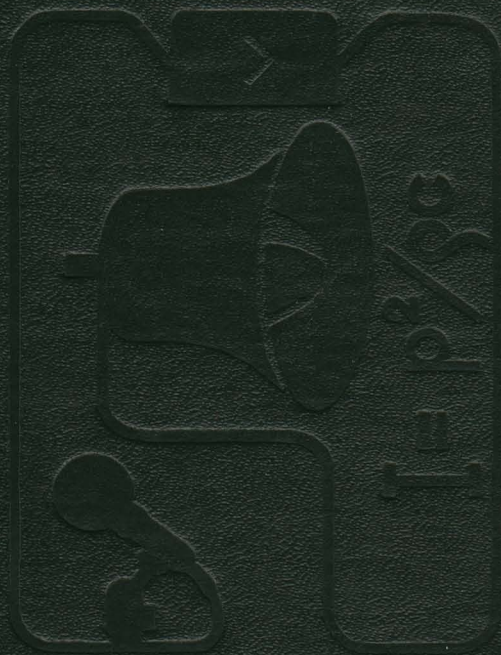


*В. К. Иофе
В. Г. Корольков
М. А. Сагожков*



СПРАВОЧНИК ПО АКУСТИКЕ

*В. К. Иофе
В. Г. Корольков
М. А. Сапожков*

СПРАВОЧНИК ПО АКУСТИКЕ

Под общей редакцией
М. А. Сапожкова



МОСКВА «СВЯЗЬ» 1979

22.32.я2
И75
УДК 534(03)

Иофе В. К. и др.

И75 Справочник по акустике/Иофе В. К., Корольков
В. Г., Сапожков М. А./Под ред. М. А. Сапожкова. —
М.: Связь, 1979. — 312 с.

В пер.: 1 р. 70 к.

«Справочник по акустике» содержит основные сведения и материалы по звуковым колебаниям, восприятию звука, акустическим сигналам и их обработке, электроакустической аппаратуре, звукоусилению и озвучению, записи и воспроизведению звука, акустике помещений, включая радио- и телестудии, акустическим измерениям, звукопоглощающим и звукоизоляционным материалам и конструкциям. Приведены формулы, графики, таблицы и примеры расчета.

Справочник рассчитан на инженеров и техников, работающих по эксплуатации и проектированию средств связи и вещания, а также радиообслуживанию. Он будет полезен студентам вузов и техникумов связи и специалистам смежных профессий.

И $\frac{30403-041}{045(01)-79}$ 37-79

2402030000

ББК 22.32.я2
6Ф2.7

ПРЕДИСЛОВИЕ

В настоящее время есть только один справочник по акустике, охватывающий большинство вопросов акустики, с которыми сталкивается связист. Это — выпущенный Госэнергоиздатом в 1954 г. справочник под названием «Расчетные графики и таблицы по электроакустике» под авторством В. К. Иофе и А. А. Янпольского. К сожалению, он уже становится редкостью даже для фундаментальных библиотек. Основным назначением этого справочника было обеспечение разработчиков электроакустической аппаратуры необходимыми сведениями из электроакустики, поэтому в нем нет ряда материалов и сведений, необходимых для эксплуатационника и проектировщика систем связи и вещания. Кроме того, ряд его материалов требует уточнения, так как прошло свыше 20 лет с момента его выхода. Эти причины побудили к составлению нового справочника по акустике для связистов, работающих в сфере эксплуатации и проектирования систем связи и вещания.

Главная цель справочника по акустике — дать основные материалы из области технической акустики для инженеров и техников, работающих в системе связи, звуковом вещании, телевидении, звукозаписи и воспроизведения, массовом радиообслуживании и т. п., т. е. работающих в эксплуатационных, проектных и научно-исследовательских организациях и учреждениях, а также на заводах, выпускающих эту аппаратуру. Справочник должен помогать студентам при курсовом и дипломном проектировании. Поэтому справочник содержит не только таблицы и графики с методикой расчета и их примерами, но в нем даны и теоретические основы наиболее важных вопросов. Чтобы не перегружать справочник, пришлось дать ссылки на литературу, в которой изложены и теоретические основы и даны более подробные справочные данные, чем в нашем справочнике, если их объем выходил за рамки, определенные нами при разработке структуры справочника. В перечне литературы приведен ряд ГОСТ, некоторые из них уже пересмотрены или пересматриваются и будут введены в действие в ближайшее время.

