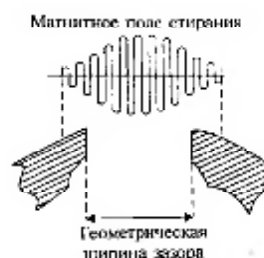


Рис. 69. Магнитное поле у зазора стирающей головки

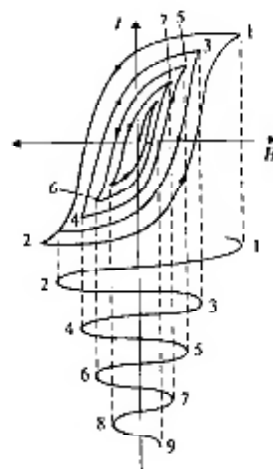


Рис. 70. Размагничивание по петлям высокой частоты

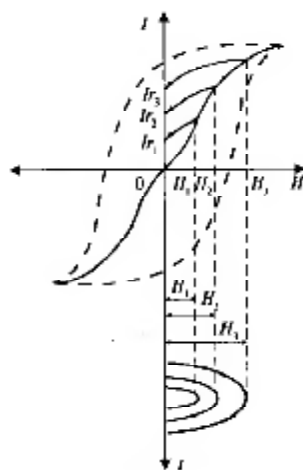


Рис. 71. Намагничивание ленты

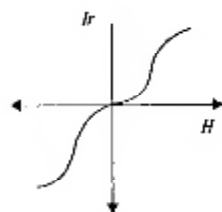


Рис. 72. Остаточная намагниченность как функция магнитного поля

намагниченности ленты от напряженности поля записи, в обмотку головки вместе с током звуковой частоты подается ток высокой частоты — его называют током подмагничивания. Частота этого тока по меньшей мере в 5–10 раз должна превосходить высшую частоту записываемого звукового сигнала (к примеру, в отечественном магнитофоне МЭЗ-109А частота тока подмагничивания 210 кГц). Ток подмагничивания создаст магнитное поле высо-

Рассмотрим, как происходит намагничивание ленты, если в обмотке головки записи протекает только ток записи звуковой частоты (рис. 71).

Под воздействием магнитного поля рассеяния с напряженностью  $H_1$  (на рис. приведены три варианта напряженности) некий участок магнитной ленты приобретает некую намагниченность  $I_1$ , и затем, когда он покидает поле рассеяния головки, намагниченность ленты снижается до остаточной величины  $I_2$ . Последующий участок ленты под действием изменившегося магнитного поля имеет уже иную величину остаточной намагниченности  $I_3$  и т.д. Намагничивание, а также переключение на остаточную намагниченность — процессы существенно нелинейные, а, значит, вносящие в выходной сигнал искажения его формы. Это хорошо заметно на графике зависимости остаточной намагниченности ленты от напряженности действующего магнитного поля (рис. 72).

Идеальной характеристикой была бы прямая линия, любые отклонения от нее — причина искажений формы сигнала.

Чтобы straighten характеристику зависимости остаточной



Рис. 73. Суммирование полей подмагничивания звука. (Соотношение размахов полей условно. Поле подмагничивания превышает звуковое в 10 раз.)

кой частоты, которое воздействует на ленту вместе с полем звуковой частоты. Поля подмагничивания и звука суммируются (рис. 73).

При этом намагничивание ленты становится пропорциональным средним значениям напряженности суммарного поля и практически совпадает с изменениями поля звукового сигнала. На рис. 74 приведена функция зависимости остаточной намагниченности ленты от намагничивающего поля с высокочастотным подмагничиванием.

Даже беглое сравнение рис. 72 и 74 подтверждает их принципиальное различие — большой прямолинейный участок на рис. 74 показывает, что условие подобия при записи с подмагничиванием высокочастотным полем соблюдается. Происходит как бы спрямление характеристики намагниченности носителя записи и, кроме того, возрастает ее крутизна. Это значит, что нелинейные искажения звукового сигнала становятся весьма малыми, отдача ленты выше, а значит, для намагничивания до необходимого уровня требуемый ток записи меньше. В паузе, когда звуковой сигнал отсутствует, поле подмагничивания действует подобно стирающему полю и, циклически перематывая ленту, дополнительно разматывает ее.

От правильного выбора величины тока подмагничивания зависят фактически все качественные показатели звукозаписи: динамический диапазон,

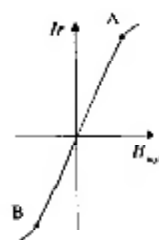


Рис. 74. Остаточная намагниченность как функция звукового поля с подмагничиванием

частотная характеристика и коэффициент нелинейных искажений. Сложность в том, что у разных типов лент свой оптимальный режим подмагничивания. Поэтому магнитофон перед записью должен быть настроен техниками на определенный тип магнитной ленты.

### Предыскажения при записи и коррекция частотной характеристики при воспроизведении фонограммы

Частотная характеристика — самая важная характеристика любой системы звукопередачи. Это замечание в полной мере относится и к магнитной звукозаписи. Главная задача очевидна: каналы записи и воспроизведения в совокупности должны обладать такой амплитудно-частотной характеристикой, которая обеспечила бы прослушивание произведенных записей без частотных искажений. Иными словами, *соотношения амплитуд различных частотных составляющих звукового сигнала на выходе магнитофона должны быть такими же, что и на входе*. Однако при магнитной звукозаписи и воспроизведении происходит завал (ослабление) низких и высоких частот звукового диапазона. При этом в процессе записи особенно заметен завал высоких звуковых частот, обусловленный потерями в головке записи и самой ленте, не одинаковый по величине для лент разных типов. Завал сказывается тем сильнее, чем выше частота сигнала и меньше скорость движения ленты. Частотная характеристика процесса записи может быть представлена графически (рис. 75, где приведена типичная зависимость остаточного магнитного потока ленты от частоты тока в головке записи, когда ток по амплитуде одинаков на всех частотах).

Процесс воспроизведения также зависит от частоты. Как известно из курса физики, ЭДС электромагнитной индукции пропорциональна скорости изменения магнитного потока, взаимодействующего с витками катушки. Поэтому в обмотке воспроизводящей головки ЭДС тем больше, чем быстрее меняется во времени магнитный поток ленты, т.е. чем выше частота записываемого сигнала. Допустим, что мы записываем на ленте сигналы разных звуковых частот с условием, что магнитный

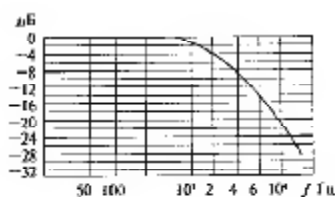


Рис. 75. Частотная характеристика магнитной записи

поток ленты на всех частотах одинаков, частотная характеристика процесса воспроизведения на выходе головки в этом случае — наклонная прямая, с крутизной подъема 6 дБ/октава, т.е. ЭДС возрастает в два раза при удвоении частоты звукового сигнала (рис. 76, кривая а).

Однако такая частотная характеристика возможна только теоретически, поскольку требуется идеальная головка воспроизведения с исчезающе малым рабочим зазором.

В реальных условиях линейный подъем частотной характеристики воспроизведения происходит до известного предела. Когда длина волны записи (а она, как уже было сказано, равна  $\lambda = v/f$ ) становится соизмеримой с шириной рабочего зазора воспроизводящей головки, появляются так называемые щелевые потери, резко понижающие ЭДС на высоких звуковых частотах (рис. 76, кривая б). Суть этого явления поясняет рис. 77.

Воздействие магнитного потока на обмотку головки воспроизведения тем больше, чем сильнее различаются величины магнитных потенциалов участка носителя записи у левого и правого краев рабочего зазора. Эта разница растет, пока в процессе увеличения частоты сигнала каждый элементарный магнит (его физические размеры соответствуют половине длины волны записи) не станет равным ширине рабочего зазора (имеется в виду действующая ширина рабочего зазора, превышающая геометрическую). При дальнейшем укорочении длины волны записи в зазоре уже размещается более одного элементарного магнита, при этом действие соседнего, противоположно направленного магнита противодействует первому и уменьшает магнитный поток. Когда полная длина волны записи станет равной ширине рабочего зазора, действие двух элементарных магнитов, силовые линии которых направлены навстречу друг другу, взаимно компенсируется, и магнитный поток станет равным нулю. Сигнал с такой длиной волны не будет воспроизводиться.

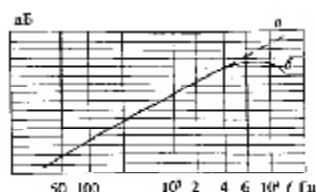


Рис. 76. Частотная характеристика воспроизведения

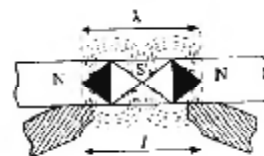


Рис. 77. Снижение частотной характеристики на волнах записи, соизмеримых по длине с рабочим зазором

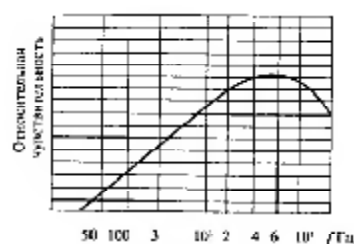


Рис. 78. Частотная характеристика канала записи-воспроизведения без коррекции

определяется как перемножение рассмотренных выше (рис. 78). Ее форма совершенно неудовлетворительна.

Эту характеристику необходимо исправить — линейризовать, используя стандартные методы компенсации с помощью специально подобранных частотных характеристик усилителей магнитофона, причем эта компенсация может быть осуществлена в любом усилителе записи и воспроизведения. Однако если присмотреться к ряду особенностей процесса звукозаписи и распределения звуковой энергии в спектрах музыкальных инструментов и человеческого голоса, то можно заметить, что целесообразнее компенсировать потери на высших звуковых частотах в усилителе записи, выбирая его частотную характеристику такой, чтобы ток в обмотке головки записи начинал возрастать примерно с частоты 1000 Гц. Этот метод компенсации известен как **предыскажение**. Предыскажения целесообразны еще и потому, что при исполнении музыкального произведения звуковая энергия на высших частотах обладает меньшей интенсивностью, чем на средних, поэтому высокие звуковые колебания поступают на запись с меньшими амплитудами. Подъем высших частот в усилителе записи улучшает в этом диапазоне перекрытие полезным сигналом шумов самой ленты (см. рис. 79).

Во избежание нелинейных искажений подъем частотной характеристики записи на высших частотах звукового диапазона не должен превышать 8–10 дБ (т.е. уровень на этих частотах не должен быть больше уровня нижних и средних звуковых частот более чем в 2,5–3 раза). Этого недостаточно, чтобы скомпенсировать полностью потери на высших частотах, возникающие как при записи, так и при воспроизведении. Поэтому дополнительная коррекция

Чем ниже скорость движения магнитной ленты, тем короче длина волны записи, соответствующая какой-либо определенной частоте звукового сигнала. Поэтому, чтобы уменьшить завал высших частот при воспроизведении на магнитофонах с малыми скоростями движения ленты, рабочий зазор воспроизводящей головки делают узким — шириной около 2 микрон. Частотная характеристика канала записи-воспроизведения

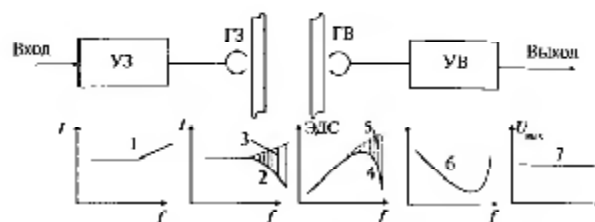


Рис. 79. Частотная коррекция в сквозном канале:

- 1 — ток записи на высоких частотах (частотные предискажения);
- 2 — частотная характеристика функции намагничивания ленты; 3 — потери на симорезмагничивание; 4 — характеристики ЭДС воспроизводящей головки;
- 5 — щелевые потери при воспроизведении; 6 — коррекция усилителя воспроизведения; 7 — частотная характеристика выходного сигнала

высших звуковых частот осуществляется уже в усилителе воспроизведения. В нем же корректируются (поднимаются) низкие частоты, воспроизводимые головкой хуже более высоких. Предыскажения, применяемые в усилителе записи, и коррекция в усилителе воспроизведения выпрямляют результирующую частотную характеристику сквозного канала записи-воспроизведения.

### Технические характеристики аналоговой магнитной звукозаписи

Магнитофон, даже исправный, может стать источником искажений, резко снижающих ценность фонограммы. Эти искажения различны по субъективному восприятию, и причины их возникновения также не одинаковы. Чаще всего происходят **частотные искажения**. Как известно, звуковой диапазон частот — это колебания с частотами 20 + 20 000 Гц. Для неискаженной звукопередачи необходимо, чтобы колебания всех слышимых частот записывались на ленту и воспроизводились с нее на одинаковом уровне. С этих позиций качество магнитофона оценивается его частотной характеристикой. В действительности эта характеристика не бывает линейной во всем диапазоне звуковых частот. Но если в интервале, принятом за рабочий диапазон (для профессиональных магнитофонов от 31,5 до 18 000 Гц), выходное напряжение меняется незначительно и неравномерность частотной характеристики укладывается в принятое стандартом поле допусков, то частотные искажения мало заметны на слух и ими можно пренебречь.

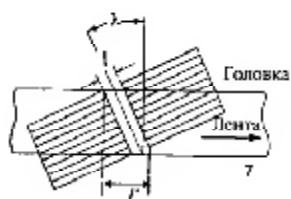


Рис. 80. Перекос рабочего зазора магнитной головки

ком, оставшим от магнитной ленты. Любые нарушения нормального контакта уменьшают отдачу на высоких частотах. Поэтому при работе с магнитофоном приходится особенно тщательно следить за хорошим прилеганием ленты к головкам и время от времени аккуратно спиртом или деревянной палочкой очищать с их поверхности приставшую пыль. Рабочие зазоры головок записи и воспроизведения должны быть строго параллельны друг другу и перпендикулярны направлению движения ленты. Взаимный перекос головок на относительно небольшой угол в несколько угловых минут, незаметный для глаза, может повлечь хорошо заметный на слух завал высших звуковых частот. Перекос зазора воспроизводящей головки снижает ЭДС на высоких частотах, так как это равносильно увеличению ширины рабочего зазора (рис. 80).

Обычно положение головок тщательно регулируют и устанавливают в процессе профилактических измерений и настройки магнитофонов.

Причиной завала высоких звуковых частот при записи может стать и неправильный подбор ленты. Магнитофон следует настраивать на запись на ленте какого-то определенного типа. Переход на другой тип ленты требует и соответствующей перестройки канала записи магнитофона. Иначе возможны частотные искажения звучания.

К *нелинейным искажениям* ведут любые нарушения пропорциональности или подобия между мгновенными значениями выходных напряжений и соответствующими мгновенными значениями уровня подводимого на запись сигнала. Эти искажения воспринимаются на слух как резкое, неприятное искажение тембра, сопровождаемое своеобразным скрежетом и хрипом. Если усилители исправны и режим подмагничивания, установленный при настройке магнитофона для определенного типа ленты, выбран правильно, то причину нелинейных искажений нужно искать в чрезмерно больших уровнях сигналов, приходящих на вход магнитофона и

вызывающих перегрузку ленты. Следует помнить, что лента — наиболее слабое звено в канале магнитной записи: при высоких уровнях сигнала и, следовательно, больших напряженностях магнитного поля в головке пропорциональность между полем записи и намагниченностью ленты нарушается, из-за того что характеристика намагниченности ленты прямолинейна лишь до определенных пределов. Это значит, что лента может быть намагничена сигналом без искажения его формы лишь до определенной величины. Более сильное намагничивание влечет за собой нелинейные искажения, превышающие норму и заметные на слух.

Коэффициент нелинейных искажений (точнее, коэффициент гармоник) сквозного канала записи — воспроизведения для студийных магнитофонов высокого класса качества не должен быть больше 1—1,5% при максимальном уровне записи. Это требование и ограничивает допустимый уровень записи. Об уровне записи или о степени намагниченности ленты судят по величине магнитного потока, который создается сигналограммой, записанной на ленте.

В профессиональной записи используются дорожки разной ширины (стерео, моно, двухдорожечная, четырехдорожечная), поэтому возникает проблема унификации измерений. За меру уровня записи поэтому принимают удельную величину магнитного потока ленты, т.е. величину потока, который бы создавался лентой, будь она шириной 1 м. В соответствии с этим за единицу измерения уровня записи принимается удельная величина магнитного потока, выраженная в нановесбах на 1 м ширины дорожки записи (нВб/м).

320 нВб/м — это международный стандарт номинального значения уровня записи на магнитной ленте при скоростях движения ленты 38,1 и 19,05 см/с. Он и определяет максимально допустимый уровень монофонической записи, соответствующий установленной на измерителе уровня отметке 0 дБ. Для стереофонических записей стандартом предусматривается увеличение максимального уровня записи примерно на 4 дБ, т.е. до 510 нВб/м, чтобы компенсировать потери качества из-за более узких дорожек записи. Для малых скоростей записи, в частности для компакт-кассетных магнитофонов, работающих на скорости ленты 4,76 см/с, стандартизован уровень в 250 нВб/м.

К специфическим искажениям, характерным только для систем звукозаписи, относится *детонация* звука, причина которой скрыта в колебаниях скорости движения ленты. Если отклонения от нормальной скорости ленты происходят медленно, с частотой меньше 1 Гц, то звук, как говорят, «плывет». Быстрые периодические изменения скорости воспринимаются на слух как вибрация или дробление, особенно заметные на протяжных звуках. Еще бо-

более частые колебания скорости вызывают искажения тембра звучания, по характеру похожие на нелинейные искажения. Причины дестонации обычно следует искать в биении ведущего вала или в других неисправностях лентопротяжного механизма.

**Помехи** при магнитной записи и воспроизведении могут резко ухудшить качество звучания фонограммы. Чаще всего источниками шума становятся усилители записи или воспроизведения. Если при включении магнитофона прослушиваются сильный шум или трески, необходимо в первую очередь определить, где возникает помеха, какой из усилителей служит ее источником. Для этого надо включить аппарат на воспроизведение (можно без ленты) и, установив максимальную громкость, выяснить, возникает ли помеха в канале воспроизведения. Если усилитель воспроизведения работает нормально, а шум появляется при записи, то ремонта, как правило, требует усилитель записи. Шумы усилителей не присущи магнитной системе звукозаписи. Однако сигнал, поступающий с головки воспроизведения на усилитель, весьма мал (порядка единиц милливольт), поэтому шумы усилителя слышны и часто становятся одним из заметных дефектов звучания.

Магнитной системе записи звука свойственны и свои специфические шумы и помехи. Например, шум может возникнуть как результат случайной намагниченности металлических деталей лентопротяжного механизма (направляющих роликов, сердечников головок, экранов, вала ведущего двигателя). Поэтому необходимо периодически и тщательно размагничивать соприкасающиеся с лентой детали лентопротяжного механизма, пользуясь для этого специальным устройством — размагничивающим электромагнитом. Но основной источник шума при звукозаписи — сама магнитная лента. Шум ленты вызывается в основном дискретной структурой рабочего слоя, который заполнен микрокристаллами магнитного порошка. Шероховатость рабочего слоя, неравномерность его толщины и концентрации магнитного порошка приводят к увеличению шума ленты, который наиболее явно проявляется в паузе и поэтому часто называется шумом паузы. Лучшие производители магнитных лент уделяют много внимания сепарации частиц магнитного порошка по размерам, их ориентации при нанесении рабочего слоя. Все эти меры прежде всего направлены на снижение шума паузы.

Уровень шума сквозного канала магнитофона принято измерять по отношению к максимальному уровню записи. Для этого устанавливают чистую ленту на магнитофон и записывают измерительный синусоидальный сигнал с частотой 1000 Гц с максимально допустимым уровнем. Затем, не изменяя установку регуля-

торов усиления, выключают измерительный сигнал и продолжают процесс записи. Измеряя уровни сигналов, считанных с фонограммы (измерительного и в паузе), можно судить о величине уровня собственного шума сквозного канала магнитофона. Выраженное в децибелах отношение величины уровня шума к уровню полезного сигнала (соответствующего максимальному допустимому при записи) для студийных магнитофонов по стандарту не должно быть ниже 60 дБ. Это означает, что напряжение шума по крайней мере в 1000 раз меньше напряжения максимального уровня полезного сигнала.

От шума паузы отличается другой вид помехи, *модуляционный шум*. Он возникает только при наличии записываемого сигнала как следствие очень быстрых и хаотических изменений уровня намагниченности ленты при записи сигнала (их причина скрыта в неоднородности структуры рабочего слоя ленты или в непостоянном контакте ленты и головки записи, вызывающих амплитудную модуляцию сигнала). Эти структурные, или контактные, модуляционные шумы зависят в основном от качества ленты и могут быть в какой-то мере уменьшены при правильном выборе силы тока подмагничивания.

Еще одна причина возникновения модуляционного шума — продольные колебания движущейся ленты, что ведет к беспорядочным мгновенным ухватам частоты записываемого сигнала (шумовая частотная модуляция). Модуляционный шум особенно заметен на протяжных звуках. Он, к примеру, прослушивается на звуках фортепиано и проявляется в виде характерного хруста и поскрипывания. Модуляционные шумы, вызванные продольными колебаниями ленты (их еще называют эффектом струны), можно снизить, если между головками записи и воспроизведения, служащих для ленты точками опоры, установить вращающийся ролик, инерция которого сглаживает (демпфирует) колебания ленты.

Магнитной записи присущ еще один, неприятно воспринимаемый на слух дефект, *копирэффekt*. Этот термин очень точно отражает сущность явления. При длительном хранении участки намотанной на сердечник или катушку ленты с высоким уровнем намагничивания воздействуют на соприкасающиеся с ними витки. Скопированные таким контактным способом сигналы при воспроизведении прослушиваются как многократное эхо (рис. 81).

Копирэффekt особенно заметен, когда с участками высокого уровня намагничивания соседствуют те, где сигнал слаб, и еще более, если они совмещены с паузой. Сигналы копирэффекта могут отставать от основного сигнала (запаздывающий копирэффekt, воспринимаемый как эхо) или предшествовать ему (опережаю-

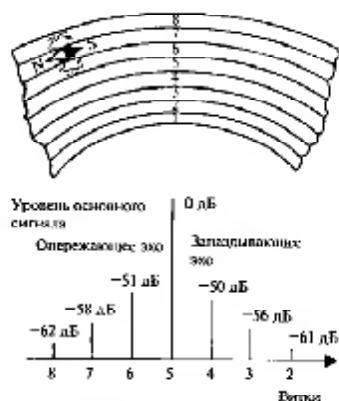


Рис. 81. Копирэффект

пий копирэффект). Опережающий копирэффект, или опережающее эхо, из-за своей неестественности наиболее неприятно воспринимается на слух.

К сожалению, радикальных мер борьбы с копирэффектом нет, он неизбежен при хранении лент в рулонах. Поэтому при записи речевых литературно-драматических передач, изобилующих паузами и поэтому наиболее подверженных слышимому копирэффекту, следует обратить внимание на выбор ленты. Величина возможного копирэффекта обычно указывается предприятием-поставщиком в паспорте на ленту каждого полива. Совершенно очевидно, что нужно брать ленту с минимальной величиной копирэффекта. Кроме того, в некоторых случаях можно несколько снизить (примерно на 3 дБ) максимальный уровень записи. Это не увеличит разницу между основным и скопированным сигналами, но сделает копирэффект малозаметным на слух, поскольку эти сигналы, весьма малые по абсолютной величине, будут замаскированы шумом ленты.

### Измерительные ленты для проверки и настройки магнитофонов

Для настройки магнитофонов широко используются измерительные ленты, причем эта практика подержана международными и отечественными стандартами. Стандартизация настройки магнитофонов необходима для того, чтобы иметь возможность об-

мениваться фонограммами, т.е. чтобы запись, сделанная на одном магнитофоне, могла быть воспроизведена на любом другом аппарате с теми же качественными показателями.

**Магнитные измерительные ленты (ЛИМ)** обычно выпускаются в расчете на определенные тип аппарата и режим (скорость ленты, монофонический или стереофонический вариант, катушечный или кассетный). Измерительные ленты состоят, как правило, из трех частей. Первая — У — предназначена для проверки и установки усиления канала воспроизведения. Вторая — Ч — содержит сигналы проверки частотной характеристики канала воспроизведения и установки положения рабочих зазоров магнитных головок. Третья — Д — позволяет проверить коэффициент детонации магнитофона.

Часть У измерительной ленты — это запись синусоидального сигнала с частотой 1000 Гц и максимально допустимым уровнем намагниченности, при котором нелинейные искажения не превышают нормированную стандартную величину. При наиболее употребительных скоростях движения ленты 938,1 и 19,05 см/с этот уровень для монофонических записей соответствует удельному остаточному магнитному потоку ленты 320 нВб/м, а для стереофонических — 510 нВб/м. Поэтому для настройки монофонических магнитофонов следует пользоваться измерительной лентой, маркируемой как ЛИМ-1, а для стереофонических — ЛИМ-2.

Эталонный уровень записи бытовых кассетных магнитофонов определяется для частоты 315 Гц и равен 250 нВб/м. Для их проверки выпускаются специальные измерительные ленты. Чтобы настроить магнитофон на запись, необходимо воспроизвести часть У измерительной ленты и регулятором усиления канала воспроизведения добиться такого уровня сигнала на выходе магнитофона, при котором указатель измерителя уровня (при времени интегрирования 5 мс) показывает 100% (0 дБ). Затем надо установить на магнитофоне чистую ленту и подать на вход усилителя записи сигнал с частотой 1000 Гц, используя любой подходящий источник (им может быть, например, звуковой генератор или фонограмма, воспроизводимая другим магнитофоном). Записанный сигнал воспроизводят, не меняя определенное по измерительной ленте усиление канала воспроизведения, и регулятором уровня записи устанавливают уровень сигнала на выходе магнитофона уровень, соответствующий 100% измерителя уровня. Естественно, намагниченность записи окажется той же, что и эталонная на измерительной ленте.

В процессе студийной записи приходится постоянно сравнивать звучание записываемой и записанной программ. В студии сделать это довольно просто с помощью коммутации контрольных



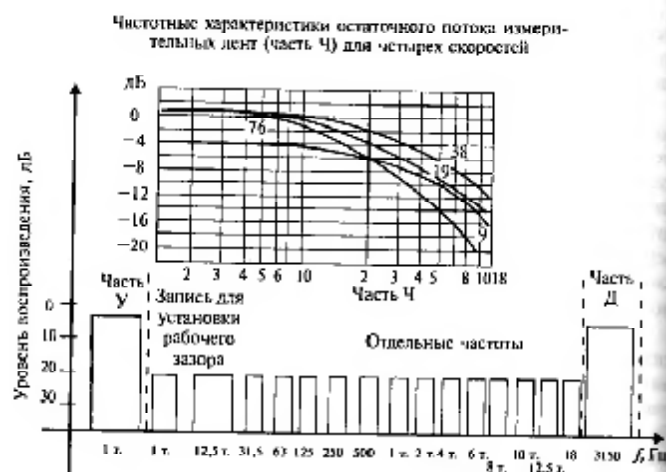


Рис. 82. Частотная характеристика ЛИМ

агрегатов и измерителей уровня на вход или на выход магнитофона, следует лишь проследить, чтобы абсолютные величины напряжения сигналов на входе и выходе магнитофона были одинаковы (например, 1,55 В). Регуляторы усиления магнитофонных усилителей являются лишь установочными, и при записи программы ими не пользуются. Необходимый выходной уровень поддерживается с помощью регуляторов уровня микшерного пульта так, чтобы пик уровня, наблюдаемый по измерителю уровня на выходе магнитофона, по возможности не превышал отметку 100% на шкале измерителя уровня.

Часть Ч измерительной ленты содержит запись ряда сигналов отдельных частот от 31,5 до 18 000 Гц с такими уровнями, чтобы частотная характеристика измерительной ленты, т.е. зависимость ее остаточного магнитного потока от частоты сигналов, соответствовала стандартной характеристике записи. Форма этой частотной характеристики, по принятому стандарту, прямолинейна лишь в области низких и средних звуковых частот и плавно понижается на высоких частотах диапазона (рис. 82), причем крутизна спада частотной характеристики различна для разных скоростей движения ленты и тем больше, чем меньше скорость.

В качестве опорной частоты, с которой по уровню сравниваются другие частоты, берется 1000 Гц (для кассетных измеритель-

ных лент со скоростью движения ленты 4,76 см/с — 315 Гц). Часть Ч измерительной ленты записывается с таким уровнем, чтобы на опорной частоте уровень намагниченности ленты был в 10 раз (на 20 дБ) меньше максимально допустимого установочного уровня записи, т.е. 32 или 25 мВб/м соответственно для профессиональной и кассетной аппаратуры.

Перед сигналами, используемыми для проверки частотной характеристики канала воспроизведения, измерительная лента (часть Ч) содержит запись сигнала с частотой 12 500 Гц, предназначенной для установки правильного положения рабочего зазора головки. Этот сигнал записан на магнитофоне, рабочий зазор записывающей головки которого заведомо перпендикулярен направлению движения ленты. На стереофонической измерительной ленте ЛИМ-2 кроме этого сигнала для той же цели на обеих дорожках записывается сигнал «белого» шума, обладающего максимально широкой полосой частот звукового диапазона.

Как проверить частотную характеристику и насколько правильно выставлены рабочие зазоры головок проверяемого магнитофона? На магнитофоне устанавливают часть Ч измерительной ленты и воспроизводят ее. К выходу усилителя воспроизведения подключают электронный вольтметр. (С несколько меньшей точностью по подобной проверке можно сделать и по измерителю уровня.)

Прежде всего проверяется положение рабочего зазора головки воспроизведения и производится установка головки «по азимуту». Для этого, наблюдая за показаниями прибора на выходе магнитофона, с помощью специальных регулировочных винтов находят такое положение головки, при котором отдача на сигналах высоких звуковых частот становится максимальной. Это положение головки и считается нормальным. Такой способ неприменим для стереофонического магнитофона из-за относительно малой точности. Причина в том, что на более узких дорожках записи четко выраженный максимум отдачи при изменении ориентации зазора отсутствует. В этом случае прибегают к воспроизведению записанной на измерительной ленте полоске «белого» шума, а настройку головки производят по специальному прибору — гониометру. Гониометр — это некое подобие осциллографа, на его экране при подаче на его вход двух сигналов возникают фигуры, по форме которых можно судить о соотношениях фаз в левом и правом каналах. Причем если в сигналах присутствуют колебания многих частот (что характерно для широкополосного белого шума), то только при точной установке рабочего зазора головки по вертикали наблюдается синфазность всех составляющих сигнала в обоих каналах и фигура на экране гониометра приобретает вид, близкий к

вертикальной прямой линии. Установка головки производится при этом, как обычно, с помощью регулировочных винтов.

Далее проверяется частотная характеристика канала воспроизведения. Делается это следующим образом. Заметив показания прибора при воспроизведении сигнала опорной частоты (1000 Гц), наблюдают за изменениями выходного напряжения в зависимости от изменений частоты воспроизводимых сигналов. Частотную характеристику канала воспроизведения считают нормальной в том случае, если выходное напряжение магнитофона при воспроизведении измерительной ленты существенно не изменяется (допускаются лишь небольшие отклонения выходного уровня в пределах 1 дБ на средних частотах и 3 дБ на краях рабочего диапазона). Убедившись, что канал воспроизведения в норме, устанавливают чистую ленту и записывают подаваемые на вход магнитофона от звукового генератора сигналы, одинаковые по амплитуде, но разные по частоте. Тем же способом, что и при установке головки воспроизведения, регулируют положение рабочего зазора головки записи и проверяют по максимуму выходного напряжения магнитофона параллельность ее рабочего зазора рабочему зазору головки воспроизведения.

После настройки канала воспроизведения проверяется частотная характеристика канала записи. Это делается способом сравнения выходных напряжений при записи измерительных сигналов с напряжениями, создаваемыми на выходе магнитофона при воспроизведении на нем измерительной ленты (части 4). Отклонения этих двух характеристик друг от друга также не должны превышать 1,5 дБ на средних частотах и 3 дБ на крайних. Частотные характеристики каналов записи и воспроизведения изменяются в области высоких частот по мере износа головок, а канала записи — еще и в зависимости от типа применяемой ленты. Поэтому усилители обычно имеют выведенные под шлиц регуляторы коррекции по высоким частотам, которые используются при профилактических проверках и создании аппаратуры.

Часть 4 измерительной ленты представляет собой запись сигнала с частотой 3150 Гц, произведенной на магнитофоне с заданно малыми колебаниями скорости записи. При воспроизведении такой записи на испытуемом магнитофоне с помощью специального прибора — детонатора — измеряют выраженное в процентах отношение величины колебаний скорости воспроизведения к ее среднему значению. Современные детонаторы снабжаются специальными фильтрами, которые приводят в соответствие показания прибора с восприятием на слух искажений, возникающих из-за колебаний скорости ленты (детонации).

Измерительные ленты изготавливаются с особой тщательностью на специально оборудованных для этого рабочих местах. При их записи используются наборы генераторов колебаний звуковых частот, прецизионные магнитофоны, комплект контрольных приборов. Уровень записи измерительных сигналов поддерживается с высокой точностью вручную или автоматически. Для записи измерительных лент используются специально отобранные магнитные ленты, обладающие высокой равномерностью чувствительности по всей длине.

## Монтаж и хранение магнитных фонограмм

Монтаж занимает важное место в звукозаписи. Собственно, это процесс превращения полуфабриката в виде рабочих фонограмм в конечный продукт — скомпонованную программу. При монтаже из выполненных записей исключают неудачные варианты, делают заготовленные заранее вставки, вводят различные звуковые эффекты и многое другое. Большую часть истории звукозаписи основными средствами монтажа были ножницы и клей. Они и поныне остаются рабочим инструментом монтажера по звуку на многих студиях России, особенно старых, государственных. Хотя сейчас доминируют электронные средства монтажа, но термин *склейка*, который на слуху в любой монтажной аппаратуре, возвращает к истокам монтажа. О ней вначале и пойдет речь.

Имея достаточный навык, можно обычными ножницами вырезать из фонограммы фрагменты, абзацы, фразы, слова и даже отдельные звуки. Резать ленту удобно на паузах, место склейки определяют на слух. Если пауза короткая, то ее точное место на ленте находят, выключив двигатель магнитофона и вручную, придерживая пальцами правый и левый рулоны, медленно передвигают ленту по головке воспроизведения.

Сращивать ленту следует специальной склеивающей лентой, а старые типы лент на ацетатной основе — специальным клеем. Магнитную ленту сращивают так: концы ленты располагают встык и стягивают кусочком липкой склеивающей ленты, наложенной на место монтажа с той стороны, которая лишена рабочего слоя. Края склеивающей ленты аккуратно подрезают по ширине магнитной ленты. Сращивание ленты встык (еще один термин из прошлого, заимствованный современными системами) позволяет делать склейки в середине музыкального произведения без заметных на слух потерь сигнала или нарушений ритма.

При механическом монтаже важно помнить о «мелочах». Например, ножницы, которыми пользуются при монтаже, не должны, даже случайно, быть намагниченными, в противном случае место склейки внесет в фонограмму неприятные глухие щелчки. Следует время от времени размагничивать ножницы размагничивающим электромагнитом.

К началу и концу отмонтированной фонограммы подклеивается специальная лента без магнитного слоя, так называемый ракорд. Его назначение — дать возможность двигателю при запуске набрать необходимую скорость, он также предохраняет запись от обрывов при зарядке. На начальном ракорде, имеющем длину около 2–2,5 м, карандашом пишут или печатают на машинке название записи. Конечный ракорд должен быть короче — около 1 м. Цветовая разметка ракордов облегчает работу с фонограммами. По стандартам применяется следующая цветовая разметка ракордов:

Скорость движения, см/с	Цвет
Монозапись	
76,2	Белый
38,1	Зеленый
19,05	Желтый
9,53	Синий
Стереофония	
38,1	Зелено-белый (полосатый)
19,05	Желто-белый (полосатый)

Хранить чистую ленту и готовые фонограммы следует в специальных картонных коробках в вертикальном положении в помещениях с температурой не выше  $12\pm 3^\circ\text{C}$  и относительной влажностью воздуха не более 50–60%. Длительное воздействие на ленту температуры выше  $20\text{--}30^\circ\text{C}$  (например, прямых солнечных лучей), а также повышенной влажности резко уменьшают сроки хранения ленты. Очень важно также следить, чтобы вблизи записанных лент не находились источники сильных магнитных полей: трансформаторы, электродвигатели и др.

Тем не менее и при оптимальных условиях хранения лента от времени деформируется, высыхает, и качество записи ухудшается. Гарантированный срок хранения фонограмм, таким образом, ограничен примерно 15–20 годами. Поэтому для создания архивов звукозаписей фонограммы на магнитной ленте рекомендуется пу-

тем перезаписи перевести в цифровую форму и хранить на новой основе (например, на компакт-дисках).

Все сказанное относится к той части магнитной звукозаписи, которую можно назвать катушечной или рудонной. Когда на смену катушке пришла кассета, возникли проблемы. Действительно, с ножницами к кассете не подойдешь, а если она нуждается в клее, ее проще и дешевле выбросить. Одного появления кассетной записи достаточно для постановки вопроса о поиске альтернативных методов монтажа. Однако действительные причины иные, и они глубже. Управление и автоматизация уже в 1970-е годы вышли на уровень, когда решение задачи дистанционного управления магнитофонами, как и электронного монтажа, стало делом «техни-ки». Не случайно развитие электронных систем монтажа видеозаписи и звука шло практически параллельно.

Собственно, идея электронного монтажа очевидна. Имеется группа воспроизводящих магнитофонов, на которых установлены ленты с первичными записями. Требуется перенести заготовки с воспроизводящих средств на записывающий аппарат, где в нужной последовательности по фрагментам будет собрана композиционная программа. Минимальный состав электронной монтажной — три аппарата. Реализация рассмотренной схемы требует выполнения нескольких важных условий. Все магнитофоны в монтажной должны иметь устройства для дистанционного управления ими с единого пульта, что легко достижимо, так как все современные аппараты отвечают этому требованию. Однако важно, чтобы язык команд, или протокол управления, воспринимался всеми аппаратами монтажной. А вот здесь единообразие, понятное теоретически, принято фирмами-производителями не было, что повлекло за собой массу неприятностей. Впрочем, современные цифровая техника и здесь нашла универсальные решения. Известно, насколько долго и мучителен поиск нужных фрагментов записи, при этом должны быть обеспечены режимы достаточно точного выхода на отыскиваемый участок. Далеко не просто точно контролировать перемещение ленты в магнитофоне, быстро (в режиме ускоренной перемотки) выходить на заданные точки фонограмм. Но и этого мало. В определенных режимах управление всеми магнитофонами монтажной, перемещением лент, операциями «воспроизведение — запись» и многим другим должно быть согласованным или жестко синхронизовано. Здесь возникают многочисленные аналогии (и не случайно) с видеомонтажом.

Звукорежиссер, приступая к монтажу программы, должен удерживать в памяти и контролировать весь исходный материал. Это общее условие, но при электронном монтаже оно особенно ак-

туально. Формально простой монтаж встык не сложен. Надо найти требуемый фрагмент и «склеить» его с уже смонтированной частью, переписав без пропусков на записывающий аппарат. После этого можно отправляться за следующим фрагментом. В действительности все не так просто. При такой работе вряд ли бы стоило заниматься электронным монтажом.

*Главное в современной системе монтажа — интеллектуальность.* После репетиций со звукорежиссером (можно использовать термин «черновой монтаж») должно быть детальное представление о размещении материала по используемым источникам, порядке их вывода в компоновку программы, специальных эффектах и многом другом. Система должна «знать» все адреса запрашиваемых материалов, команды их поиска в кратчайшее время. В принципе можно отыскать требуемый фрагмент, ориентируясь на данные счетчика метража ленты, но такой поиск будет неточен, хотя в качестве первого уровня системы поиска вполне годится. Уже на первых этапах развития электронного монтажа стало ясно, что нужны специальные метки-указатели. Самое простое — расстановка меток звукорежиссером. Такая система меток, в сущности, аналоговая, поскольку ориентируется на положение границ фрагмента, но не несет информации о его размещении (адресе) на ленте. Следующий принципиальный этап связан с введением специальных временных кодов, которые вместе с паспортом «участка» информируют и о его «географии».

Современная техника предоставляет нам широкие возможности. Звукорежиссер может прослушать несколько фрагментов, соединить их, ввести нужные эффекты, проделать многое другое. Главное, что можно услышать сделанное, оценить, принять или отвергнуть те или иные решения или внести изменения в прослушанное, вновь проконтролировать и, только достигнув согласия со своим восприятием, записать на монтируемый оригинал. Более того, автоматизация на современном уровне позволяет звукорежиссеру шаг за шагом проделать всю работу, прослушать и исправить неудачные решения. Управляющий системой компьютер при этом фиксирует все утвержденные команды, сохраняет их в памяти и потом в автоматическом режиме, используя лист монтажных решений, выполняет чистовой монтаж.

Электронный монтаж связан с многократной перезаписью, за которой стоят серьезные проблемы. Чем сложнее монтаж, чем больше источников используется, чем многослойнее эффекты — тем больше перезаписей требуется. Каждая перезапись сигналаграммы — это заметные потери качества аналоговой магнитной записи. Здесь и вступают в противоречия творческие планы звукорежиссера и

требования к техническому качеству записи. В аналоговой записи постепенно выявилось и еще одно противоречие: система управления монтажом и другими функциями быстро стала цифровой, а то, чем управляют, сохранило все недостатки аналога. Эти противоречия удалось снять только в цифровых системах, о которых речь пойдет далее.

### § 3. Многодорожечная запись

Еще задолго до появления первых многодорожечных магнитофонов в студиях применялся способ раздельной, поочередной записи отдельных голосов и групп музыкального ансамбля на обычных магнитофонах с последующим их сведением, т.е. с наложением друг на друга при перезаписи (запись с наложением).

Этот способ использовался в основном для получения различных звуковых эффектов при записи эстрадной музыки. Сначала записывался, например, аккомпанемент, который затем подавался на один из входов микшерного пульта для перезаписи и параллельно воспроизводился с малым уровнем громкости через установленный в студии громкоговоритель (или на головные телефоны). В студии у микрофона, включенного на другой вход микшерного пульта, находился солист, который исполнял свою партию под уже записанный аккомпанемент. В тракте микшерного пульта происходило смешивание сигналов аккомпанемента и сольной партии, причем соотношения уровней между этими двумя компонентами звучания подбирались и регулировались звукорежиссером. С выхода пульта суммарный сигнал поступал на вход второго магнитофона, на котором и велется окончательная запись уже полного произведения.