Разделы 1—4 (кроме § 4.6), 7—9, 11 и 12 написаны М. А. Сапожковым, разд. 5, 6 и § 4.6 — В. К. Иофе, разд. 10 — В. Г. Корольковым.

Авторы выражают признательность д-ру техн. наук А. А. Пирогову за ценные замечания при просмотре рукописи и канд. техн. наук Г. С. Гензелю за советы по написанию первого раздела, а также выражают благодарность за представленные материалы д-ру техн. наук Н. Б. Покровскому и инж. Н. Б. Айзенберг, за помощь в оформлении рукописи инж. В. И. Шорову, О. И. Ивановой и Н. И. Грилихес.

Все пожелания следует направлять по адресу: 101000 Москва, Чистопрудный бульвар, 2, издательство «Связь».

Авторы

Список обозначений

A	— общее звукопоглощение
A_{нр}	— общая звукопроводность
A_ф	— форматная разборчивость
I	— интенсивность звука
I₀	— интенсивность на нулевом уровне ($I_0=10^{-12}$ Вт/м ²)
I₁	— интенсивность на расстоянии 1 м от центра источника звука
K_{св}	— коэффициент электромеханической связи
L_I	— уровень интенсивности
L_p	— уровень звукового давления
L_ε	— уровень плотности энергии
L_a	— уровень громкости
P_a	— акустическая мощность
P_э	— электрическая мощность
U	— электрическое напряжение
Z	— модуль сопротивления
z_A	— удельное акустическое сопротивление
c	— скорость звука
f	— частота колебаний
p	— звуковое давление
p₀	— звуковое давление на нулевом уровне ($p_0=2\cdot 10^{-5}$ Па)
p₁	— звуковое давление на расстоянии 1 м от центра источника звука
t	— время
v	— скорость колебаний
e	— плотность энергии
ω	— круговая частота
η	— КПД
λ	— длина волны
ρ	— плотность среды или материала
ρ_c	— акустическое сопротивление плоской волны
Δf	— полоса частот

ВВЕДЕНИЕ

В трактах радио- и проводной телефонной связи, вещания, звукового сопровождения телевидения, звукозаписи и воспроизведения, звукоусиления, озвучения, системы перевода речей, массового радиообслуживания, диспетчерской связи и т. п.¹ начальные и конечные звенья тракта являются акустическими. Тракт начинается от источника колебаний (голос человека, музыкальные инструменты, различного рода источники шумов), затем идет звено тракта в виде воздушной среды помещения или открытого пространства. Начальная часть тракта заканчивается преобразователем акустических колебаний в электрические (микрофон, ларингофон). После него идут различные электрические системы в виде трактов и каналов передачи сигналов. За ними, до уха слушателя, снова — акустические звенья тракта: электроакустический преобразователь (громкоговоритель или телефон), помещение или открытое пространство в случае громкоговорящего приема; объем между телефоном и слуховым проходом — при приеме на телефон. В каждом из этих акустических звеньев тракта происходят те или иные изменения акустических колебаний, каждое из них обладает соответствующими свойствами, которые надо знать, чтобы уметь правильно пользоваться ими.

Известно, что акустические звенья тракта зачастую являются определяющими в отношении качества звучания и играют значительную роль в обеспечении качества речевой связи.

¹ В дальнейшем для краткости везде будет указываться только «вещания и связи» или «в электроакустических трактах».