Этот несложный метод записи давал возможность наимыгоднейшим образом расположить микрофоны для каждого исполнителя или группы исполнителей, не заботясь об их акустическом разделении и о том влиянии, которое они могли бы оказать на звучание других исполнителей. Наконец, метод записи с наложением позволял получать разнообразные специальные звуковые эффекты с помощью особых трюковых приемов, например, запись дуэта, в котором партии обоих голосов исполняются одним и тем же певцом; запись какого-либо музыкального инструмента в несвойственном ему регистре и т.д.

Прием записи с наложениями можно было повторять несколько раз подряд и таким образом записывать отдельно каждую ор-

кестровую группу, требующую своей специфической окраски звучания. Однако при такой записи в технологический процесс производства готовой фонограммы включается перезапись, которая, как известно, при аналоговом методе перезаписи вносит дополнительные искажения. Поэтому, если требуется повышенное качество записи, предпочитают пользоваться специальными многодорожечными магнитофонами. Эти магнитофоны имеют 4, 8, а некоторые 24, а иногда и 32 и даже 48 отдельных каналов записи и воспроизведения. Такой магнитофон позволяет записать звучание музыкального ансамбля по частям, каждой группы на отдельной дорожке записи. Затем при воспроизведении сигналы со всех дорожек совмещаются в микшерном пульте и перезаписываются на обычный магнитофон с узкой лентой (6,25 мм) для получения окончательной, пригодной для прослушивания в домашних условиях монофонической или двухдорожечной стереофонической фонограммы.

Первые простейшие профессиональные многодорожечные магнитофоны появились в начале 70-х годов. Это были аналоговые четырехдорожечные машины, и предназначались они для работы на ленте 2 дюйма. Позже стали выпускаться, как уже упоминалось, 8-, 16-, 24- и даже 48-дорожечные аппараты.

Упрощенная схема многодорожечного магнитофона может быть пояснена на примере самого простого четырехдорожечного аппарата (рис. 83).

Магнитные головки многодорожечных аналоговых магнитофонов состоят из многих головок, конструктивно объединенных и расположенных друг над другом. Такие «многоэтажные» головки, входящие в эту систему, выполняют соответственно функции записи, воспроизведения и стирания каждой записанной программы в отдельности.

Дорожки записи на широкой ленте располагаются так, чтобы между ними оставались достаточной ширины промежутки чистой ленты, необходимые для того, чтобы исключить взаимное проникновение сигналов из одного канала в другие. Для точного совпадения во времени звучания отдельных оркестровых партий, записываемых на различных дорожках, рабочие зазоры всех систем каждой магнитной головки выполняются строго на одной вертикали друг над другом.

Известны два способа многодорожечной записи: параллельный и последовательный. При параллельной записи все группы исполнителей записываются одновременно, каждая на дорожку своего канала. Исполнители и микрофоны должны быть расположены в студии так, чтобы каждый микрофон, скоммутированный на вход

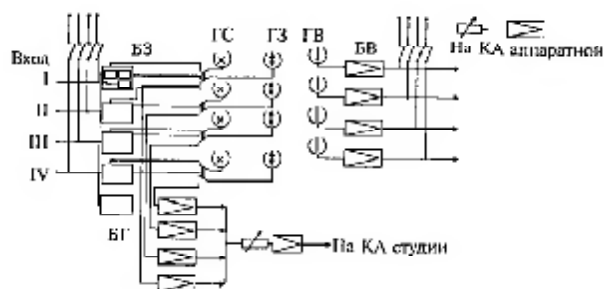


Рис. 83. Блок-схема многодорожечного магнитофона

одного из каналов микшерного пульта, воспринимал бы звуки в основном только от своей группы исполнителей.

Предназначенный для многоканальной записи микшерный пульт, разумеется, должен иметь число выходных каналов, соответствующее числу дорожек записи магнитофона. И не только в этом заключается отличие микшерного пульта, предназначенного для многоканальной записи, от обычного. Во-первых, на выходе каждого канала такого пульта на запись должен быть установлен измеритель уровня. И, во-вторых, схема пульта, предназначенного для многодорожечной записи, должна содержать дополнительное смесительное устройство для контрольного прослушивания всех каналов, подаваемых на запись на два контрольных громкоговорителя звукорежиссерской аппаратуры, непосредственно в процессе записи.

Когда запись закончена, лента перематывается, магнитофон включается на воспроизведение, и осуществляется микширование (сведение) сигналов всех каналов. Суммарный сигнал записывается на магнитную ленту обычного моно- или стереофонического магнитофона.

Такой способ изготовления фонограмм дает возможность звукорежиссеру при микшировании и перезаписи регулировать уровень программ отдельных каналов, корректировать частотные характеристики, вводить в них при необходимости сигналы искусственной реверберации, а также применять другие эффекты. При этом все операции сведения и монтажа выполняются в отсутствие исполнителей, и звукорежиссер в спокойной обстановке может более тщательно с помощью многочисленных проб найти оптимальный режим микширования и обработки сигналов для дости-

жения наилучшего музыкального баланса и наиболее интересных окрасок звучания.

Из-за трудности достижения достаточно полного акустического разделения звуковых сигналов от разных источников в студии, без которого во многом теряется смысл записи на многодорожечном магнитофоне, используется более эффективный, **последовательный** способ многодорожечной записи, широко применяемый при записи развлекательной, танцевальной и поп-музыки. При последовательной записи группы оркестра записываются поочередно в разное время, каждая на отдельную дорожку широкой магнитной ленты. Например, на первую дорожку записывается группа инструментов, исполняющих аккомпанирующую, ритмическую партию партитуры (контрабас, ударные инструменты, иногда гитара и т.п.), по второму каналу — другая группа инструментов, например скрипок. При этом звукорежиссер подбирает для них оптимальный режим звукопередачи, который может и не совпадать с предыдущим режимом ни по количеству микрофонов и их расположению, ни по характеристикам направленности.

Чтобы звучание всех партий, записанных на разных дорожках магнитной ленты, совпало по времени и точно соблюдался ритмический рисунок произведения, дирижеру и исполнителям на установленный в студии громкоговоритель на малом уровне громкости подается сигнал записанной ранее ритмической партии, который для них синхронизирующий. Но если мы имеем дело с аналоговым магнитофоном, этот синхронизирующий сигнал должен поступать на громкоговоритель в студию с головки не воспроизведения первого канала, а записи. Если это будет не так, исполнители каждый раз будут вступать позже, запаздывая по отношению к ритму первой партии на время прохождения ленты от головки записи до головки воспроизведения. Именно поэтому сигнал синхронизации считывается с соответствующей дорожки головками записи, которые, будучи универсальными, переключаются, когда данные каналы не включены на запись, в режим воспроизведения и коммутируются на усилители прослушивания, установленные в канале синхронизации. (Естественно, эта особенность конструкции актуальна только для аналогового магнитофона.)

Под аккомпанемент уже записанных двух оркестровых партий, прослушиваемых в студии для задания ритма, на третью дорожку записывается новая группа инструментов (например, духовых) и т.д. Распределение голосов оркестра по группам зависит прежде всего от характера и аранжировки произведения, а также от акустических характеристик студии. Поэтому вопрос решается звукорежиссером по-разному для каждого конкретного случая. Дальнейшее

инженерное и перезапись производятся так же, как и при параллельной записи.

Применение последовательной, поочередной записи отдельных групп инструментов оркестра или отдельных исполнителей дает возможность использовать многочисленные трюковые приемы, часто весьма эффективные для некоторых произведений так называемой развлекательной музыки. Например, записав аккомпанемент на скорости 38,1 см/с, можно переключить магнитофон на 19,05 см/с и партию фортепьяно записать на второй дорожке с той скоростью. Синхронизирующий сигнал будет прослушиваться в студии исполнителем также вдвое медленнее и на октаву ниже нормального звучания. Следуя этому неестественному ритму, пианист должен сыграть свою партию. При воспроизведении для сведения звуковых сигналов с обеих дорожек в один канал магнитофон вновь переключают на скорость 38,1 см/с. В результате тональность записанной на второй дорожке партии фортепьяно транспонируется на октаву выше, и на фоне нормально записанного аккомпанемента зазвучит инструмент с высоким, несколько «стеклянным» тембром, резко отличным от нормального, собственного фортепьяно тембра, но иногда придающим звучанию сей записи оригинальные и весьма эффектные краски.

Разумеется, четыре дорожки записи не могут удовлетворить звукорежиссера, если он сталкивается со сложными партитурами современной музыки (с такими, как, например, некоторые сочинения А. Шнитке). Что уж и говорить о современных эстрадных ансамблях, аранжировка которых часто специально предназначена для трированно рельефного тембрового разделения голосов и совершенно неестественного для живого исполнения музыкального баланса.

Для того чтобы звукорежиссер был максимально свободным при обработке звукового материала, профессиональные студии звукозаписи стали приобретать 8-, 16- и 24-дорожечные аналоговые магнитофоны фирм *Studer*, *Telfunken* и некоторые другие. В тот период развития студийной техники эти аппараты полностью удовлетворяли технологическим потребностям студий. Лучшие образцы из них были 24-дорожечные, запись велась на ленте шириной 1 дюйма и, несмотря на то что каждая дорожка записи имела ширину меньше 2 мм, качество записи (в том числе и шумы паузы) практически не отличалось от самых лучших записей, сделанных в современных студийных стереофонических магнитофонах. Сложность возникла лишь при сведении всех дорожек на узкую ленту. Шумы всех дорожек при этом суммировались, и в сведенной фонограмме их уровень становился неприемлемым. Приходилось как



обязательную меру при многодорожечной записи использовать при-  
обрасные отдельно компандерные системы шумоподавления типа  
*Telecom* или *Dolby SR*.

Таким образом, многодорожечная запись, если к ней предъяв-  
лять жесткие требования по техническому качеству звучания, —  
дело довольно накладное.

Правда, небольшие полупрофессиональные студии уже в то  
время стали оснащаться более дешевыми многодорожечными маг-  
нитофонами, выполнявшими необходимые технологические опе-  
рации, но уступавшие лучшим образцам подобной техники по тех-  
ническим параметрам. Например, стал популярен 16-дорожечный  
магнитофон G-16 фирмы *Fostex*, рассчитанный на работу с 1/2-дюй-  
мовой лентой. Этот магнитофон имеет весьма объемную память и  
автолокатор ленты, обеспечивающий быстрый поиск нужного ме-  
ста фонограммы в процессе записи и монтажа. В схеме магнитофо-  
на G-16 предусмотрена система шумоподавления *Dolby C*.

Со временем появились цифровые магнитофоны, что позво-  
лило существенно повысить качество записи, широко внедрить  
электронный монтаж фонограмм, т.е. компоновать отдельные мон-  
тажные фрагменты в определенной последовательности путем их  
перезаписи. Для автоматизации технологического процесса стали  
широко использоваться цифровые адресно-временные коды.

## § 4. Цифровая звукозапись и обработка сигнала

Попытки использовать технику дискретных (импульсных) сиг-  
налов для обработки и передачи звука предпринимались много-  
кратно, но до начала 1980-х годов они не имели особого успеха.  
И только позже, когда в студиях появились первые цифровые ап-  
параты, стало ясно, что переход на цифровую технику открывает  
широкие возможности для совершенствования методов обработки  
сигналов и их записи. Этому способствовали несколько внутрен-  
них технологических революций в микроэлектронике, связанных  
с переходом на более высокие уровни интеграции. В результате  
электронные устройства, ранее умещавшиеся разве что в шкафу,  
уменьшились до карманного размера. Это повлияло на технику зву-  
козаписи и обработки звука.

Но прежде чем приступить к описанию различных видов цифро-  
вой записи, познакомимся с основными принципами transforma-  
ции обычного аналогового звукового сигнала в цифровую форму.

## Аналого-цифровое преобразование

**Копирование** — единственный способ передачи информации,  
обеспечивающий возможность принять и расшифровать ее. Инфор-  
мация не материальна, но доставка ее от одного клиента к друго-  
му требует материальных средств, в том числе и носителя. Среди  
многих способов кодирования любой информации выделяется  
цифровой. Цифровой код содержит только два символа: ноль, сви-  
детельствующий об отсутствии сведений, и единицу, сообщаю-  
щую, что они есть. Именно этот предельно упрощенный язык об-  
щения и революционизировал всю информационную среду чело-  
вечества. И звукотехника не стала исключением.

Все начинается с аналого-цифрового преобразования. Цель этой  
операции — в замене непрерывной и плавно меняющейся кривой  
(она может представлять уровни звукового давления акустической  
волны, напряжения на выходе усилителя звука или намагничен-  
ности на ленте) на последовательность импульсов с постоянной  
тактовой частотой. В этой последовательности отсутствие импульса  
или его отрицательный знак передаст «нет» (логический 0), а при-  
сутствие или положительное значение — «да» (логическую 1).

Среди методов цифрового представления звуковых сигналов наи-  
более распространена импульсно-кодовая модуляция — ИКМ (англ.  
*PCM*). Процедура аналого-цифрового преобразования (АЦП) при  
ИКМ состоит из трех операций: дискретизации, квантования и ко-  
дирования. При этом квантование и кодирование, как правило, осу-  
ществляются одновременно общим функциональным блоком, но  
при анализе качественных показателей метода ИКМ эти операции  
удобно рассматривать раздельно.

Итак, для осуществления ИКМ входной сигнал ограничивает-  
ся по частоте и обрабатывается схемой «выборка—хранение». На  
этом этапе через равные промежутки времени с частотой, кото-  
рую называют частотой дискретизации отсчетов или выборки, оп-  
ределяют действующие уровни аналогового сигнала. Таким обра-  
зом, непрерывный аналоговый сигнал преобразуют в поток им-  
пульсов, следующих с частотой дискретизации. При этом величина  
отдельного импульса равна соответствующему значению отсчета  
аналогового сигнала (рис. 84).

Далеко не очевидно, что аналоговый процесс, неразрывный  
во времени и пространстве, можно представить последовательно-  
стью импульсов. Эта проблема получила решение только в нашем  
веке — в целом в начале века, а в деталях — позже.

Информация, передаваемая любыми носителями, если она ог-  
раничена во времени, пространстве и по уровневому диапазону мо-





Рис. 84. Дискретизация звукового сигнала

Частота дискретизации звукового сигнала выбирается на основании *теоремы отсчетов Котельникова*. Для неискаженной передачи непрерывного сигнала, занимающего определенную полосу частот, необходимо, как вытекает из этой теоремы, чтобы частота дискретизации была не менее чем в два раза больше наивысшей частоты передаваемого сигнала. Таким образом, звуковой сигнал с полосой частот до 20 кГц должен быть разбит минимум на 40 000 отсчетов в секунду.

В настоящее время в цифровой аппаратуре различного назначения находят применение различные частоты дискретизации сигнала. Прежде всего это 32 кГц, в основном в системах связи и передачи сообщений, где наивысшая частота сигнала 15 кГц. В лазерных проигрывателях компакт-дисков и на некоторых бытовых цифровых магнитофонах (впрочем, иногда и профессиональных) наивысшая воспроизводимая частота может достигать 20 кГц, поэтому частота дискретизации должна превышать 40 кГц. Здесь принята частота 44,1 кГц. В студийной аппаратуре звукозаписи (стандарт AES/EBU) стандартизована частота 48 кГц.

Таким образом, *наивысшая частота преобразуемого методом ИКМ в цифровой вид звукового сигнала ограничена частотой дискретизации преобразователя*. Дело в том, что спектр дискретизованного сигнала обладает периодической структурой. Кроме низкочастотной части, отображающей сам звуковой сигнал, он имеет еще

дублиции носителя, может быть передана полностью дискретным и конечным набором информационных единиц со значениями «да» и «нет». Это одна из последних формулировок теоремы Шеннона. Мы сошлемся еще на одну теорему, доказанную в 1926 г. В. Котельниковым, из которой следует, что ограниченный по полосе частот сигнал может быть представлен дискретным набором сигналов определенной формы. Иначе говоря, ограниченное или дискретно изначально, или может быть представлено, причем точно, в дискретном виде. Эти строгие математические соображения — основа цифровой техники.

высокочастотные компоненты в виде боковых полос с центрами в точках, кратных частоте дискретизации.

Если спектр звукового сигнала перед преобразованием не ограничить, то его высокочастотная часть может наложиться на промежуточную полосу частот в звуковом диапазоне. Этот эффект называют эйлингом (Aliasing), он вызывает появление в преобразованном сигнале неустраняемых искажений в виде паразитных высокочастотных составляющих. Изучение будет безнадежно испорчено. Чтобы избежать этого, на входе преобразователя устанавливается фильтр низких частот (ФНЧ) с частотой среза, равной половине частоты дискретизации, — так называемый антиэйнго-фильтр. Его характеристика этого фильтра должна иметь очень крутой срез, что выполнить довольно сложно (рис. 85).

Из-за этого, а также для того чтобы расширить полосу перерабатываемого звукового сигнала, в современных преобразователях ИКМ часто используют повышенную частоту дискретизации (передискретизацию), например 96, 192 кГц и выше.

Следующий шаг преобразования сигнала в цифровой код — *уровневое квантование* (рис. 86).

Квантование по уровню также связано с ограничениями сигнала — теперь по динамическому диапазону. Здесь важна точность отображения каждой конкретной выборки, что определяется числом уровней квантования, позволяющим с максимальной точностью и без потерь передать информацию.

Квантование проходит следующим образом. Динамический интервал звукового сигнала разбивается на число разрешенных уровней (зон), пропорциональное  $2^n$  (где  $n$  — разрядность квантования). Каждой зоне присваивают (естественно, по порядку) номер, выраженный в двоичных информационных единицах — битах. Уровень данного отсчета сравнивают с уровнями зон и присваивают ему номер той зоны, в пределах которой он находится.

Этот номер в дальнейшем и представляет собой величину конкретного отсчета (выборки) сигнала. Величина эта кодируется,

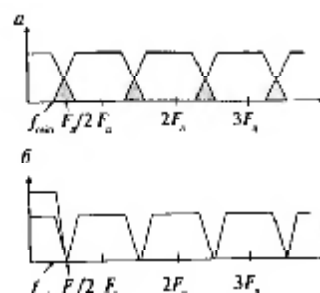


Рис. 85. Спектр дискретизованного сигнала:

а — без ФНЧ; б — с ФНЧ

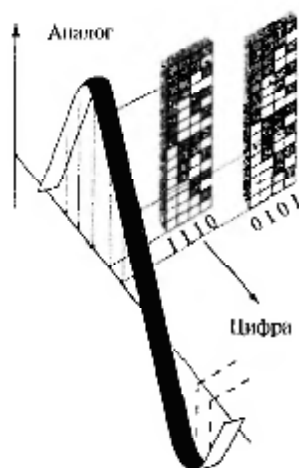


Рис. 86. Процесс квантования по уровню и цифрового кодирования

т.е. выражается последовательностью единичных и нулевых импульсов, которая в двоичной системе счисления представляет номер уровней зоны отсчета. Группа цифр (импульсов в сигнале) называется кодовым (цифровым) словом, представляющим величину данного отсчета во всех дальнейших преобразованиях.

Международные соглашения как по частотам дискретизации, так и по числу уровней квантования ориентируются на уровни, близкие к оптимальным и одновременно удобные с позиций реализации. Точность цифровой информации может быть сколь угодно высокой. Однако на практике из-за ступенчатости процесса квантования цифровым сигналам свойствен

но конечное разрешение, и преобразование «аналог—цифра» всегда сопровождается небольшими ошибками, вызывающими специфические искажения сигнала, наиболее заметные на малых уровнях. Эти искажения называются *шумом квантования*. Теоретически, при соблюдении определенных условий, цифровое преобразование слышимых изменений в сигнал, включая специфические шумы, вносить не должно. В действительности шумы квантования — основной фактор, определяющий шумы цифровой системы. Необходимая точность (разрешающая способность) системы выбирается из следующих соображений: отношение «сигнал—помеха» должно быть по величине не менее чем в аналоговой записи при использовании систем шумоподавления (например, Dolby SR или Telcom), т.е. не хуже 90 дБ. Отношение «сигнал—помеха» в цифровой аппаратуре определяется только ошибкой квантования, зависит, разумеется, от разрядности квантования и рассчитывается так:

$$A = 20 \cdot \lg 2^n,$$

где  $A$  — отношение «сигнал—помеха», выраженное в децибелах;  $n$  — число бит.

Это соотношение можно переписать и так:

$$A = n \cdot 20 \cdot \lg 2.$$

Поскольку  $\lg 2 = 0,3$ , то  $A = n \cdot 20 \cdot 0,3 = n \cdot 6$  дБ.

Последнее соотношение несет важную информацию: каждый бит улучшает отношение «сигнал—шум» на 6 дБ. Это полезно знать для оценки возможностей цифровых систем.

Например, мы хотим, чтобы в нашей системе шум не превышал 96 дБ, для этого необходимо иметь число разрядов квантования (число бит)  $n = 96/6 = 16$  бит. При этом число зон квантования, или разрешенных значений амплитуды звукового сигнала, составит  $2^n = 65536$ . Или, другими словами, каждая измеряемая амплитуда может быть представлена с точностью до  $1/65536$  от ее максимально возможной величины. И тем не менее на самых тихих местах исполнения, когда уровни сигнала малы, даже эти небольшие ошибки квантования воспринимаются тренированными слушателями в виде шума. Разумеется, *шум квантования будет тем ниже, чем меньше шаг квантования, или, что то же самое, чем больше число разрядов квантования*. Очевидно также, что влияние шума зависит от уровня преобразуемого аналогового сигнала. Если его амплитуда мала, то становятся слышимыми характерные искажения, обусловленные появлением высших гармоник из-за зубчатой формы шума квантования. Причем на слух это воспринимается именно как искажения, а не как шум.