Раздел 1

ЗВУКОВЫЕ КОЛЕБАНИЯ И ВОЛНЫ

1.1. ОПРЕДЕЛЕНИЯ

Звуковой волной называют процесс распространения переменного возмущения в упругой среде, а *звуковыми колебаниями* называют колебательные движения частиц среды под действием этого возмущения. Пространство, в котором происходит распространение этих волн, называют звуковым полем. Если источник возмущения известен, то пространство, в котором могут быть обнаружены звуковые колебания, создаваемые этим источником, называют звуковым полем данного источника звука.

Звуковые колебания являются частным случаем механических колебаний.

Звуковые колебания в жидкой и газообразной средах являются *продольными колебаниями*, т. е. частицы среды колеблются вдоль линии распространения волны. В твердых средах, кроме продольных колебаний, имеют место и *поперечные колебания* и волны, т. е. такие, в которых частицы среды колеблются в направлении, перпендикулярном линии распространения волны.

Направление распространения звуковых волн называют *звуковым лучом*, а поверхность, соединяющую все смежные точки поля с одинаковой фазой колебания частиц среды, называют *фронтом волны*. Фронт волны перпендикулярен звуковому лучу. В общем случае фронт волны имеет сложную форму, но в практических случаях ограничиваются рассмотрением трех видов фронта волны: плоской, сферической и цилиндрической.

Звуковые волны распространяются с определенной скоростью, называемой *скоростью звука*. В разных средах и телах скорость звука различна.

В газообразных средах скорость звука зависит от плотности среды ρ и давления $p_{a.c}$: $c = \sqrt{\gamma p_{a.c} / \rho}$, где γ — коэффициент адиабаты; $\gamma = C_p / C_v$, C_p и C_v — теплоемкость среды при постоянном давлении и при постоянном объеме. Для газов это отношение составляет от 1,668 для аргона до 1,28 для метана. Для воздуха оно равно 1,402 при 15°С и давлении 101 325 Па¹. В жидких и твердых материалах скорость звука определяется плотностью материала

ТАБЛИЦА 1.1

Скорость звука и удельное акустическое сопротивление¹ для газов и жидкостей

Среда	Температура, °С	Плотность ρ , кг/м ³	Скорость звука c , м/с	Удельное акустическое сопротивление ρc , кг/м ² ·с × 10 ³
Водяной пар	100	0,58	405	0,230
Воздух	0	1,29	331	0,428
Воздух	20	1,20	343	0,413
Гелий	0	0,18	970	0,172
Вода пресная	15	999	1430	1,43
Вода соленая 3,5%-ая	15	1027	1500	1,55

¹ Определение акустического сопротивления см. в § 1.2.

¹ Что соответствует 760 мм рт. ст.

ρ и модулем упругости E для соответствующего вида деформации (продольные колебания, крутильные, изгибные и т. п.): $c = \sqrt{E/\rho}$.

В табл. 1.1. приведены величины скорости звука в некоторых газообразных и жидких средах, а в табл. 1.2 — в твердых средах и телах, в последних — для случая продольных колебаний в стержнях. На рис. 1.1 дана зависимость скорости звука и плотности воздуха от высоты над уровнем моря, а на рис. 1.2 — зависимость ее от температуры воздуха. Из рис. 1.1 следует, что на высоте 10 км скорость звука составляет 90% от скорости на уровне моря, а из рис. 1.2 следует, что скорость звука при изменении температуры на 50° изменяется на 10%. Для температуры воздуха $15-20^\circ\text{C}$ и давления 760 мм рт. ст. $c = 340 \div 343$ м/с.

ТАБЛИЦА 1.2

Скорость звука и удельное акустическое сопротивление для твердых тел и материалов

Материал	Плотность ρ , кг/м ³	Скорость звука, м/с		Удельное акустическое сопротивление ρc , кг/м ² с $\times 10^4$	
		в неограниченной среде c	продольная в стержне c_p	в неограниченной среде	для продольных колебаний в стержне
Железо	7800	5850	5170	45,6	40,4
Дуб	700	4170*	1520**	2,92*	1,06**
Сосна	500	5030*	1450**	2,77*	0,8**
Лед	916		3200		2,93
Пробка	240		500		0,12
Каучук натуральный	950		30		0,028
Мрамор	2600		3810		9,9
Гранит	2700		3950		10,7
Плексиглас	1180		2820		3,3
Стекло	3250	5660	5300	18,5	17,3

* По волокну.