Ослабить влияние таких искажений можно, как ни парадоксально это звучит, с помощью добавления другого шума. Если «подмешать» во входной сигнал «белый» шум (шум, амплитуда которого практически постоянна в широком диапазоне частот), то корреляция (связь) между шумами квантования и амплитудой сигнала нарушается. При этом воспроизведенный сигнал уже не будет выглядеть искаженным. Добавление такого шумоподобного маскирующего сигнала *dither'a* — весьма важная часть процесса преобразования.

Разделение на зоны уровня квантования равномерно. Однако существуют и другие весьма эффективные способы квантования сигналов, при котором ступени (ширина зоны) квантования уменьшаются со снижением уровня сигнала и за счет этого увеличивается динамический диапазон отображаемых сигналов.

В настоящее время для АЦП стандартизовано только равномерное (линейное) квантование. Число уровней квантования, или разрядов кодового слова, тоже важно.

Цифровая техника звукозаписи стартовала, опираясь на 16 разрядов, но выяснилось, что этого мало. Теперь работают системы, в которых применяется квантование на 20, 24, а в некоторых случа-

ях и на 32 уровня. Нарастивания числа уровней квантования требуют условия идентичности звука при прямом прослушивании и воспроизведении после цифрового кодирования — декодирования. Однако за этим стоит малопривлекательный фактор нарастивания потока информации.

Например, при дискретизации с частотой 48 кГц и 16-битном уровнем квантования полный поток цифрового звука (bitrate), или скорость передачи информации, составит  $48000 \cdot 16 = 768$  кб/с. При передаче стереофонической пары этот поток удвоится и составит 1,536 Мб/с. Если считать, что для передачи по каналу связи (или какому-либо другому) одного бита потребуется один период несущей волны, то необходимая для передачи полоса частот в МГц по числовому выражению совпадет с потоком информации в Мб/с. Если аналоговый звук занимает полосу в 20 кГц, то цифровой поток того же звукового сигнала потребует примерно мегагерц полосы частот. Такова плата за удовольствие оцифровки звука, с которой приходится считаться.

Бит — это цифровая единица информации, но в цифровой технике используется еще один термин — *байт*. Он означает кодированное слово длиной в 8 бит (принято обозначать бит — б, а байт — Б).

Итак, процесс разрушения звука и его превращения в последовательность кодовых посылок завершен. Поток преобразованного таким образом звука представляет собой череду импульсов, в которой пропуск означает «нет», наличие — «да». Группа импульсов этого потока, несущая информацию об одном уровне звукового сигнала или об уровне его отсчета, составит кодовое слово. Длина кодового слова ( $n$ ) — число импульсов в группе, несущей информацию об уровне сигнала в точке конкретного отсчета.

В последнее время все более широкое распространение получают методы аналого-цифрового и цифро-аналогового преобразования на основе использования сигма-дельта-модуляции, когда квантование осуществляется всего одним разрядом, но с частотой в десятки и сотни раз более высокой, чем та, которая используется в ИКМ (до 2,8 МГц).

В процессе такого преобразования анализируются и выражаются в цифровом коде не амплитуды выборок аналогового сигнала, а направление их изменений. Если амплитуда возрастает, то на выходе преобразователя будет 1, а если уменьшается — то 0. Нулевой уровень кодируется чередующимися нулями и единицами.

Основная идея такого метода состоит в том, что спектр шума квантования, возникающего в процессе квантования с малым разрешением, преобразуется так, что в полосе звуковых частот его

уровень понижается, а в области высоких частот, за пределами слышимого звука — повышается.

Затем полученный цифровой поток обрабатывается прореживающим фильтром низших частот (фильтр-дециматор) с получением в результате последовательности отсчетов необходимой разрядности.

## Цифровое кодирование

После аналого-цифрового преобразования цифровой сигнал в устройстве, называемом *кодером*, подвергается специальной кодировке с целью его упорядочивания в слова и предложения строго определенной длины, дополняется служебными символами, обозначающими начало слов и предложений, а также информацией о способе и объеме сокращений.

В пункте приема кодовой посылки необходимо определить начало кодового слова. Последовательность близких импульсов создает проблему формирования сигналов границ. Конечно, цифровая машина считать умеет и способна через нужное число импульсов определить, где закончилось одно и началось другое слово, благо все они одной длины! Но любой сбой, а от этого не застрахованы и машины, делает невозможным дальнейшее чтение текста.

Поэтому начало каждого цифрового слова обозначается так называемым *флагом* — служебной комбинацией, состоящей из группы символов, случайно повторить которую практически невозможно или, точнее, ее крайне редко можно встретить. С флага начинают читать и более крупное сочетание данных — *цифровое предложение*. Длительность цифрового предложения зависит от характера текста. В видеозаписи она определяется длительностью телевизионного поля. В звуке, если это не сопровождение для кино- и видеофильма, возможные привязки по длительности предложения не столь очевидны. Однако они также определены, например, это 1 мс, принятая для цифрового радиовещания. Помимо флага и кодовых комбинаций звуковых отсчетов цифровое предложение содержит ряд служебных символов.

За регулировочными (флаговыми) идут обычно биты управления, а также дополнительной информации. Для разных систем и каналов эти группы битов различны, но они несут важную информацию, как, где и что можно читать. В частности, стереофонический сигнал передается в одном цифровом потоке побитно.

В кодере осуществляется также *цифровое сжатие информации* (уплотнение, компрессия). Это различные термины, определяющие одно и то же. Конечная цель компрессии — вычеркивание

избыточной информации. Теоретики предпочитают утверждать, что звуковой сигнал — случайный процесс. Однако практически всегда последующие уровни сигнала связаны с его предшествующими значениями. Такие сигналы называют коррелированными, а временной интервал, в котором можно проследить эти связи, — временем корреляции. Корреляционные связи могут быть довольно длительными. Определив характер корреляции, можно с определенной точностью предсказать, каким будет сигнал через некоторый промежуток времени. Это означает, что можно переслать не всю информацию, а только ее выборочные значения и некоторые коэффициенты сжатия. Этим можно достигнуть существенной экономии по передаваемому потоку данных.

В телевидении сжатие особенно актуально. Для звука его значение не столь велико из-за существенно меньших потоков информации и более коротких интервалов корреляции. Тем не менее и здесь сжатие используется.

Принцип любой системы сжатия сводится к вычеркиванию постоянной составляющей и передаче разницы между предшествующей и последующей посылками. Этот процесс распространяется и на скорость изменения информации, ускорение и т.д. Насколько глубоко можно проникнуть в высокие моменты сигнала и эффективно сжать его, зависит от объема используемой оперативной памяти. Мы еще вернемся к роли памяти в цифровой обработке и, в частности, сжатия информации, поскольку это решающий фактор.

В цифровых звуковых каналах вещания, записи часто прибегают к сжатию по динамическому диапазону — подобно аналоговой компрессии, выполняемой простым вычеркиванием части битов кодовых слов, которые считаются несущественными. Они восстанавливаются на приемном конце. Здесь принимается во внимание разница в «удельном весе» битов разных разрядов. Так, ошибки в битах младших разрядов, несущих информацию о малых уровнях звукового сигнала, менее заметны, чем ошибки в битах с информацией о громких звуках. Например, бит самого младшего разряда влияет на конечный результат не более чем на одну часть из 65 000 символов (при 16-уровневом квантовании). Такие искажения заметны лишь при записи очень тонких и тихих пассажей. Для громкого звука или быстрых переходов подобные потери роли не играют.

Процесс сокращения кодовых слов начинается со старших битов, но начальный всегда пропускается, поскольку несет знаковую информацию. Следующий, если он совпадает со старшим, вычеркивается. То же делается и далее: вычеркиваются все после-

дующие одинаковые значения. Ситуация, когда 5 старших битов кодового слова одинаковы, встречается довольно часто, поэтому уже этот простой процесс достаточно эффективен. Вычеркивание может быть продолжено. Однако действия устройства компрессии или декодера должны быть сообщены приемной стороне — декодеру. С этой целью в состав кодовых слов (предложений) вводят масштабные коэффициенты.

Еще одна сторона процесса оцифровки — *защита информации*. Цифровой поток одиноких импульсов может быть подвергнут поражению в любом месте. Выпадения сигналов в звукозаписи из-за дефектов носителя весьма часты. В аналоговых системах с этим надо считаться, в цифровых можно активно противостоять ошибкам. Защита от ошибок — специфика цифровых систем, и сводится она к введению в цифровой поток специальных *символов защиты*. Самый простой способ — введение в преамбулу, а также в кодовые слова информационного блока, символов обнаружения и защиты от ошибок. Например, для обнаружения ошибки кодовое слово проверяется на четность определенной группы кодовых символов. Есть более сложные системы защиты, связанные с введением специальных символов. Их положение в кодовом предложении и взаимосвязь со значением соседних элементов — весомая информация о достоверности предложения. Если посылка признана ошибочной, кодовое слово или предложение замещают предшествующим или проводят интерполяцию по нескольким соседним элементам. Эта операция связана с уже упомянутой коррелированностью звукового сигнала.

Еще одна операция по кодированию и защите от ошибок — *перемешивание*, или *скремблирование*. Любые каналы передачи вносят определенные искажения. Ошибки — неизбежное зло, но в цифровых системах с ними можно бороться.

Перемешивание, или скремблирование, — один из способов если не избежать ошибки, то замаскировать ее. При записи самая неприятная ситуация — *румпные ошибки*, когда выпадает довольно длинный и связанный по времени кусок. По известному правилу на передающем и принимающем концах исходную информацию перемешивают так, что каждый бит звуковой информации занимает в предложении как бы случайное положение. Все соседние элементы после перемешивания никак не связаны с ним. Подобное «перетряхивание» потока преследует несколько целей. Во-первых, сигнал превращается в шумоподобный, что делает спектр сигнала близким к равномерному. Во-вторых, биты конкретного кодового слова разносятся по всему предложению случайным об-

разом. Если групповая ошибка, возникая, например, при записи из-за царапины, разрушает звук на определенном участке, то перемещение до записи превращает эту довольно неприятную ошибку в набор хаотически разбросанных коротких импульсов, конечно, ухудшающих восприятие, но не так резко, как длительное выпадение.

Как уже было сказано, в преамбулу, а также в кодовые слова информационного блока могут вводиться символы обнаружения и защиты от ошибок. Самая простая модель действий после обнаружения ошибки — замена пораженного участка предшествующим. Это возможно именно потому, что близкое прошлое и будущее друг от друга отличаются мало. Такой подход оправдывает себя при трактовке очень широкого, почти неограниченного объема событий. Возможны и более сложные подходы, связанные с анализом поведения сигнала в нескольких предшествующих выборках. Здесь еще точнее удастся предвидеть вероятное значение сигнала. Предсказание требует достаточно развитой операционной памяти. Чем больший объем информации хранится в ней, тем точнее предсказание.

После канального кодирования, перемещения и других операций, в том числе связанных с вычеркиванием необязательной части информационного потока, длина кодовых слов отличается от той, которая формируется при аналого-цифровом преобразовании. Тем не менее разбивка на кодовые слова остается. Несмотря на особенности указанных систем передачи звукового предложения, в целом формирование кодовых слов и предложений в любой цифровой системе происходит по сходным правилам. Различия возможны, но они относятся к деталям.

## Цифро-аналоговое преобразование

Процесс обратного преобразования последовательности импульсов в аналоговый сигнал называется **цифро-аналоговым преобразованием**, а устройства для его осуществления — **цифро-аналоговыми преобразователями (ЦАП)**.

На выходе ЦАП получается ступенчатый аналоговый сигнал, величина ступенек которого равна численному значению соответствующих отсчетов. Чтобы из ступенчатого сигнала получить гладкую кривую, его необходимо пропустить через фильтр низких частот.

Цифровой звук — это надо помнить — дорогое удовольствие. Вместо полосы в 20 кГц аналогового сигнала для звуковой посылки

цифрового звука требуется в 50 раз больше. Сжатие и другие улучшения позволяют снизить ее величину в несколько раз, но не кардинально. Так почему же цифровая техника упорно внедряется в практику? Естественно, можно привести аргументы, доказывающие полезность цифровых технологий, несмотря на их расточительность по полосам частот, энергопотреблению и другим факторам. Впрочем, усовершенствованная технология цифровых микросхем заставляет снять обвинения цифровой техники в излишествах по энергопотреблению и ряду других технико-экономических факторов.

Для любого аналогового сигнала помехи и искажения — неприятность. Цифровой сигнал — это последовательность импульсов. Они формируются изначально, и потеря их формы из-за шумов или нелинейных искажений в каналах передачи практически не влияет на качество принятого сигнала. Импульс может быть искажен, но для системы важно принять простое решение: наличествует импульс или отсутствует. Более того, после поступления импульса любая цифровая система немедленно регенерирует, или восстанавливает его в первоначальной форме. *Унификация формы и упорядоченность передачи информации — важные преимущества цифровых систем.* Это, как уже говорилось, позволяет обнаруживать ошибки и восстанавливать потерянную информацию.

Аналоговые системы чрезвычайно консервативны и поэтому для нормального функционирования требуют сохранения формы сигнала на всех преобразованиях. Цифровые, напротив, от столь формальных вещей не зависят. Их суть в «да» или «нет». Строго говоря, переход к цифровым представлениям и последующее восстановление звука теоретически можно выполнить так, что сигнал на выходе будет неотличим от сигнала на входе. Но это лишь теория, а на практике различие есть, и оно слышимо. В нашей стране и за рубежом есть немало профессиональных звукорежиссеров, которые относятся к цифровому звуку, мягко говоря, скептически, а иногда и вовсе не принимают его как слишком жесткий.

Впрочем, похожие претензии предъявляют и к транзисторным усилителям мощности. Не случась наблюдающийся в последнее время взрыв интереса к ламповой аппаратуре звуковых студий. Многие считают (и к этому следует отнестись серьезно), что ламповая аппаратура дает мягкий, более приятный звук.

Этим замечанием хотелось бы обратить внимание на вечную проблему соотношения нового и старого. Без сомнения, цифровые системы обработки звуковых сигналов перспективны и, вероятнее всего, будут доминировать в будущем, но и, казалось бы, отработанные и отжившие системы сохраняют ресурсы жизнеспособности, достаточные для их эффективного возврата.

## § 5. Цифровая звукозапись на различные носители информации

### Цифровая магнитная запись на ленточные носители

При переходе от традиционной аналоговой звукотехники к цифровому способу передачи сообщений и к записи звукового сигнала в цифровой форме необходимы новые подходы к разработке аппаратуры. Требования к магнитной ленте для цифровой записи звука существенно отличны от тех, что предъявляются к аналоговой записи. Самое главное, в цифровой записи не нужно и даже нежелательно пологие. Используются материалы, петля гистерезиса которых имеет участки, практически параллельные вертикальной оси. Подобная форма кривой близка к характеристике переключателя, что и требуется в цифровой технике. Такую характеристику имеют металлы переходной группы и их сплавы. Благодаря этому появились металлизированные магнитные ленты.

Металлизация осуществляется несколькими способами. Это может быть осаждение металла на основу в специальных ваннах в ходе химических процессов или вакуумное напыление. И, наконец, применяется металлопорошковая лента, по своим рабочим характеристикам близкая к ленте, используемой в форматах видеозаписи Video8 и Hi8. Производство магнитного порошка для магнитного слоя цифровой ленты требует довольно сложной технологии. Не вдаваясь в подробности, отметим, что очень важна его обработка для придания антикоррозионных свойств. Сложность состоит в том, что частицы металла размером менее микрона обладают высочайшей химической активностью, и поэтому необходимо принять меры по защите его от коррозии. Поэтому каждая частица металлокерамики покрыта защитной пленкой. В остальном производство магнитных металлопорошковых лент близко к классическому процессу: основу поливают суспензией магнитных частиц и связующего материала.

Существуют разные конструкции цифровых магнитофонов: с продольной многодорожечной записью с неподвижными головками, а также с наклонно-строчной записью, осуществляемой вращающимися головками. Однако есть общие принципы работы для всех цифровых магнитофонов независимо от их формата (рис. 87).

На входе любого цифрового магнитофона аналоговый сигнал преобразуется в цифровую форму. Затем выполняется уже рассмотренная пересканировка с целью повышения помехоустойчивости и далее — канальное кодирование. Цель канального кодирования —

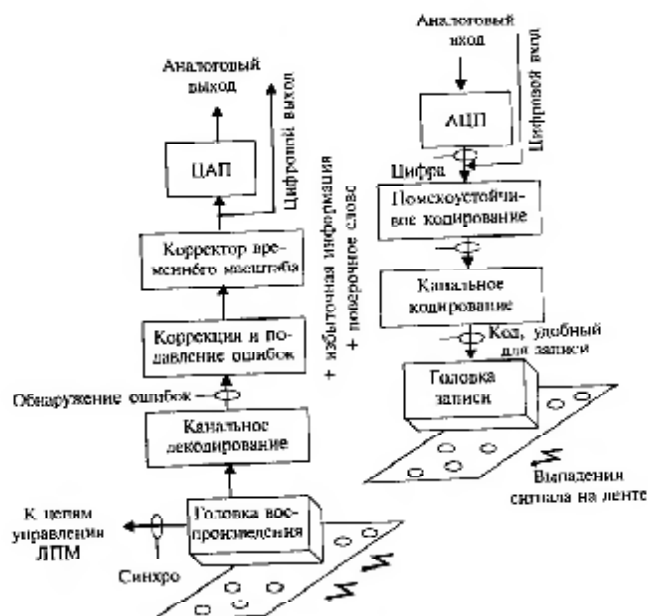


Рис. 87. Структурная схема цифрового магнитофона

приспособление информационного потока к конкретному каналу. С помощью канального кодирования, если это надо, информацию распараллеливают, разводя на несколько дорожек сигналотрамы. Разумеется, это связано с усложнением аппаратуры. Воспроизведение записанной в цифровом виде звуковой информации происходит в последовательности, обратной процессу записи.

Считанный головками воспроизведения кодированный сигнал подвергается канальному декодированию. Процесс восстановления цифровых сигналов сопровождается обнаружением ошибок и их корректировкой.

Известны два основных фактора, которые затрудняют решение проблемы записи и воспроизведения цифровых сигналов, — выпадения сигнала (Drop out) и колебания скорости магнитной ленты (детонация). При записи цифровых сигналов, которую отличает очень высокая плотность (1000 бит/мм), выпадения сказываются

паются куда заметнее, чем при аналоговой записи. Для записи одного бита требуется отрезок ленты около 1 микрона. Поэтому даже микроскопические дефекты рабочей поверхности магнитных головок или магнитной ленты, а также мгновенные нарушения контакта между головками и лентой могут вызвать потерю многих бит. В процессе эксплуатации ленты число царапин и участков с осыпавшимся порошком нарастает, что делает задачу о борьбе с выпадениями все более актуальной.

Упомянутое добавление избыточной информации и проверочных слов, с помощью которых ошибки обнаруживаются и подтверждаются коррекцией, частично решает проблему. Однако такие потери, как выпадения, полностью неустраняемы, но их влияние можно существенно снизить, используя цифровые методы. В случаях когда коррекция невозможна, ошибки подавляются (маскируются) путем интерполяции отсчетов (рис. 88).

В цифровых магнитофонах, кроме того, используются специальные схемы — *корректоры временных искажений* (их еще называют корректорами временного масштаба). Основа корректора — блок оперативной памяти, или *оперативное запоминающее устройство* (ОЗУ). Рассмотрим его более подробно.

В цифровой технике есть два устройства, роль которых надо признать ведущей: процессор — управляющее всей системой звено и оперативная память, функция которой не менее важна, так

как она поставляет процессору необходимую для его работы информацию. Отметим одну принципиальную особенность ОЗУ любых систем — возможность выборки любой находящейся в памяти информации в пределах одного такта работы машины. Именно на это и указывает слово «оперативная».

Считываемый сигнал проходит через ОЗУ корректора, которое выполняет функцию управляемой линии задержки. Объем ОЗУ достаточно велик, чтобы хранить звуковой сигнал в несколько миллисекунд и даже десятков миллисекунд. При обнаружении групповой ошибки, не поддающейся исправлению с помощью проверочных кодов, начинается про-

цесс сравнения информационного блока пораженного участка с предшествующими и последующими блоками. На основании этого сравнения принимается решение о характере текущих изменений сигнала и вероятных значениях кодовых слов испорченного участка. Затем процессор корректора вычеркивает пораженный участок, заменяя его на интерполированный.

Современные цифровые магнитофоны обладают высоким качеством, и параметры их совершенно достижимы для аналоговой аппаратуры. Однако схемы цифровых магнитофонов довольно сложны и требуют применения самой совершенной электроники. В настоящее время наибольшее распространение в студиях звукозаписи получили *кассетные цифровые магнитофоны в формате DAT* (от англ. *Digital Audio Tape*).

Запись на них производится вращающимися головками на ленте шириной 3,81 мм в кассете размером 73 × 54 × 10,5 мм. Записывающие и воспроизводящие головки расположены на диске, вращающемся с большой скоростью внутри цилиндрического барабана с пазом по всей его образующей.