** Радиальная.

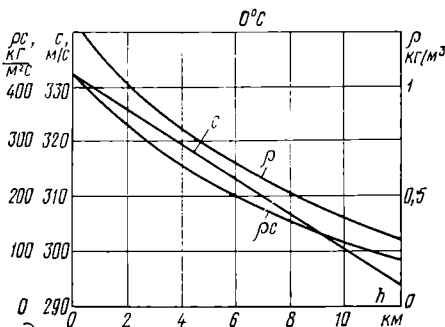


Рис. 1.1. Зависимость скорости звука c , плотности воздуха ρ и удельного акустического сопротивления ρc от высоты над уровнем моря для температуры 0°C (на земле)

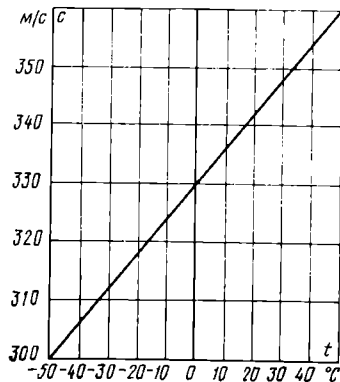


Рис. 1.2. Зависимость скорости звука в воздухе от температуры для атмосферного давления 101 325 Па

Для колебаний с периодом T длина звуковой волны, т. е. расстояние между соседними фронтами волны с одинаковой фазой колебаний, например между максимумами или минимумами колебания, $\lambda = cT$, а частота колебаний $f = c/\lambda$. Частоты акустических колебаний в пределах от 20 до 20 000 Гц называют

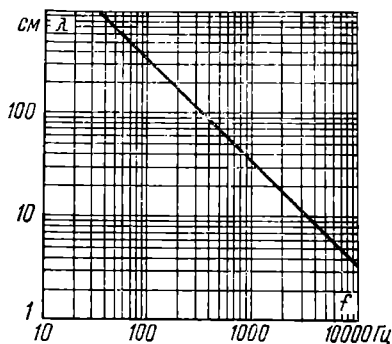


Рис. 1.3. Зависимость длины волны в воздухе от частоты при 20°С и атмосферном давлении 101 325 Па

звуковыми, ниже 20 Гц — инфразвуковыми, а выше 20 000 Гц — ультразвуковыми. Звуковые частоты делят на низкие, средние и высокие. Примерная граница между низкими и средними частотами составляет 200—500 Гц, между высокими и средними — 2000—5000 Гц. Если речь идет только об акустических процессах, то обычно прилагательное «звуковые» опускают.

На рис. 1.3 приведена зависимость длины волны $\lambda = c/f$ от частоты колебаний f . График дан для частот колебаний от 30 до 10 000 Гц для температуры 20°С и атмосферного давления 760 мм рт. ст., т. е. для скорости звука, равной 343 м/с. В этом диапазоне длины волн находятся в пределах от 11,4 до 3,43 см. Для частоты 1000 Гц длина звуковой волны в этих условиях равна 34,3 см.

Пример. Найти длину волны на частоте 500 Гц при температуре 0°С и давлении 760 мм рт. ст.

Из рис. 1.2 находим скорость звука при 0°С, она равна 330 м/с, следовательно, на частоте 500 Гц длина волны $\lambda = 330/500 = 0,66 \text{ м} = 66 \text{ см}$.

1.2. ЛИНЕЙНЫЕ ХАРАКТЕРИСТИКИ ЗВУКОВОГО ПОЛЯ

К линейным характеристикам звукового поля в жидкостях и газах относят звуковое давление, смещение частиц среды, скорость колебаний и акустическое сопротивление среды.