Магнитная лента охватывает барабан по винтовой линии. Рабочие поверхности головок слегка выступают за пределы внешней цилиндрической поверхности барабана и входят в соприкосновение с лентой. При движении ленты и вращении диска головки прочерчивают на ленте наклонные линии — строчки (рис. 89). Поэтому такой способ записи называется *наклонно-строчным*. Так как вращение диска, на котором установлены головки, противоположно направлению движению ленты, относительная скорость записи весьма велика. Это делает возможным записать частоты, лежащие в диапазоне, совершенно недоступном для записи на обычных для аналоговых аудиоманитонов скоростях движения ленты.

Цифровые многоканальные магнитофоны, как, впрочем, и двухканальные стереофонические, по способу записи могут быть отнесены к двум видам: либо это магнитофоны с неподвижными головками и продольной многодорожечной записью, либо с вращающимися головками и наклонно-строчной записью.

Из многочисленных форматов для студийной профессиональной цифровой записи с неподвижными головками конку-

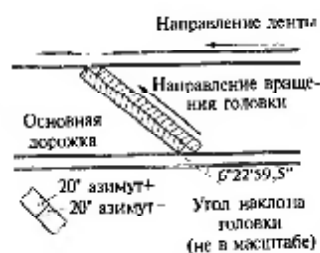


Рис. 89. Формат DAT

- Правильный отсчет
- Ошибка в отсчете из-за выпадения сигнала
- Корректированный отсчет после защиты от ошибок

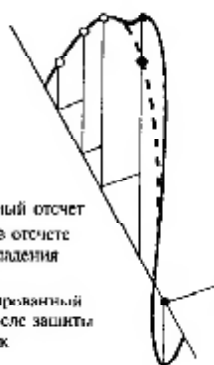


Рис. 88. Интерполяция отсчетов



рентоспособными оказались форматы семейства DASH (от англ. *Digital Audio Stationary Heads* — цифровая запись звука с неподвижными головками) и форматы семейства Prologi (от англ. *Professional digital* — профессиональный цифровой).

Однако разница между ними незначительна, а эксплуатационные характеристики у этих модификаций многодорожечных магнитофонов практически одинаковы.

Значительно более разнообразен ассортимент многодорожечных магнитофонов с вращающимися головками. Насчитываются десятки их модификаций. Но сегодня практически все фирмы-производители многодорожечников придерживаются одного из двух наиболее перспективных форматов: ADAT или DTRS.

Формат ADAT предложен фирмой *Alesis*. Он и расшифровывается как *Alesis Digital Audio Tape*. В нем для записи используются обычные кассеты для домашнего видео S-VHS с лентой шириной 1/2 дюйма. В этом формате цифровые многодорожечные магнитофоны выпускают несколько известных фирм: *Alesis*, *Fostex*, *Studer*, *Panasonic* и многие другие. Сравнительно низкая цена магнитофона, а также недорогой стандартный носитель стали залогом быстрого распространения магнитофонов ADAT во всем мире. Причем возможность синхронной работы нескольких многодорожечников позволила использовать ADAT в профессиональных аудиотрактах.

С форматом ADAT соперничает второй, не менее известный формат DTRS (*Digital Tape Recording System*). Его придерживаются фирмы *Tascam* и *Sony*. Магнитофоны формата DTRS рассчитаны на кассеты Video8 с лентой шириной 8 мм. Кстати, для магнитофонов формата DTRS фирма *Quantegy* выпускает и специально предназначенную для цифровой звукозаписи кассету DA8, рассчитанную на 30, 60 и 113 минут звучания.

Некоторые фирмы при комплектации многодорожечных систем используют модульный принцип. Они выпускают относительно недорогой базовый восьмидорожечный модуль. Потребитель сам решает, сколько ему нужно дорожек, и определяет, сколько потребуется модулей. Модули устанавливаются один на другой — так набирается система. Все конструктивы ориентированы на системы с большим числом каналов — до 128.

Достоинством цифровых магнитофонов считается стабильность их характеристик. У аналоговых магнитофонов по мере старения головок качественные показатели ухудшаются. Для поддержания параметров аналогового магнитофона в допустимых пределах приходится проводить периодическую профилактику, регулировку и подстройку. А вот качественные параметры цифрового магнитофона весьма стабильны.

И, наконец, об одном серьезном недостатке аналоговой записи, отсутствующем у цифровых аппаратов, — о накоплении помех и искажений при перезаписи. Каждая перезапись ухудшает характеристики аналоговой фонограммы примерно на 3 дБ. В цифровой записи от числа последовательно сделанных копий качество звучания не зависит и сохраняется тем же, каким оно было в оригинале. Повышение качества звучания фонограмм и стало основной целью создания цифровых магнитофонов.

Износ магнитной ленты и возникающие в процессе воспроизведения неравномерности ее контакта с головками сказываются и на аналоговых, и на цифровых магнитофонах. Однако в цифровой записи имеются широкие возможности коррекции в системах защиты от ошибок, что позволяет сохранять исходное качество звука. Но в тех случаях когда ошибки выходят за пределы доступной коррекции, качество сигнала ухудшается столь резко, что запись становится совершенно неприемлемой.

То же относится и к малейшим превышениям уровня сигнала над допустимыми пределами. Если при аналоговой записи случайные кратковременные перегрузки магнитной ленты, не превышающие 2–3 дБ, слушатель может и не заметить, то при записи цифровой возникают настолько явные искажения, что не заметить их невозможно. Именно из-за этого, звукорежиссеры при цифровых записях вынуждены более тщательно контролировать и поддерживать уровень записи с большей точностью, предусматривая по измерителю уровня запас на случайные перегрузки (*headroom*).

Преимуществом цифровой аппаратуры, в том числе магнитофонов, оказывается, как ни странно, довольно простое сервисное обслуживание. Диагностику неисправностей современная техника измерений превращает в автоматическую процедуру.

Кроме того, в цифровых магнитофонах очень мало узлов, которые требуют периодической регулировки, а при нормальной эксплуатации магнитофона она может вовсе не потребоваться.

До сегодняшнего дня, к сожалению, единого стандарта на параметры стыков аппаратов разных производителей цифровой аппаратуры не сложилось, и в конструкциях магнитофонов разных фирм предусматриваются разъемы для подключения внешних устройств с помощью интерфейсов разных форматов: AES/EBU, SDIF, SPDIF и пр. Это крайне неудобно, но с этим приходится считаться.

В настоящее время с цифровыми магнитофонами конкурируют устройства записи на жестких магнитных дисках и звуковые рабочие станции. Запись на дисковых носителях, о которых речь пойдет далее, имеет ряд преимуществ по сравнению с записью на ленте.

И все же, несмотря на это, есть звукорежиссеры, до сих пор предпочитающие ленточные аппараты.

### Запись на дисковые носители информации

Все носители информации можно разделить на два больших класса в зависимости от способа доступа к данным. Первый — *носители с последовательным, или линейным, доступом к данным* (*Sequential Access Media*, или *Linear Access Media*). В этих устройствах для того чтобы перейти от одного участка данных к другому, нужно перематывать все данные, лежащие между этими участками. Классический пример — лента на магнитофоне.

Второй класс — *устройства с произвольным доступом к данным* (*Random Access Media*, или *Non-Linear Access Media*, — носители с нелинейным доступом к данным). В этих носителях доступ к любому другому участку данных выполняется за счет перепозиционирования читающего элемента по кратчайшему пути. Классическим примером устройства произвольного доступа можно считать граммпластинку.

Еще совсем недавно вся технологическая цепочка звукозаписи и звукового вещания была целиком основана на использовании в качестве носителя записи магнитной ленты 6,3 мм. Появившиеся в последние годы станции цифрового монтажа и обработки звука и цифровые вещательные станции нарушили монополизм традиционных технологических методов звукозаписи, подготовки материала для вещания и процесса вещания. С момента внедрения компьютерной техники в звуковое производство на смену ленточным носителям пришли дисковые, носители с произвольным доступом к данным.

Диски, используемые в звуковой индустрии, можно разделить на три группы: *магнитные, оптические и магнитооптические*.

По сравнению с лентой дисковые носители предоставляют пользователю ряд полезных возможностей. Как уже было сказано, ленточный носитель — это последовательно организованная память, в которой нужный фрагмент можно найти, перематывая всю запись. Дисковая память позволяет это сделать быстрее и изящнее. Информация на диске записывается (в цифровой форме) не непрерывно, а порциями (блоками) в виде концентрических дорожек, а они в свою очередь состоят из секторов (блоков). Каждая порция информации, хранящаяся на диске, адресуется номером дорожки и номером сектора в дорожке. Здесь для поиска нужного фрагмента перемотка не нужна, а время доступа к нему состоит из

времени перепозиционирования головки, перемещающейся в радиальном направлении над поверхностью вращающегося диска, и ожидания того момента, когда необходимый участок вращающегося диска «подъедет» под головку. По сравнению с ленточными системами поиск практически мгновенен.

На этом основаны системы нелинейного монтажа (о них речь пойдет далее). Компьютеризация систем обработки видеозаписи и звука во многом связана с возможностями нелинейных систем, в основе которых лежит дисковая память.

### Жесткие магнитные диски

Это основные устройства памяти современных компьютеров. Важную роль они играют в цифровых рабочих звуковых станциях, а в последнее время на их базе конструируют компактные аппараты специально для записи и монтажа звука. Жесткий диск — это круглая металлическая пластина диаметром 3,5 дюйма из немагнитного материала (алюминия) с магнитным покрытием. Миниатюрные магнитные головки стирания, записи и считывания размещены на каретке, перемещающей их в радиальном направлении. Для того чтобы читать или записывать звук в реальном масштабе времени, скорость вращения диска должна быть очень велика. Проще всего выполнить это условие, если носитель информации и устройство для записи-чтения представляют собой единое целое. Такая совмещенная конструкция носит название *накопитель на жестком магнитном диске* (*Hard Disk* — хард-диск). У него есть еще одно, сохранившееся со времен первого жесткого диска название — *винчестер*. В основном это внутренние устройства цифровых систем. Но часто, когда требуется существенно расширить память, они используются и как внешние. Дисковые модули конструируются так, чтобы можно было простым наращиванием увеличивать объем памяти. Сейчас, особенно с подключением внешних блоков, общий объем памяти может достигать гигабайт, десятков и сотен гигабайт, терабайт. Если это соизмерять с объемами программного времени, то речь идет о часах и даже сутках накопленных звуковых программ (для справки: 1 гигабайт — это три часа монозвука).

### Оптическая система звукозаписи

Фотографическая запись, о которой мы уже упоминали, когда шла речь об аналоговой записи, — один из возможных вариантов оптической записи сигналов.

Она отличается только специфическими особенностями носителя. Но с появлением лазеров многие особенности электромаг-

нитных волн видимого диапазона получили новое применение. Излучение лазера можно сфокусировать в пятно, размеры которого менее микрона. Причем при переходе от красной части спектра к синей доступная плотность записи возрастает на порядок. По теоретической плотности записи оптическая превосходит все известное в сотни и тысячи раз. Причем речь идет о поверхностной записи. Особенность оптики в том, что она допускает объемную запись, где миллионное возрастание плотности — лишь начало. Уже разработаны и стандартизованы двухслойные оптические диски, предложены и вот-вот будут реализованы многослойные. Ведутся эксперименты по голографической записи, где 100 слоев — только ближайшая перспектива. Таким образом, оптическая запись информации сулит накопление колоссальных информационных массивов, относительно компактно упакованных.

Естественно, звукозапись мимо столь интересных возможностей не прошла. Широко известны изготовленные в заводских условиях, устойчивые к внешним воздействиям, удобные в обращении звуковые компакт-диски (CD). Если сравнивать компакт-диски с традиционной аналоговой грампластинкой, становится заметным множество их преимуществ. При стандартизованных для CD параметрах аналого-цифрового преобразования звукового сигнала (44,1 кГц — частота дискретизации и 16-разрядное квантование) это прежде всего — высокое качество звука. Поскольку считывание оптическое и без механических контактов, компакт-диски практически не изнашиваются. Если к тому же принять во внимание их малые размеры и то, что доступное время воспроизведения звуковых программ заметно превосходит возможности механических систем, неудивительно, что компакт-диски быстро завоевывают потребительский рынок, вытесняя с него обычные грампластинки.

Стартовав на рынке бытового воспроизведения звука, компакт-диски постепенно стали проникать в профессиональную звукозапись, потеснив традиционную магнитофонную. На первых порах их распространение сдерживало то, что, подобно грампластинкам, компакт-диски предлагали неизменяемую программу, тиражируемую с помощью пресса. Но появление дисков с возможностью вначале однократной, а затем и многократной записи существенно изменило ситуацию. Широкие возможности автоматизации процессов воспроизведения цифровых компакт-дисков благодаря использованию в них кодов управления и отображения информации, а также малому времени доступа к заданному фрагменту фонограммы стали если и дополнительными, но весьма весомыми аргументами профессионального применения лазерных дисков в звуковых студиях, фондовых записей, радиовещания и телевидения.

Остановимся более подробно на *лазере* — приборе, получившем широкое распространение в наши дни. Причем с каждым годом его роль и значение все более возрастают. Термин «лазер» — это аббревиатура английской фразы *Light Amplification Stimulated Emission of Radiations* (вынужденное излучение света с усилением). Что такое лазер, понять трудно, даже имея специальную подготовку. Но есть хорошая аналогия, позволяющая специалистам по звуку представить, что может скрываться «за вынужденным излучением».

Представьте симфонический оркестр в составе, превышающем численность живущих на Земле людей более чем в миллион миллиардов раз. При этом каждый исполнитель не считается с окружающими и играет, что захочет и как захочет. Какофония — слабое определение выступления подобного коллектива! Естественное свистовое излучение нагретых тел — результат столь же несогласованной деятельности недисциплинированных источников. Дирижер превращает совокупность исполнителей в оркестр. Оптический резонатор лазера стимулирует (заставляет шагать в ногу) все оптические осцилляторы. В итоге лазер отличается от обычных источников света, как регулярная армия от толпы!

Обычно лазер — источник монохромного излучения, или излучения с одной длиной волны. Причем это источник направленного излучения (по оптической терминологии, точечный). Излучение монохромного точечного источника можно сфокусировать в пятно, размер которого близок к дифракционному пределу — диаметр в половину длины волны, а это в оптическом диапазоне менее микрона. Отсюда и следуют уже упомянутые огромные плотности записи. Возможность фокусировки лазерного излучения имеет еще одно следствие, на которое мы в дальнейшем будем ссылаться. Мощность сфокусированного излучения лазера возрастает пропорционально отношению площадей зоны излучения и сфокусированного пятна. Поэтому не стоит удивляться температурам в миллионы градусов в фокальном пятне даже милливаттных лазеров.

Оптическая запись осуществляется с помощью лазера, а для ее воспроизведения используется луч миниатюрного полупроводникового лазера (поэтому компакт-диски часто называют лазерными пластинками).носителем записи является диск из специального прозрачного пластика стандартного диаметра 120 мм и толщиной 1,2 мм. Однако сейчас предложены и, вероятно, скоро найдут применение диски иных стандартов.

При записи фонограмм на компакт-дисках применяются специальные методы цифрового кодирования, которые позволяют минимизировать ухудшения сигнала в случае повреждения носителя.

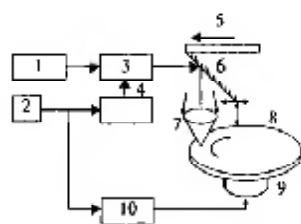


Рис. 90. Оптическая запись на компакт-диск:

1 — лазер; 2 — источник шифрованного звукового сигнала; 3 — модулятор света; 4 — устройство сопряжения; 5 — привод оптической системы (линзы); 6 — зеркало; 7 — подвижная линза; 8 — диск с рабочим элементом; 9 — привод диска; 10 — система автоматической регулировки

лазеры, в которых модулируемый сигналом ток протекает через лазерный диод. Это пример внутренней модуляции. В процессе испарения материала носителя формируются микроминиатюрные кратеры — углубления овальной формы шириной 0,6 мкм и глубиной около 0,1 мкм. (Для сравнения: диаметр человеческого волоса примерно 50 мкм.) Эти углубления называют *питами*. Условно пит в шифровом коде соответствует логической единице, его отсутствие — нулю. Питы расположены по спирали подобно звуковой дорожке на обычной грампластинке. Однако эта спираль начинается от внутреннего круга диска и раскручивается к краю, шаг между двумя соседними дорожками составляет около 1,6 мкм. В целом на компакт-диске умещается 41 250 дорожек.

Информация с компакт-диска считывается также с помощью лазера. Но мощность лазера при считывании может быть в сотни раз ниже используемой при записи (нет необходимости испарять материал!).

Считывающий лазер проигрывателя компакт-дисков освещает фонограмму снизу (рис. 91), и его луч отражается от нетронутой поверхности диска и рассеивается на углублениях (питах). Отраженный луч направляется на фотодиод, который воспринимает сигнал. В те моменты, когда луч рассеивается питом, сигнал пропадает. Полученная таким образом двойная информация, снимаемая с выхода

Луч лазера фокусируется с помощью специальной подвижной оптической системы в малое пятно на поверхности вращающегося диска (рис. 90). При кажущейся малой мощности излучения (порядка милливатт) сфокусированный луч в состоянии испарить легкоплавкий материал поверхности диска примерно за сотысячную долю секунды. Модулятор света преобразует непрерывное излучение в передаваемый с большой скоростью поток импульсов.

На рисунке модулятор показан как внешнее по отношению к лазеру устройство. В аппаратуре записи на компакт-диски используются полупроводниковые

фотолиды, соответствующим образом обрабатывается и преобразуется в звуковой сигнал. На поверхность компакт-диска наносится прозрачный слой, защищающий записанную информацию от возможных повреждений.

Между считывающим устройством и диском нет механического контакта. В этом важное преимущество оптических дисков, поскольку отсутствуют механические повреждения, характерные для магнитной записи из-за контакта между головкой и магнитным материалом.

Оптические головки записи — считывания содержат лазер, подвижную линзу и систему слежения за дорожкой. При вращении диска расстояние между оптической головкой и диском из-за вертикальных биений может меняться. Перемещения линзы необходимы, чтобы в любых условиях поддерживать точную фокусировку луча. Этими перемещениями управляет специальная система автофокусировки. Микрометрические размеры сфокусированного луча лазера и ширины дорожки ставят еще одну непростую задачу точного позиционирования светового пятна на дорожке. Это задача решается системой автоматического слежения за дорожкой. При изготовлении компакт-дисков их формируют — наносят специальный спиральный профиль. Дорожка записи располагается между соседними витками этого профиля. Дополнительный луч освещает профиль, при этом отраженный сигнал изменяется по уровню при смещении пятна в радиальном направлении. Изменения яркости следящего пятна и служат сигналом ошибки для системы слежения.

В процессах записи, считывания или поиска требуемого фрагмента фонограмм оптическая головка перемещается в радиальном направлении. Это обеспечивается сервоприводом. Положение внутренней дорожки, с которой начинается запись, отслеживается автоматически. При радиальном перемещении считывающего устройства ведется счет пройденных дорожек; считывающее устройство можно быстро установить на любую из 41 250 дорожек. Диаметр внутренней дорожки 50 мм, внешней — 116 мм. Таким образом, длина дорожки, приходящаяся на один оборот диска, непрерывно меняется. Это обстоятельство необходимо учитывать. Чтобы сохранить постоянной

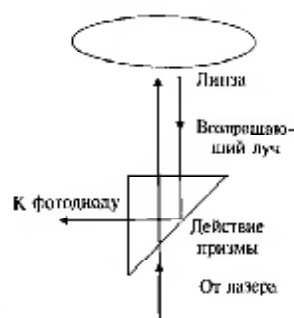


Рис. 91. Упрощенная схема считывания информации с компакт-диска

линейную скорость перемещения светового пятна вдоль дорожки, или продольную плотность записи, надо менять частоту вращения диска, снижая ее примерно с 500 об/мин на внутренней дорожке до 200 об/мин на внешней. Частота вращения определяется специальной схемой управления по тактовым импульсам, появляющимся при пересечении следящим световым пятном формирующего профиля. По этим импульсам определяется номер дорожки, с которой ведется считывание.

Следующая проблема — запись и воспроизведение стереофонической программы, т.е. двух каналов, левого и правого. На компакт-дисках применяется способ полерсенной записи информации от двух каналов на одну дорожку.

В связи с тем что плотность записи (количество знаков, несущих информацию, на единицу длины дорожки записи) в цифровых пластинках очень велика, даже самые незначительные дефекты рабочей поверхности диска или попавшие на нее пылинки могут привести к ошибкам считывания информации и к заметным искажениям воспроизведения. Поэтому для защиты от ошибок при записи компакт-дисков используется специальное корректирующее кодирование, дающее возможность обнаруживать и исправлять ошибки кода непосредственно в процессе воспроизведения. Даже крупные ошибки, вызванные, например, царапинами, повредившими до 2,5 мм дорожки на диске, с помощью такого кода автоматически восстанавливаются и не влияют на качество воспроизведения.

Звук на компакт-дисках записывается в виде последовательности цифровых данных. Но раз можно записать цифровой звук, то можно записать и любые цифровые данные. С точки зрения компьютерной технологии любой компакт-диск представляет собой массив информации, который можно читать, но нельзя записывать. На компьютерном языке это обозначается ROM (*read only memory* — память только для чтения). Поэтому для компьютера любой компакт-диск (в том числе и звуковой) представляет собой CD-ROM, т.е. память для чтения (но не для записи). Здесь мы видим один из примеров того, как звуковая технология пришла в компьютерную, а не наоборот.

Информация на оптическом компакт-диске может быть представлена в различных форматах: CD-DA, CD-ROM, CD-I.

Для домашнего проигрывания, да и для радиовещания чаще всего используются компакт-диски в формате CD-DA (*compact disk — digital audio*), или CD-Audio, что обозначает именно звуковой компакт-диск. В этих случаях для их воспроизведения используются CD-плееры (проигрыватели компакт-дисков). Они могут быть про-

фессиональные или бытовые, но все их различие состоит только в надежности. Качественные характеристики звука при воспроизведении определяются в основном компакт-диском, а не плеером.

В компьютерной технологии также существуют свои устройства для использования компакт-дисков — CD-ROM-приводов, и устанавливаются они непосредственно в системный блок персонального компьютера. Как правило, CD-ROM-привод имеет два режима работы. Во-первых, он может работать, как обычный CD-плеер, т.е. проигрывать звуковой компакт-диск. Для этого на корпусе у привода имеется аналоговый стереовыход на головные телефоны. Во-вторых, компьютер может считывать с компакт-диска цифровые данные. В этом режиме многие современные CD-ROM-приводы поддерживают 2-, 4-, 16-, а иногда даже и 52-кратную скорость вращения диска, что позволяет считывать данные во много раз быстрее. Например, для копирования звукового компакт-диска со стандартным звучанием 74 мин на жесткий магнитный диск тратят обычно около 5 мин.

При чтении (но не проигрывании) звукового компакт-диска с использованием CD-ROM-привода цифровой звук подается на звуковую карту компьютера и после цифро-аналогового преобразования поступает на выход в виде аналогового сигнала стандартного уровня. Такой путь сигнала позволяет выполнять функции обычного проигрывателя компакт-дисков.

После первичной оптической записи для тиражирования оригинала выполняется ряд технологических операций. Процесс изготовления партии компакт-дисков для потребителей довольно сложен, поэтому требует специального оборудования и проходит в заводских условиях.

**Записываемые компакт-диски (CD-R).** Наряду с промышленным способом тиражирования компакт-дисков применяется и аппаратура одноразовой оптической записи на цифровую пластинку — CD-Recorder (CD-R). Рекордер компакт-дисков использует для записи специальные записываемые диски CD-R (R означает *Recordable* — записываемый), которые выглядят, как и обычные компакт-диски, но отличаются тем, что покрыты специальным легкоплавким материалом. Если на этот слой направить луч мощного лазера, то на нем выжигаются углубления, идентичные тем, что нанесены на поверхности обычного компакт-диска. Метод записи основан на испарении материала, и этот процесс необратим. Потом с помощью того же лазера, но на пониженной мощности записанная информация может быть считана. Появилась возможность выпускать штучные или мелкосерийные звуко-

вые диски. Именно на компакт-дисках собираются музыкальные библиотеки, что довольно популярно в мире.

Системы CD-R сегодня незаменимы, когда речь идет о формировании архивов звуковых материалов, ведь в один компакт-диск умещается до 80 минут записи, доступ к воспроизведению любого фрагмента практически мгновенный, а срок хранения фонограмм, сделанных по этой технологии, по прогнозам специалистов, достигает 100 лет. На компакт-диске могут быть записаны типовые шумы, но главное их достоинство — возможность записи различных музыкальных фрагментов, которые могут быть использованы для заставок на телевидении и радиовещании, в рекламных роликах.

Современные рекордеры имеют небольшие размеры (как CD-ROM-привод), доступны по цене и, следовательно, получают все большее распространение. Как правило, они поддерживают большое количество форматов данных, в том числе и CD-Audio, т.е. могут записывать информацию в формате звукового компакт-диска. Такие диски воспроизводятся на любом CD-плеере.

В некоторых случаях прибегают к записям звуковой информации на дисках в форматах CD-ROM в виде компьютерных файлов. Правда, воспроизвести такие записи можно только с компьютера. Широко распространенный в радиостудиях CD-плеер в этом случае бесполезен.

Но, например, для создания профессиональных архивов аудиоматериалов Европейский радиовещательный союз (EBU) стандартизовал специальный формат хранения аудиоматериалов — BWF на базе компьютерных WAVE-файлов. Их архив хранится в специальных, имеющих большую память серверах, они обладают дополнительной защитой информации от возможных потерь в процессе хранения.

Любители записей, не предъявляющие слишком жестких требований к качеству звучания, для создания домашних фонотек, а также для обмена звукозаписями по Интернету часто используют компьютерный формат MP3 (MPEG Layer-3), в котором благодаря сжатию (компрессии) данных обычного размера (120 мм) на компакт-диск можно уместить десятки часов музыки.

Принцип сжатия данных основывается на адаптивном кодировании, позволяющем экономить место на диске за счет вычеркивания из цифрового потока избыточной информации, т.е. части наименее значимых с точки зрения человека деталей звучания. Например, учитываются такие особенности человеческого слуха, как эффект маскирования слабого сигнала одного диапазона частот более мощным сигналом соседнего диапазона, или воздей-

ствие предыдущего мощного сигнала, вызывающего временное понижение чувствительности уха к сигналу текущему. Принимается во внимание также неспособность большинства людей различать сигналы, лежащие по мощности ниже определенного уровня, свойственного различным частотным диапазонам. Степень сжатия, позволяющая уместить на диске большее количество звукового материала при минимальной потере качества, определяют не форматом, а самим пользователем в момент задания параметров кодирования. (При тестировании опытные эксперты, специализирующиеся на субъективной оценке качества звучания, не смогли различить звучание оригинального трека на CD и закодированного в MP3 с коэффициентом сжатия 6:1.)

Однако, по мнению специалистов, сжатый таким образом сигнал не поддается последующей обработке в цифровых процессорах (эквалайзерах, шумоподавителях и других подобных устройствах).

**Перезаписываемые компакт-диски (CD-RW).** Оптические диски с возможностью стирания информации и многократной перезаписи CD-RW (*Rewritable*) получили в наше время широкое распространение.

Перезаписываемые компакт-диски часто воспроизводят их название как диски с фазовыми переходами. Здесь не имеется в виду фазовая модуляция — речь идет о фазах агрегатного состояния вещества, фазах «кристаллическое — аморфное». Для ряда веществ при комнатных температурах устойчивыми и энергетически выгодными могут оказаться два состояния — кристаллическое и стеклоподобное (аморфное). Переход от одного состояния к другому возможен при нагревании до определенной критической температуры. В оптическом отношении два названных агрегатных состояния обычно различаются по коэффициенту отражения.

Используемый для рабочего покрытия перезаписываемого диска слой первоначально находится в неизвестном состоянии. Выполняется процесс стирания, который представляет собой определенное температурное воздействие на поверхность с помощью лазера. В результате поверхность переходит в кристаллическое состояние. После этого запись начинается с помощью лазера, в результате определенные участки поверхности переходят в аморфное состояние, кодируя тем самым записываемую информацию. Считывание выполняется, как с обычных компакт-дисков на пониженной мощности лазера. Луч лазера по-разному отражается от точек поверхности, находящихся в различных состояниях.

На рынке появился ряд дисков и устройств для записи — считывания информации по этой технологии. Но настоящим открытием

стал впервые предложенный фирмой *Panasonic* привод, который может работать как с дисками *CD-ROM*, так и с дисками *CD-RW*.

**Диски DVD.** Диски DVD — ближайшие «родственники и наследники» общеизвестных компакт-дисков *CD*. Они имеют такие же размеры, строгие, так же записываются, изготавливаются и воспроизводятся. Основное различие между ними состоит в том, что посредством DVD можно записать значительно больше информации и воспроизводить ее с существенно более высокой скоростью.

DVD — сокращение от *Digital Versatile Disk* (цифровой многопрофильный, многофункциональный диск).

Многопрофильными диски называют потому, что они находят широкое применение: в качестве носителей высококачественной записи кинофильмов со стереофоническим многоканальным звуком (это и было основной предпосылкой для их разработки) или носителей только звуковых записей — больших концертов, альбомов с необычными характеристиками звукопередачи, для записи компьютерных программ, баз и библиотек данных, а также различных мультимедийных комбинаций изображений, звуков и текстов.

Все диски, используемые для этих целей, внешне очень похожи, имеют один и те же диаметр, толщину, посадочное отверстие и во многих случаях могут воспроизводиться на одном и том же плесере (пронгравателе). Когда хотят подчеркнуть их различие или конкретное назначение, диски с записью кинофильмов называют DVD-Video, с записью только звука — DVD-Audio и с записью компьютерных программ — DVD-ROM.

Когда их называют DVD, обычно имеют в виду цифровые видеодиски с записью кинофильмов, а их наименование неточно трактуют как *Digital Video Disk* — цифровой видеодиск.

Все перечисленные DVD — это нестираемые носители с записью, изготовленные на предприятии. В этом отношении они подобны компакт-дискам *CD*.

**Особенности технологии изготовления дисков DVD.** Основное требование при разработке этого вида носителей было простым: не повышая стоимости изготовления диска, увеличить его информационную емкость за счет размещения как можно большего числа питов на такой же информационной поверхности, как у стандартных *CD*. Эта задача была решена с помощью полупроводникового лазера с меньшей длиной волны. Лазер системы DVD имеет длину волны 650 или 635 нм (в системе *CD* — 780 нм), что заметно уменьшает размер питов, а значит, и увеличивает их количество на дорожке. К тому же и шаг дорожки при этом заметно уменьша-

ется. Таким образом, удалось получить огромную емкость информационного слоя диска — 4,7 Гб, что почти в 7 раз больше емкости обычных компакт-дисков.

Для дальнейшего увеличения дисковой емкости были разработаны двухслойные и двусторонние DVD. Элементарный способ удвоения емкости диска — использование двусторонних дисков, которые состоят из двух базовых дисков толщиной по 0,6 мм, склеенных друг с другом обратными сторонами. Это позволило увеличить емкость DVD до 9,4 Гб. Для DVD была разработана также технология увеличения информационной емкости одной стороны диска путем нанесения на его поверхность двух рабочих слоев одного над другим. При этом нижний, т.е. первый по ходу луча лазера, информационный слой делается полупрозрачным, чтобы лазерный луч мог, пройдя через него, получить доступ ко второму (верхнему) слою.

Использование лазера с двойной фокусировкой дает возможность считывать данные с каждого слоя, не переворачивая диск. На таких двухслойных DVD можно разместить до 8,5 Гб данных, а если еще сделать их двусторонними, то получается компактное суперхранилище информации с емкостью 17 Гб!

Но кроме таких дисков с записью, полученной на предприятии-изготовителе, в семейство DVD входят *однократно записываемые* диски DVD-R и DVD+R. Внешне они мало отличаются от заводских, но на них запись может производить сам пользователь, если, разумеется, его компьютер оснащен соответствующим записывающим устройством. Однако принципиальное отличие однократно записываемых носителей состоит в использовании вместо «выштампованных» объемных питов пленки на основе органического красителя. В процессе записи мощность луча увеличивается до уровня, при котором структура красителя в данной точке на поверхности диска *необратимо изменяется*, получаемые при этом пятна становятся неотражающими и играют роль питов. Обсуждая модификации дисков DVD-R и DVD+R — однослойные, обладают емкостью 4,7 Гб, совместимы с большинством бытовых DVD-плееров и могут быть использованы для DVD-Video. Что же касается различия между дисками DVD-R и DVD+R, то она не принципиальна и к ней мы еще вернемся. Однако в любом случае эта технология записи, разумеется, не позволяет использовать диск повторно, для новых записей.

Для этой цели разработаны *перезаписываемые* диски DVD-RW, DVD+RW и DVD-RAM. Несмотря на то что существует три стандарта перезаписываемых DVD, различия между ними состоят не в концепции записи, а лишь в некоторых деталях ее реализации. В но-



сителях всех трех стандартов в качестве рабочего слоя используется сложный сплав, позволяющий применить хорошо отработанный еще на дисках CD-RW метод записи, основанный на изменении фазы агрегатного состояния вещества (кристаллическое — аморфное) под воздействием нагрева локальных точек поверхности диска лучом лазера до определенной температуры и различных режимов их остывания. Так же как и при воспроизведении CD-RW, аморфные и кристаллические области, имея разные коэффициенты отражения, дают возможность с помощью лазера меньшей мощности считывать записанную на дорожке информацию в виде цифрового кода.

Теперь о различиях между стандартами записываемых и перезаписываемых DVD. DVD-RAM распространены только в специфических областях: медицине, военной сфере. Основное достоинство этих дисков — хорошая защищенность от механических повреждений, так как они помещены в закрытые картриджи и допускают 100 тыс. перезаписей в отличие от 1000 циклов для DVD-RW и DVD+RW. С целью обеспечения совместимости с приводами DVD-ROM разработан тип картриджей, позволяющих извлекать из него диск.

Основная конкуренция на потребительском рынке развернулась между стандартами DVD-RW и DVD+RW. Как и в случае с DVD-R и DVD+R, между соперничающими стандартами перезаписываемых дисков нет радикальных различий. В их основе одни и те же решения, унаследованные от CD, поскольку они должны быть совместимы с одними и теми же устройствами воспроизведения.

Однако есть и отличия, которые касаются способов записи сервоинформации, используемой для позиционирования головки относительно оси дорожки и адресации блоков данных. Существует разница в оптических свойствах носителей, а также в структуре служебных областей дорожки (что влечет за собой трудности обеспечения полной совместимости с бытовыми плеерами и компьютерными приводами DVD-ROM). Но в настоящее время разработаны универсальные, многоформатные приводы, способные записывать и считывать информацию на оптических дисках всех популярных форматов: DVD-ROM, DVD+RW, DVD-RW, DVD+R, DVD-R, DVD-RAM, CD-ROM, CD-R, CD-RW.

Как уже было сказано, информационная емкость дисков DVD весьма велика. Однако цифровое видео, если его предварительно не обработать, настолько объемно, что полнометражный фильм, преобразованный в цифровой вид, займет чуть ли не 40 DVD дисков емкостью по 4,7 Гб.

Задача решается методом цифровой компрессии (сжатия) сигнала. Дело в том, что изображение имеет значительную избыточность, т.е. при его переводе в цифровой вид много одинаковых или похожих элементов, которые можно идентифицировать и удалить. Почти 97% цифровых данных, которыми представляется видеоизображение, можно удалить без снижения его качества. Для обеспечения высокого качества изображения при размещении видеопленки на однослойном DVD емкостью 4,7 Гб используется кодирование цифровых видеопленок с компрессией в формате MPEG-2. Этот формат разработан и стандартизован группой экспертов по движущимся изображениям и распространяется на широкий круг ТВ-систем, от соответствующих качеству VHS (*Video Home System*) до телевидения высокой четкости (ТВЧ).

Технология DVD позволяет получить не только превосходное видеоизображение, но и звук исключительно высокого качества. В частности, для озвучивания кинофильмов в DVD используется Surround Sound — многоканальный стереофонический звук с особой обработкой передаваемых сигналов и особым расположением каналовых громкоговорителей по системе 5.1. Этот способ звукопередачи характеризуется подчеркнуто сильным стереофоническим эффектом (см. гл. 3). В дисках DVD используются в качестве основных два цифровых формата surround-звука: MPEG-2-Audio или Dolby AC-3 (Dolby Digital).

В DVD записывают и воспроизводят оригинальный звук каждого канала раздельно. Причем все звуковые каналы в цифровом виде в этих системах записываются в общем потоке данных на одной дорожке с применением компрессии данных (см. описание звукового формата MP-3). В процессе воспроизведения он обрабатывается декодером, выделяющим и формирующим из общего потока данных сигналы каждого канала для всех шести громкоговорителей.

Но наряду с многоканальными форматами MPEG-2 Audio и Dolby AC-3 в DVD применяется и двухканальный формат с линейной ИКМ. Этот двухканальный звук воспроизводится или непосредственно через обычные стереосистемы, или посредством ProLogic-декодера преобразуется в 5.1-канальный surround-звук, т.е. воспроизводится так же, как стереозвук с кассет HiFi — видеомagneтофона VHS. В линейной ИКМ компрессия не применяется.

Аналого-цифровое преобразование звука происходит с квантованием (разрешающей способностью по уровню) 16, 20 или 24 бита на отсчет с частотой дискретизации 48 или 96 кГц. Такие характеристики обеспечивают очень высокое качество звука, но и обуславливают очень большие потоки аудиоинформации. Послед-

нее обстоятельство ограничивает возможность при линейной ИКМ реализовать все комбинации числа каналов, частоты дискретизации и разрешения. Поэтому такой формат не основной при озвучивании видеофильмов в DVD-Video.

А вот для DVD-Audio, т.е. для дисков, специально предназначенных для записи только звуковой информации, линейная ИКМ (LPCM) — единственный установленный стандартом формат кодирования. При частоте дискретизации 96 кГц и разрядности 20, не говоря уже о 24 битах на отсчет, достигается супервысокое качество воспроизведения 74 минут стереофонической музыки, значительно превосходящее звук с CD.

Пожалуй, единственный формат, способный составить конкуренцию DVD-Audio по качеству звука, — разработанный фирмой Sony формат Super Audio CD (SACD), в основе которого лежит технология одноканального сигма-дельта-кодирования с частотой дискретизации 2,8 МГц. Эта технология называется *Direct Stream Digital* (DSD), прямой поток цифр. (Об этом способе кодирования уже упоминалось ранее.)

Характеристики DSD: динамический диапазон 120 дБ, плюсовая частотная характеристика в диапазоне до 100 кГц, отсутствие потерь, характерных для ИКМ благодаря исключению из схемы сигма-дельта преобразователя фильтров, и в результате полная переносимость звуковоспроизведения на всех шести каналах многоканального сигнала.

Разработчики DSD стремились обеспечить как можно более полную совместимость своего нового стандарта со стандартом CD. На дисках SACD совмещаются два формата, для чего используется двухслойная структура. DSD-аудиоданные хранятся на слое высокой плотности, занимающем объем 4,7 Гб. Причем здесь используется схема компрессии без потерь *Direct Stream Transfer*, разработанная фирмой Philips и позволяющая хранить в формате DSD до 74 минут двухканального стереофонического звука или до 74 минут многоканального (до шести каналов) аудиоматериала одновременно.

Слой высокой плотности, эквивалентный слою DVD, отражает луч лазера с длиной волны 650 нм. При этом он прозрачен для луча лазера со стандартной для системы CD длиной волны 780 нм. Проходя слой высокой плотности, лазер CD считывает данные, расположенные на внутреннем слое диска, на котором содержится CD-версия (ИКМ, 16 бит, 44,1 кГц) того же материала, что и в версии DSD на слое высокой плотности. Версия CD может быть записана на диске отдельно или ее можно получить из DSD-данных путем понижения разрядности кода с помощью специального преобразования

(это легко сделать благодаря тому, что частота дискретизации DSD в точности 64-кратна используемой в CD). Таким образом достигается совместимость двух систем — старой и новой.

### Магнитооптическая запись

Много говорилось о преимуществах оптической записи, но большинство представителей этого семейства (кроме перезаписываемых дисков с фазовыми переходами: CD-RW и DVD-RW) трудно использовать в работе, требующей оперативности, например при подготовке программы радиовещания. Нужно было добиться того, что давно стало нормой для магнитной записи: многократно стирать старую информацию и перезаписывать новую.

Это стало возможным с изобретением магнитооптической записи. точнее *термомагнитной записи*, лазер при этом выступает нагревательным инструментом. Любой ферромагнитный материал имеет верхнюю температурную границу (так называемую точку Кюри), выше которой ферромагнитные свойства материала исчезают, но самое главное, что кривая магнитной восприимчивости вблизи точки Кюри резко стремится вверх и возрастает, если не бесконечно, то во многие тысячи раз. На этом и строится расчет в магнитооптической записи.

Магнитооптическая система записи проста: надо разогреть материал в некоторой точке до температуры, несколько превышающей точку Кюри, и воздействовать на него магнитным полем, настолько слабым, чтобы не оставить следа на холодных участках. При этом магнитное поле может быть рассредоточенным, не надо следить за размерами области его локализации. Как только температура разогретой области упадет ниже точки Кюри, ферромагнитный материал зафиксирует магнитное поле — и только в зоне нагрева. Применяемые ныне магнитооптические материалы ориентированы на температуры Кюри, превышающие 100°. Ниже возникает зона опасности повышения температуры при хранении записей до критической, когда возможно их разрушение. Более высокие температуры не годятся из-за естественного роста энергии, необходимой для разогрева. Поэтому для рабочих слоев магнитооптических дисков используют сплавы с элементами группы редких земель.

Магнитооптические системы записи строятся довольно primitивно. Сфокусированный луч лазера нагревает дисковый носитель, на который воздействует рассеянное магнитное поле, настолько слабое, чтобы произвести запись на холодных участках, однако достаточное, чтобы в первые моменты остывания записать информацию на разогретых лазером участках. Речь идет именно о

первых моментах, когда локализация теплового поля практически не отличается от размеров светового пятна.

**Особенности считывания информации.** Оно может быть только оптическим из-за слишком малых размеров информационного элемента. И в этом случае применяется луч лазера. Для считывания используют магнитооптический эффект Керра. Этот эффект заключается в том, что при взаимодействии луча лазера с намагниченным рабочим слоем диска происходит поворот плоскости поляризации луча, причем он зависит от направления вектора намагниченности среды, через которую луч проходит. Изменения плоскости поляризации луча преобразуются специальным устройством в изменения его интенсивности. Эти изменения и есть информация, считанная с диска.

Плотность записи на магнитооптические диски определяется размером сфокусированного светового пятна лазера. Это перспективный носитель с очень высокой плотностью записи, обеспечивающий высочайшее качество записи звука. Поэтому магнитооптические (МО) диски используются в профессиональной аппаратуре специально для записи оригиналов фонограмм, которые предназначаются для последующего тиражирования. Ведущие фирмы (например, Sony) предлагают, в частности, аппараты записи, работающие на магнитооптическом диске диаметром 133 мм (5,25 дюйма), емкость которого достигает около 1,3 Гб. Другими словами, на нем можно записать с высочайшим качеством 80 мин стереофонического звука с 20-битным квантованием или 100 мин с соответствующим качеством CD 16-битным.

Магнитооптические диски способны выдержать более миллиона перезаписей. Рассмотрим магнитооптическую запись на примере одного из самых распространенных представителей этого семейства — мини-диска.

**Мини-диск (MD)** — один из последних форматов в эволюции дисковых носителей звуковой информации, разработанный фирмой Sony. Мини-диски меньше обычных компакт-дисков по размерам (диаметр их всего 64 мм), но при этом они не уступают в качестве и продолжительности звучания записанной на них музыкальной программы. Это достигается за счет сжатия (уплотнения) данных, о стратегии которого речь пойдет далее. Маленький размер MD обеспечивает быстрый доступ к данным в любой точке диска — меньше чем за секунду.

Формат мини-дисков изначально предусматривал использование двух носителей: *незаписываемые диски типа CD* и *записываемые, магнитооптические диски*. Последние дают возможность производить на них повторные записи, стирая программы, записанные

ранее. Эта «реверсивность» мини-дисков делает их прямыми наследниками записей на магнитной ленте, незаменимыми при оперативной подготовке программ радиовещания и в других подобных случаях. Оба дисковых формата для защиты от механических повреждений помещены в картриджи. Общий вес такого пакета около 18 г.

Незаписываемый мини-диск очень похож на CD. Он записывается заранее обычным для CD оптическим методом (с помощью лазера), тиражируется в заводских условиях прессованием и предназначается только для воспроизведения. Так как запись в этом формате производится со сжатием данных, записи на этих мини-дисках несовместимы с обычными CD. Однако, во всяком случае у нас в стране, незаписываемые мини-диски не стали популярными.

Записываемый, или, точнее говоря, перезаписываемый, диск не является новшеством. Это магнитооптический носитель, применявшийся уже и ранее в компьютерной технике (CD-MO). Но магнитооптическая среда для мини-диска была усовершенствована, устройство записи стало намного проще, а сама запись требует меньшего потребления энергии.

Как уже упоминалось, существуют и другие методы записи на перезаписываемые (реверсивные) носители, но для мини-дисков выбран метод модуляции магнитного поля (MFM) как наиболее надежный и дающий возможность производить перезапись практически бесконечное количество (до 1 млн раз). Причем каждый раз при новой записи старые данные автоматически стираются.

Записываемый магнитооптический мини-диск формируется на подложке из поликарбоната, на котором между двумя слоями диэлектрика располагается магнитооптический (рабочий) слой. Поверх этой конструкции наносится отражающий алюминиевый слой, защитный слой и смазка из кремния — органического соединения, по которой должна будет скользить магнитная головка (рис. 92).

Магнитооптический слой мини-диска — это специальный сплав железа, тербия и кобальта (FeTbCo) с очень низкой коэрцитивностью — приблизительно 80 Эрстед (6,4 кА/м). Это важно, чтобы, несмотря на то что магнитная головка не касается непосредственно рабочей среды, величина намагничивающего поля оказалась достаточной и не потребовалось бы его увеличе-



Рис. 92. Сечение мини-диска:

1 — смазочный материал; 2 — защитный слой (10 мкм); 3 — отражающий слой (Al); 4 — слой диэлектрика (SiN); 5 — МО слой (FeTbCo); 6 — подложка поликарбоната (1,2 мм)



Рис. 93. Запись на мини-диск

дисках в качестве носителя записи сплава FeTbCo температура, соответствующая точке Кюри, равна примерно 185°C. Более высокие температуры не годятся из-за естественного роста энергии, необходимой для разогрева. Случайное, ошибочное стирание данных на мини-диске практически невозможно, так как для этого требуется одновременное воздействие определенной (выше точки Кюри) температуры и магнитного поля.

Итак, для записи на мини-диск магнитная головка позиционируется поверх лазерного источника (на одной с ним оси с противоположной стороны диска (рис. 93)).

Сфокусированный луч лазера нагревает локальную область дискового носителя, на которую воздействует рассеянное магнитное поле головки записи настолько слабое, чтобы произвести запись на холодных участках. Однако его достаточно, чтобы при вращении диска в первые моменты остывания разогретого участка записать на нем информацию в виде намагниченности определенной полярности «север» — N или «юг» — S.

Таким образом, разные полярности намагниченности предварительно нагретых пятен в магнитооптическом слое соответствуют цифровым логическим уровням 1 и 0. Размер такого пятна с записью, а следовательно, и плотность записи на магнитоэлектрических дисках определяется размером сфокусированного светового пятна лазера и продолжительностью цикла реверсирования модулирующего магнитного поля головки записи. Для этого была разработана специальная головка, которая допускает быстрое перемагничивание (приблизительно в течение 100 нс). Очевидно, что поверхностные слои диска не препятствуют мгновенному прогреванию рабочего слоя. Запись выполняется наложением

ния, которое неизбежно повлечет за собой большее выделение тепла и увеличение потребляемой мощности.

Как уже было сказано, для того чтобы записать информацию на магнитооптический слой, необходимо воздействовать на него не только магнитным полем головки записи, но и одновременно разогреть соответствующую точку носителя до температуры Кюри. Делается это с помощью луча лазера.

Для применяемого в мини-

ем новых записей на прежние с автоматическим уничтожением последних.

Как уже было сказано, существует два типа дисков, и для каждого применяется своя система считывания. Незаписываемый диск (MD-DA) подобен компакт-диску. Для его считывания используется тот же лазер, что и при записи, но на более низком энергетическом уровне. Отраженный лазерный луч изменяется по интенсивности в зависимости от информации, записанной в виде пиков (углублений) на поверхности диска. Процесс абсолютно аналогичен считыванию обыкновенных компакт-дисков.

Записываемый диск (MD-R) использует другую систему считывания, поскольку данные записаны не системой пиков, а сохранены в виде изменяющейся от точки к точке полярности намагниченности магнитного слоя (рис. 94). В этом случае считывание информации выполняется также лазером. Лазерный луч падает на дисковую поверхность, проходит через магнитный слой и затем отражается от него. Однако, проходя через магнитный слой, плоскость поляризации лазерного луча изменяется в зависимости от того, с какой полярностью этот слой в данной точке намагничен. Поворот вектора поляризации пучка света под влиянием магнитной среды, через которую он проходит, называется, как уже было сказано, эффектом Керра.

Существует два вида считывания мини-дисков:

- считывание незаписываемого диска типа CD, при котором выходной цифровой сигнал такой же, как в CD;
- считывание записываемого диска типа MO. Здесь выходной сигнал непрерывен, но с изменяющейся поляризацией.

Для считывания информации с дисков обоих типов используется один и тот же *двухфункциональный* лазер. Однако в оптическую головку системы добавляют (в сравнении с CD) еще один элемент — *поляризационный анализатор*, так называемую призму Уоллстона. Дело в том, что эффект Керра слаб. Поворот вектора поляризации, даже в самых благоприятных условиях, не превышает одного градуса. К тому же приемники света не реагируют на поляризацию. Задача призмы Уоллстона — преобразовать угол поляризации в интенсивность света.



Рис. 94. Считывание записываемого диска MD-R

Далее считанная информация поступает на блок датчиков и преобразуется в электрические ВЧ-сигналы. Такая система рассчитана на считывание информации как с дисков незаписываемых (MD-DA), так и с записываемых (MD-R).

Записываемый мини-диск до записи не заполнен, т.е. не содержит никакой информации. Однако если бы он не имел гребенчатой разметки, было бы невозможно производить правильное позиционирование луча лазера как при записи, так при считывании информации. Поэтому каждый MD-R аналогично CD-R имеет U-образную физическую канавку, или предканавку адресов, которая штампуется на диске при его производстве. Предканавка располагается за спиральной дорожкой данных и имеет специальную конфигурацию, она не стирается и, разумеется, на всех дисках совершенно одинакова. Без нее было бы невозможно осуществлять правильное позиционирование при считывании информации с диска. На основании считывания адресной информации со специальных датчиков после расшифровки сигнала определяется точный адрес каждой позиции на диске.

На незаписываемом диске расположение дорожек такое же, как на компакт-дисках: зона, содержащая оглавление диска, программная зона и оконечная зона. Что касается записываемых дисков, то у них кроме начальной есть еще зона, где пользователь записывает свои метки — начальные и конечные адреса музыкальных дорожек.

Таким образом, мини-диск предоставляет возможность изменять номера дорожек, делить дорожку на части и т.д. Например, если пользователь хочет разделить одну дорожку на две, в программной зоне музыкальные данные остаются нетронутыми, но адреса и оглавление будут изменены.

Ключевой момент технологии мини-дисков — использование для кодирования и декодирования звукового сигнала методов специального адаптивного преобразования, которое зависит от структуры входного сигнала и основывается на некоторых известных закономерностях психоакустики. Эта система называется ATRAC, и ее цель — сжать данные, уплотнить их, сохранив при этом естественность воспроизведения звука.

В стандарте обычной системы CD (16 бит, 44,1 кГц, два канала) поток данных, т.е. скорость передачи информации, составляет 1,41 Мбит/с. В процессе записи музыки на мини-диск аналоговые сигналы также подвергаются дискретизации с частотой 44,1 кГц и квантуются обычным АЦП, на выходе которого величина потока, как и для CD, также приблизительно равна 1,4 Мбит/с. Но для того чтобы разместить такое количество данных на диске много

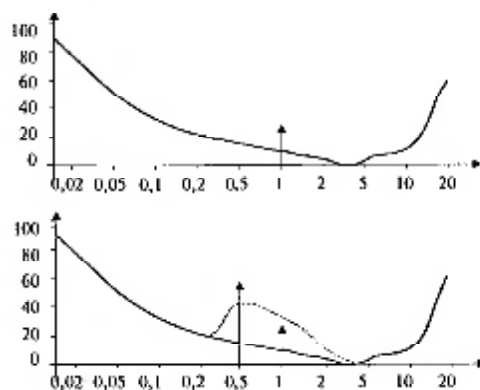


Рис. 95. Психоакустический эффект маскировки сигналов

меньшего размера, скорость передачи информации в битах должна быть уменьшена. Эту функцию и выполняет система сжатия ATRAC, сокращающая скорость передачи данных почти в четыре-пять раз: с 1,41 Мбит/с до приблизительно 292 Кбит/с. Это дает возможность уменьшить диаметр диска с 120 мм (CD) до 64 мм (мини-диск) при одинаковой (74 мин) длительности звучания в обоих случаях. Еще раз подчеркнем, что это уменьшение потока данных не должно влиять на качество передаваемой музыки. Ведь без потерь здесь не обойтись, поэтому программное обеспечение системы должно быть таким, чтобы это ухудшение звучания было незаметно на слух даже для самых искушенных слушателей.

Этого возможно достичь, если хорошо изучить и воспользоваться некоторыми законами психоакустики. Известно, например, что чувствительность человеческого слуха неодинакова на разных частотах звукового диапазона. Так, звук определенного уровня отчетливо воспринимается на одной частоте, но может оказаться вовсе не слышимым на другой, даже с более высоким уровнем (рис. 95).

Анализ музыкального сигнала, поступающего на вход записи, позволяет определить, какие части спектра лежат ниже этих порогов. Затем их можно удалить и тем самым уменьшить скорость передачи информации в битах. Однако чувствительность нашего слухового аппарата (ухо — кора головного мозга) в некоторых, так называемых критических диапазонах частот остается постоянной и не меняется. Методом субъективной экспертизы определены 25 таких

критических диапазонов. Но в ATRAC системе для большей точности передачи их используется около 52.

Известен и другой очень важный психоакустический эффект — *маскировка сигналов*. Если два источника звука звучат одновременно, но с разными уровнями, то более громкий звук будет маскировать более тихий. Например, если во время беседы двух человек в небе пролетает самолет, то на какое-то время беседу придется прекратить из-за полной маскировки голосов значительно превосходящим по громкости шумом мотора.

Кроме того, наблюдается действие так называемых *предмаскировки и постмаскировки*. Более громкий звук, появляющийся перед более тихим (в пределах 3 мс) или после него (в пределах 200 мс), маскирует этот тихий звук. Этот эффект также иллюстрирует рис. 95.

Анализируя некоторое количество входных выборок, на основе известных из психоакустики закономерностей можно определить, какие из компонентов входного сигнала из-за маскировки окажутся слышимыми и могут быть удалены с минимальной звуковой деградацией. Соображения, изложенные ранее, используются в системе ATRAC для уменьшения скорости входного потока с 1,41 Мбит/с до 292 Кбит/с. Вот как это происходит.

На основе разложения сигнала в гармонический ряд Фурье спектр входного сигнала анализируется для определения его частотных составляющих и их соответствующих уровней. Но анализ этот производится по блокам (в отдельных блоках — сегментах сигнала). (Как упоминалось ранее, число критических диапазонов частот определено экспериментально, но в ATRAC используется намного большее количество диапазонов, временные интервалы которых определяются адаптивно, в соответствии со структурой входного сигнала.)

Длительность каждого блока, который будет проанализирован, должна быть максимум 11,6 мс (или 512 выборок при частоте дискретизации 44,1 кГц). Причина, по которой временной интервал блока времени — частоты приходится каждый раз выбирать, объясняется также законами психоакустики. Дело в том, что при коротком, импульсном звуке мы можем заметить только большие скачки уровня. При плавной музыке, когда уровень звука меняется медленно, слух способен зарегистрировать очень тонкие громкостные нюансы. На основе оценки этих различий в ATRAC-системе и производится выбор как количества блоков, так и их оптимальной длительности. Когда выбор блоков сделан и в каждом из них проведен спектральный анализ, с учетом принципов психоакустики производится собственно преобразование потока данных. При этом

скорость передачи данных может быть уменьшена за счет удаления ненужной, избыточной информации.

Наконец, биты распределены. Каждый блок времени — частоты проанализирован. Его уровень определен. Полученные по алгоритму ATRAC сжатые цифровые данные уже не звуковые данные. Они лишь описывают динамический диапазон данного сигнального блока в длинах слов с переменным числом бит от 0 до 15, а также относительный уровень сигнала, представленный коэффициентом масштабирования. Прошедшие кодер ATRAC цифровые данные, как и при кодировании CD, обрабатываются схемами помехозащитного и канального кодирования.

При воспроизведении мини-дисков выполняются, как и в системе CD, демодуляция и декодирование, после чего полученные данные (длины слов, масштабные множители данного спектра) поступают в декодер ATRAC, где производятся обратные вычисления, в результате которых происходит восстановление первоначальных данных.

Поскольку данные на входе и выходе MD-устройства записи придерживаются стандарта 16 бит, 44,1 кГц, они могут быть непосредственно в цифровой форме скопированы из MD-устройства на CD-R и другие цифровые носители. Но стандарт MD включает специальную систему, которая допускает только первое копирование, запрещая второе. Другими словами, нельзя сделать копию с копии. Это делается для защиты записей от пиратского копирования.

Оченьное достоинство системы мини-дисков — повышенная устойчивость проигрывателей MD к вибрации и ударам. Это объясняется тем, что звуковые данные считываются с мини-диска намного быстрее (1,41 Мбит/с), чем это необходимо для ATRAC-декодера (292 Кбит/с). Поэтому считываемые данные сначала вводятся в предварительный буфер (оперативное запоминающее устройство), а оттуда поступают в ATRAC-декодер.

Буферное ОЗУ, помещенное между звукозаписывателем и декодером, сохраняет информацию длительностью 3 с звучания музыки в реальном масштабе времени. Когда оно заполнено, звукозаписыватель приостанавливает считывание данных до тех пор, пока буфер не будет вновь заполнен. Если из-за удара или тряски происходит сбой воспроизведения, звукозаписыватель имеет достаточно времени (до 3 с) для возврата на правильную дорожку воспроизведения. Когда же сбой дает звукозаписыватель, система обнаруживает неправильный адрес и возвращает его к правильной позиции. Иммунист к значительным толчкам, вибрациям и ударам в процессе воспроизведения информации особенно ценен в случа-

ях, когда проигрыватель MD эксплуатируется не в стационарных условиях.

Итак, MD-формат обеспечивает произвольный доступ, долговечность, мобильность, удобство в эксплуатации, защиту от ударов и возможность многократной перезаписи. Аналоговые цифровые ленты уступают MD как по долговечности, так и тем, что не имеют присущего дисковым носителям произвольного доступа. Этим и объясняется постепенное вытеснение привычных магнитофонов аппаратурой записи и воспроизведения мини-дисков везде, где быстрота и оперативность формирования звуковых программ определяют условия успешной работы.

### Звуковые рабочие станции

Первые звуковые рабочие станции появились в начале 1980-х годов. Ныне это, пожалуй, самый популярный вид звукового монтажного оборудования.

Рабочие станции изначально строились на базе персональных компьютеров, поэтому содержат мощный накопитель данных на жестких дисках. В последние годы появились и системы, работающие на магнитооптических дисках. Запись и обработка фонограмм, включая монтаж, с использованием вместо магнитофонов дискового пространства — принципиально важный момент, поскольку в чистом виде используется нелинейный монтаж.

Термин «нелинейный» не очень удачен. В действительности в процессах обработки данных и монтажа фонограмм с использованием дисков ничего нелинейного нет. Появился этот термин, скорее всего, как антитеза линейному монтажу, выполняемому на базе магнитофонов. Ленточный носитель линейен по сути, и каждый, кто провел даже немного времени в магнитофонной монтажной, знает, как много времени и усилий уходит на поиск нужных фрагментов, иными словами, на перемотку ленты. Монтаж с применением дисков вместо магнитофонов потому и назван нелинейным, что он совсем не такой, как линейный. Его главное достоинство — почти мгновенный доступ к любому фрагменту.

Звуковые рабочие станции выпускаются с разными параметрами. Входящий в их схему аналого-цифровой преобразователь может быть рассчитан на разные частоты дискретизации: 32; 44,1; 48; 96 или даже 192 кГц. Разрядность квантования также выбирается пользователем — она может варьироваться от 16 до 24 бит. Разной может быть и емкость (вместительность) накопителя на жестком диске. В современных цифровых звуковых станциях она достигает сотен гигабайт (к примеру, 1 Гбайт соответствует трем часам зву-

чения некомпьютеризированной монофонической записи). Естественно, в зависимости от уровня процессора и заложенных в станцию функций существенно меняется и стоимость аппарата.

Рабочие станции позволяют работать несколькими виртуальными дорожками. Виртуальными их называют потому, что на деле таких дорожек нет и они воспроизводятся на экране дисплея только для удобства пользователя. Более того, на экране монитора выстраиваются привычные (по линейному монтажу) органы управления. Иногда рабочая станция имеет выносной пульт, но многоточечный подобный пультам линейного монтажа.

Число виртуальных дорожек может быть 4, 8, 12, 16, 20, 24, т.е. соответственно ряду, кратному 4. Некоторые фирмы ориентируются на ряд с базовым числом 8: 8, 16, 32, 40, 48. Выпускаются и станции, позволяющие работать с 64 и даже 128 дорожками одновременно. Принцип кратности понятен, поскольку наращивание осуществляется простым расширением за счет установки типовых плат и дисков. Станции с базовым числом дорожек, конечно же, имеют наименьшую стоимость. Переход на более высокие уровни связан с удорожанием, однако цена растет далеко не пропорционально числу кратности.

Покупатель, ориентируясь на свои финансовые возможности и предполагаемую технологию использования, выбирает нужный ему вариант. При этом практически все производители гарантируют возможность в дальнейшем наращивать по просьбе покупателя состав станции.

Работа со станцией идет в режиме диалога «человек—машина», а основным средством общения служит экран монитора. На нем помимо звуковых дорожек воспроизводится меню и органы управления, причем только те, что необходимы для выполнения конкретных функций. Переключение на новые органы управления при переходе с одной функции на другую производится автоматически. Кроме того, в процессе монтажа можно использовать также мышь и выносной пульт. На экран можно вывести одну, произвольно выбранную дорожку, группу дорожек в любой комбинации, все дорожки, если компьютер и его дисплей рассчитаны на такой режим. Но самое важное, что на дорожках воспроизводятся изображения фонограмм и все ее эволюции в процессе обработки.

Все современные звуковые рабочие станции обеспечивают очень удобный режим *многослойной записи*. Это эффективный помощник, когда, например, надо выполнить несколько версий какого-либо фрагмента и быстро выбрать наиболее удачные решения или скомпоновать новую версию из частей уже сделанных. В этом режиме система позволяет записывать слой за слоем все версии на одну дорожку.



Естественно, любой слой можно прослушать и просмотреть, используя только одну клавишу, воспроизводимую на экране. Многослойный режим, в частности, избавляет оператора от перемещения между дорожками, изменения Параметров реверберации, выставления запрета на запись на дорожку, где уже хранится скомпонованный материал, и многого другого. Впрочем, перемещения и переносы фрагментов с дорожки на дорожку также просты в исполнении. Это можно сделать с помощью мыши или клавиш позиционирования так же, как при редактировании текста «перстаскиваются» слова, предложения, абзацы.

Поскольку все это одновременно воспроизводится, точно отбуксировать фрагмент в нужное место, тем более ориентируясь по меткам, — не проблема. Полная свобода перемещений позволяет избежать трудностей, присущих многодорожечной записи, монтажу и сведению фонограмм в линейном варианте. Рабочие станции обеспечивают все известные звуковые эффекты и не требуют внешних источников, что также немаловажно.

Примеры функций, которые сравнительно легко выполняются рабочими станциями, но трудноосуществимы и даже невозможны в линейных системах, многочисленны, но их перечисление займет слишком много места. Сказанного достаточно, чтобы судить о неограниченных возможностях звуковых рабочих станций.

**Редактирование звука.** Эта мучительная для линейных систем проблема с помощью нелинейного монтажа решается весьма изящно. Поскольку фонограмма воспроизводится и на ней отчетливо видны случайные импульсные выбросы, их можно стереть. Так же просто вычистить слово и даже неудачную фразу, а если надо, заменить их другими. Часто по разным причинам, в том числе и из-за подчисток, особенно когда речь идет о записи под видео, необходимо замедлить или ускорить темп речи и (или) музыки. Рабочие станции допускают, как правило, изменение темпа с сохранением тембра.

Самое удивительное, что все операции, рассмотренные ранее, не отражаются на материале, хранящемся на дисках. Смонтированная программа, если и существует, то виртуально. В памяти компьютера хранится только лист монтажных решений — набор «утвержденных» команд. При воспроизведении или перезаписи на магнитофон компьютер, ориентируясь на команды листа монтажных решений, выберет необходимые фрагменты и выстроит их нужном порядке. В линейных системах, если монтаж выполнен, внести в него правку уже невозможно: требуются перемонтаж и переноска всего материала, что чревато, особенно для аналоговых систем, потерей качества. Всего этого не надо делать в нели-

нейных системах. К смонтированной программе можно вернуться в любой момент, даже если она уже идет в эфир, и внести необходимые изменения. При этом можно сохранить исходный и новый монтажные листы. Это уникальная особенность, которую наиболее интенсивно используют в «новостных» аппаратах.

Звуковая рабочая станция — довольно компактный аппарат, заменяющий большие монтажные комплексы со всем окружающим оборудованием. Причем по стоимости они, как правило, заметно дешевле аналогичных по возможностям линейных монтажных аппаратов.

В настоящее время многие студии звукозаписи komponуют цифровые звуковые рабочие станции самостоятельно. Для этого приобретается обычный, по, разумеется, достаточно мощный компьютер, который дополняется звуковой картой, обеспечивающей преобразование аналоговых сигналов от внешних источников (включая микрофоны) в цифровую форму, и набором специализированных компьютерных программ для записи и обработки звуковой информации. Такое решение обходится дешевле, и оно имеет еще одно преимущество. Пользователь может самостоятельно устанавливать, менять, дополнять новыми и в процессе эксплуатации выбирать из установленных в машине нескольких программ ту, которая в данном конкретном случае, на данном звуковом материале дает наилучшие результаты.

## Основные принципы расчета акустики студий

Основная задача инженерного расчета акустической обработки студии заключается в подборе материалов с коэффициентами поглощения  $\alpha$ , различными на разных частотах звукового диапазона. Значения этих коэффициентов приводятся в справочниках. Комбинируя эти материалы в определенных пропорциях, получают нужную величину времени стандартной реверберации и ее оптимальную частотную характеристику.

Значения коэффициентов звукопоглощения  $\alpha$ , приводимые в справочниках для каждой частоты звукового диапазона, даются в сопоставлении с единицей звукопоглощения. За единицу звукопоглощения принимается поглощающая способность  $1 \text{ м}^2$  усложненного материала, имеющего  $\alpha = 1$  ( $\beta = 0$ ), т.е. полностью поглощающую падающую на его поверхность звуковую энергию. Прибегая к метафоре, эту единицу для подчеркивания ее физической сущности часто называют «единицей открытого окна». Таким образом, реальные величины коэффициентов звукопоглощения для разных частот в зависимости от поглощающих свойств материала покрытия поверхностей могут быть различными, но всегда они меньше единицы, но больше нуля.

В студиях, как правило, используют три типа звукопоглочителей (абсорбентов):

- пористые акустические плиты, коэффициент звукопоглощения  $\alpha$  которых имеет максимальное значение в области средних и высоких частот звукового диапазона;
- пористые перфорированные экраны, чаще всего представляющие собой слой эффективного звукопоглопителя (минеральной ваты, войлока из базальтового волокна и т.п.), обернутого тканью и закрытого снаружи перфорированным листом. В качестве этого покрытия используется фанера толщиной 4–5 мм, а также гипсовые или металлические листы. Частотная зависимость коэффициента  $\alpha$  этих конструкций имеет резонансный характер, причем в зависимости от размера перфорационных отверстий, расстояния между ними, толщины наполнителя и других факторов удается изменить положение максимума звукопоглощения на оси частот, что весьма удобно при акустической настройке студий;
- панели, резонирующие на низких частотах, например листы гладкой фанеры, сухой штукатурки, древесно-стружечные плиты. Коэффициент звукопоглощения  $\alpha$  этих конструкций максимален в области частот 100–300 Гц и смещается в сторону низких частот при увеличении воздушного промежутка между панелью и поверхностью стены. Большинство выполняемых из дерева или фанеры звукоотрабатывающих конструкций (полукоронны, пилообразные членения стен, потолка и т.п.) также обладают наибольшим звукопоглощающим действием в низкочастотной области диапазона слышимых частот.

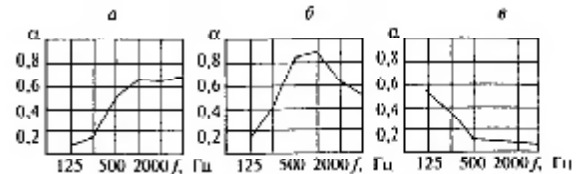


Рис. 1. Зависимость коэффициентов звукопоглощения от частоты: а — для пористых звукопоглощающих акустических плит; б — для перфорированных звукопоглощателей с наполнителем; в — для низкочастотных резонансных панелей

Звукопоглощающие конструкции с разными акустическими характеристиками различают по возможности равномерно по поверхности студии, что способствует повышению диффузности звукового поля.

**Звукоизоляция студий.** Акустическая пригодность любого помещения определяется уровнем шума, проникающего в него от оборудования или от внешних источников шума. Суммарный уровень шума, проникающего в помещение различными путями, не должен превышать нормы — около 20 фон.

Различают два вида проникающих внешних шумов: воздушный, передаваемый от источника по воздуху, и структурный (корпусной), передаваемый от источника по корпусу здания. Для защиты от воздушного шума инженерного оборудования на пути его распространения ставятся звукопоглощающие конструкции, например, облицовываются поглотителем воздуховоды камеры кондиционирования. Защитой от внешнего воздушного шума являются в первую очередь правильная планировка — удаление студии от шумных магистралей, увеличение толщины стен, т.е. улучшение звукоизоляции. Структурный шум, как внешний, так и внутри здания представляет более серьезную опасность для студии.

Основным способом, применяемым для улучшения звукоизоляции студии от вибраций здания и ударного шума, является использование раздельной конструкции собственно коробки студии от стен помещения. В такой конструкции коробка студии устанавливается на металлические ресоры и располагается внутри основного объема помещения (коробка в коробке). Между стенами обоих помещений оставляется зазор 10–20 см. Применение раздельной конструкции дает выигрыш по звукоизоляции от воздушного шума на 6 дБ, что равносильно увеличению веса стен почти в два раза. Выигрыш по виброизоляции еще больше. Тщательное выполнение конструктивных и планировочных мероприятий обычно обеспечивает достаточную помехозащищенность студии.

## Стереофоническая запись спектаклей

Как уже было сказано, преимущества стереофонии проявляются особенно ярко при записях спектаклей. Стереофония расширяет возможности передачи сценического действия благодаря передаче распределения отдельных элементов звуковой картины в пространстве, т.е. локализации отдельных источников звука. Голоса актеров приходят к слушателю как бы из разных точек сцены, что делает тексты более разборчивыми и усиливает ощущение объемности звуковой картины. Создается впечатление присутствия слушателя в театральном зале. Этот эффект, в сущности, недоступен одноканальной монофонической передаче, так как при прослушивании всех голосов актеров, исходящих из одной точки — громкоговорителя, без возможности различить эти звуки по направлениям их прихода к слушателю взаимная маскировка одновременно звучащих источников во много раз усиливается. А стереофония в известных пределах дает возможность эти трудности избежать. Это одно из важнейших ее достоинств.

Существенным преимуществом стереофонии является также возможность передавать голоса актеров из разных точек пространства, в движении, в соответствии с их истинным расположением на сцене, а также более точно имитировать атмосферу зрительного зала. Иногда при стереофонической записи можно на разных участках базы одновременно отображать акустику различных помещений и имитировать переход актера из одного помещения в другое. Правда, при этом не следует увлекаться и этих направлений не должно быть более трех, максимум пять: лево, полуслево, середина, полуправо и право. Большее число перемен затруднит слушателю возможность их различения.

Иногда по ходу спектакля необходимо одновременно передать два действия или более (двойной диалог и т.п.). Это можно сделать только при стереофонической передаче. Ведь одно из ограничений монофонической литературно-драматической передачи, как известно, состоит в том, что участвовать в действии, т.е. говорить, в данный момент может только один исполнитель или соответственно передавать можно одно какое-либо действие с присущими ему шумами. В противном случае взаимная маскировка резко ухудшает разборчивость передаваемой речи.

Стереофоническая локализация источников позволяет слушателю заострить свое внимание на определенном звуке (как это происходит при слушании в естественных условиях); при этом звуки из других направлений мешающего действия не оказывают. Это означает, что в принципе возможно передавать одновременно речь нескольких действующих лиц, а выбор персонажа для сосредоточения своего внимания предоставляется сделать самому слушателю.

Для облегчения этой задачи и более четкой различимости отдельных голосов и сопутствующих им шумов при записи литературно-драматических передач звукоинженеры прибегают к созданию многоплановости звучания спектакля, варьируют звуковые планы (ближний, средний, дальний) и добиваются этим дополнительного выигрыша в прозрачности зву-

чения. Делается это за счет правильного выбора места микрофонов у исполнителей.

## Передача движения актеров по сцене

Благодаря тому что при стереофонической передаче создается как бы второе измерение, становится возможным передавать и отображать при воспроизведении передвижения источников звука. Нормальные пределы, в которых такие перемещения воспринимаются слушателем, определяются расстоянием между двумя стереофоническими громкоговорителями, так называемой базой звуковой картины.

Проще всего для этого воспользоваться обычным микрофоном, а эффект передвижения исполнителя по сцене получить с помощью панорамного регулятора.

Но в отдельных случаях, располагая микрофоны по определенной системе (например, по системе MS) или используя вспомогательные технические средства обработки звуковых сигналов в пульте звукоинженера, ширину стереофонической звуковой картины можно искусственно сделать даже больше базы, вывести часть кажущихся источников за пределы динамиков, т.е. образовать «сверхбазу».

Эффект передвижения источников звука на слух можно получить многими способами, которые дают похожие результаты. Выбор способа зависит не только от желаемого эффекта, но и в значительной мере от самой студии, ее геометрических и акустических особенностей, а при телевизионной съемке — и от выстроенных режиссером передачи мизансцен. Но при любом способе приема звука микрофонами, для того чтобы добиться эффекта передвижения, необходимо соблюдать ряд общих условий. Прежде всего, передвижения говорящих исполнителей обязательно должны сопровождаться характерными шумами (например, звуками шагов), так как «блуждающие» голоса звучат неправдоподобно и вызывают иронию у слушателей. Причем это в равной мере относится как к передаче приближения или удаления актера в глубь сцены, так и при перемещении его по ширине звуковой картины, вдоль сцены.

Кроме того, эффект передвижения исполнителя по сценической площадке должен быть согласован с видеорядом и быть плавным. Ощущение «прыгающих» звуков мешает целостному восприятию сцены. Зачастую, однако, передать в звуке плавные переходы исполнителей по сцене оказывается не простым делом, поскольку «масштаб отображения» звуковой картины различен и зависит от системы расстановки микрофонов. Очень часто, например при движении исполнителя в середине сцены, звук кажется перемещающимся чрезмерно быстро, и поэтому возникает эффект «перескакивания» звукового образа.

Эффект перемещения на большие расстояния можно получить, добавив, например, к смещению по ширине (ограниченному расстоянием между громкоговорителями) еще и смещение по глубине звуковой картины, за счет изменения звуковых планов. Иногда при этом может потребоваться использование области сверхбазы. Однако надо соблюдать неко-

тельную осторожность, так как этот прием может привести к потере локализации и несовместимости передачи.

Используя совмещенные стереофонические микрофоны, установленные, например, по системе XY, можно получить перемещение кажущегося источника звука на довольно большие расстояния. Но для этого необходимо, чтобы микрофоны были удалены от источника немного дальше, чем обычно. А это неизбежно увеличивает акустическое отношение, звуковые планы становятся излишне далекими, и субъективно возникает ощущение очень большого помещения. По этой причине студии для литературно-драматических записей делают более заглушенными, чем музыкальные. А иногда приходится даже переносить запись некоторых сцен в заглушенные помещения или часть студии.

И еще одно обстоятельство необходимо учитывать, если при записи перемещения актеров используется стереофонический микрофон. Для того чтобы получить впечатление линейного перемещения по базе на равном удалении от слушателя, источник звука в студии следует перемещать по полуокружности относительно точки установки микрофона. В противном случае естественное линейное перемещение источника в студии при воспроизведении громкоговорителями будет выглядеть дугообразным с сильным приближением к слушателю подчеркнутой серединой. Зато преимущество стереофонического микрофона по сравнению с регулируемым по направлению мономикрофоном состоит в том, что он создает единое пространственное впечатление, не зависящее от того, где исполнитель, по ощущению слушателя, располагается на базе.

При близком расположении стереофонического микрофона от исполнителей приходится очень строго соблюдать правильное соотношение удаления микрофона и угла падения падающей на него звуковой волны. Даже самые незначительные неточности в установке и ориентации микрофона приводят к очень большим изменениям кажущегося направления на источник при воспроизведении. Поэтому диалог между близко стоящими друг к другу исполнителями передать с помощью одного совмещенного микрофона очень трудно. Можно, конечно, уменьшить угол между осями максимальной чувствительности микрофонов стереопары и таким образом сузить базу звуковой картины. Но при этом уменьшается стереоэффект и теряется преимущество стереофонического микрофона перед регулируемым по направлению мономикрофоном.

Очень часто для передачи оригинальных сцен используются также несколько размещенных в пространстве монофонических микрофонов. При этом, чтобы исключить так называемый эффект «провала» середины, возникающий при работе всего одной пары микрофонов, для передачи сцен с базой более 1 м обычно используют три кардиоидных микрофона, передающих соответственно сигналы левой, средней и правой частей звуковой картины. Для этого левый (относительно расположения звукорежиссера) микрофон коммутируется в левый канал, правый — в правый, а центральный подключается одновременно и к левому и к правому каналам. Никаких дополнительных регулировок по направлению в этом случае не требуется. Но особенно важно, чтобы микрофоны были одинаковыми по своим характеристикам и сбалансированными между собой. Только

при этом условии не возникнут искажения тембральной окраски и будет обеспечена совместимость.

А в случаях когда пространственные соотношения звуковой картины достаточно сложны, желательно, чтобы отдельные сцены и сопровождающие их шумы были распределены по разным участкам стереофонической базы, целесообразно использовать несколько размещенных микрофонов, сигналы с которых при помощи панорамных регуляторов располагаются на базе в соответствии с желанием звукорежиссера.

Преимущество этого способа состоит в том, что он позволяет размещать каждый микрофон в оптимальном для него месте и каждый из них регулировать непосредственно по ходу передачи. Эффект перемещения актеров получается довольно убедительным и плавным. Надо только стремиться к тому, чтобы акустические переходные проникновения между двумя не непосредственно соседствующими микрофонами были бы не очень большими. Иначе это может привести к ошибкам локализации, а также к кажущимся скачкообразным передвижениям источников звука по базе. Кроме того, паразитные проникновения могут привести к взаимной компенсации (провалу) некоторых элементов звучания при прослушивании программы в моноварианте, из-за чего передача окажется несовместимой.

### *Шумы в литературно-драматических передачах*

Шумы играют в оформлении литературно-драматических передач очень важную роль. Прежде всего к ним относятся *функциональные шумы*, т.е. те, которые сопровождают то или иное конкретное действие актера (звук шагов, хлопанье дверью и т.п.). При стереофонической передаче эти шумы следует локализовать в определенных точках базы, что повышает их драматургическую функцию по сравнению с монофонической звукопередачей. Другими словами, такие шумы практически равноправны с речью действующих лиц. Они делают сцену более зримой, более убедительной.

Другой вид шумов — *фоновые, декоративные, пространственные*, создающие общую атмосферу, в которой происходит действие спектакля. Это может быть шум моря, стадиона, поля боевых действий, наконец, атмодиспансы зрительного зала и т.п., т.е. шумы, создающие равномерно распределенный по базе шумовой «ковер», исключающий возможность его локализации в определенном направлении. Задача подмешивания не локализуемого шума к основному действию спектакля — создать эффект присутствия, т.е. добиться возникновения у слушателя ощущения соучастия в действиях, происходящих по ходу спектакля.

Изданные на компакт-дисках и имеющиеся в широкой продаже «библиотеки» шумов содержат большой ассортимент шумов самого разного содержания: от звона кухонной посуды до рычания диких зверей, от плача младенцев до оружейной канонады. Единственный недостаток многих этих шумовых наборов заключается в том, что большинство запи-

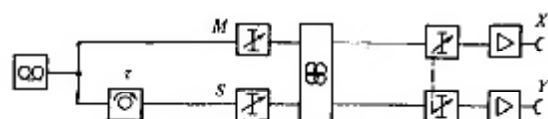


Рис. 2. Структурная схема обработки монофонической записи шума для получения псевдостереофонического впечатления

сеи (в том числе фоновых и пространственных шумов) сделаны монофоническим способом и не всегда пригодны для использования в стереофонических спектаклях. В этих случаях приходится прибегать к специальным методам получения из монофонических записей шума псевдостереофонических.

Один из способов преобразования монофонического шума в равномерно распределенный по всей стереофонической базе пространственный, псевдостереофонический шум — использование временной задержки, включенной по схеме, изображенной на рис. 2.

Здесь монофонический сигнал разделяется на два канала, в один из которых последовательно включается небольшая временная задержка. В зависимости от структуры шума задержка может иметь длительность от 3 до 50 мс. При постоянной и не зависящей от частоты времени задержки фазовые соотношения прямого и задержанного сигналов в зависимости от частоты все время изменяются.

Различающиеся по меновым фазам сигналы, прямой и задержанный, можно рассматривать как два сигнала, составляющих стереофоническую пару системы MS, и обрабатывать их по этой системе. После индивидуальных регуляторов уровни сигналы M и S подвергаются суммарно-разностному преобразованию для получения на выходе схемы сигналов X (левого) и Y (правого). Эти выходные сигналы квазистатистические, т.е. для каждой дискретной частоты спектра изображение направленности постоянно меняется. Шум делается пространственным и нелокализуемым. В то же время схема разрешает, регулируя задержанный сигнал S, произвольно варьировать кажущейся шириной воспроизводимого шума на базе, например изобразить шум дождя за открытым окном, не делая его в то же время точечным.

## Оглавление

Введение .....	3
Глава 1. Основы акустики .....	5
§ 1. Физическая природа звука .....	5
§ 2. Звуковой диапазон частот .....	7
§ 3. Динамический диапазон слуха .....	9
§ 4. Реальный звук. Спектры звуковых колебаний и тембр .....	17
§ 5. Пространственное восприятие звуков .....	20
§ 6. Звук в закрытом помещении .....	21
§ 7. Акустическая обработка студий и требования к их параметрам .....	27
Глава 2. Качественные параметры канала звукопередачи .....	29
§ 1. Уровень передачи звукового сигнала .....	30
§ 2. Амплитудно-частотная характеристика .....	33
§ 3. Нелинейные искажения .....	36
§ 4. Помехи в тракте звукопередачи .....	39
§ 5. Динамический диапазон передачи .....	43
Глава 3. Оборудование звуковых студий .....	45
§ 1. Микрофоны .....	45
§ 2. Стерефония .....	62
§ 3. Обработка и контроль звукового сигнала .....	78
§ 4. Контрольно-измерительные приборы .....	90
Глава 4. Запись звуковой информации .....	110
§ 1. Механическая и фотографическая системы звукозаписи .....	110
§ 2. Магнитная запись звука .....	114
§ 3. Многодорожечная запись .....	147
§ 4. Цифровая звукозапись и обработка сигнала .....	152
§ 5. Цифровая звукозапись на различные носители информации .....	164
Приложение 1. Основные принципы расчета акустики студий .....	198
Приложение 2. Стереофоническая запись спектаклей .....	200