Звуковым давлением в газах и жидкостях называют разность между мгновенным значением давления $p_{a.m}$ в точке среды при прохождении через нее звуковой волны и статическим давлением $p_{a.c}$ в той же точке, т. е. $p = p_{a.m} - p_{a.c}$.

Звуковое давление — величина знакопеременная: в моменты сгущения (уплотнения) частиц среды она положительная, в моменты разрежения (расширения) среды — отрицательная. Эту величину оценивают по амплитуде или по эффективному значению. Для синусоидальных колебаний эффективное значение составляет $1/\sqrt{2} = 0,701$ от амплитудного.

Звуковое давление представляет силу, действующую на единицу поверхности: $p = F/S$. В системе СИ его измеряют в ньютонах на квадратный метр (Н/м^2). Эта единица называется паскалем и обозначается «Па». В абсолютной системе CGS звуковое давление измеряют в динах на квадратный сантиметр: $1 \text{ Па} = 1 \text{ Н/м}^2 = 10 \text{ дин/см}^2 = 1 \text{ кг/(м} \cdot \text{с}^2)$.

Ранее эту единицу называли «бар». Но так как единица атмосферного давления, равная 10^6 дин/см^2 , также называлась «бар», то при стандартизации название «бар» осталось за единицей атмосферного давления.

В системах связи, вещания и т. п. имеют дело со звуковыми давлениями, не превышающими 100 Па, т. е. в 1000 раз меньше атмосферного давления.

Смещением называют отклонение частиц среды от ее статистического положения под действием проходящей звуковой волны. Если отклонение происходит по направлению движения волны, то смещению приписывают положительный знак, а при противоположном направлении — отрицательный знак. Смещение измеряют в метрах (в системе СИ) или в сантиметрах (в абсолютной системе CGS единиц).

Скоростью колебаний называют скорость движения частиц среды под действием проходящей звуковой волны: $v = du/dt$, где u — смещение частиц среды; t — время.

При движении частицы среды в направлении распространения волны скорость колебаний считается положительной, а в обратном направлении — отрицательной. Заметим, что эту скорость нельзя путать со скоростью движения волны, величина которой постоянна для данных среды и условий распространения волн.

Скорость колебаний измеряют в метрах в секунду (м/с) или в сантиметрах в секунду (см/с).

Удельным акустическим сопротивлением называют отношение звукового давления p к скорости колебаний v : $z_A = p/v$. Это справедливо для линейных условий, в частности, когда величины звукового давления значительно меньше статического давления. Удельное акустическое сопротивление определяется свойствами среды или материала и условиями распространения волн (см. § 1.5—1.7). В общем случае удельное акустическое сопротивление является комплексной величиной: $z_A = \omega_A + i q_A$, где ω_A и q_A — активная и реактивная составляющие удельного акустического сопротивления. (Прилагательное «удельное» часто для краткости опускают.) Размерность удельного акустического сопротивления в системе СИ — Па·с/м или кг/м²с, а в абсолютной системе CGS — дин·с/см⁵ или г/см²с. Если известно удельное сопротивление z , г/см²с, то пользуются соотношением 1 г/см²с = 10 кг/м²с. Сдвиг фаз ψ между звуковым давлением и скоростью колебаний может быть определен из формулы $\operatorname{tg} \psi = q_A/\omega_A$.

1.3. ЭНЕРГЕТИЧЕСКИЕ ХАРАКТЕРИСТИКИ ЗВУКОВОГО ПОЛЯ

К энергетическим характеристикам звукового поля относятся интенсивность звука и плотность энергии.

Интенсивностью звука или силой звука называют количество энергии, проходящее в секунду через единицу площади, перпендикулярной к направлению распространения волны. Обозначают ее I . Единицей интенсивности звука является ватт на квадратный метр (Вт/м²) в системе СИ, эрг на квадратный сантиметр в секунду (эрг/см²с) в абсолютной системе CGS единиц: 1 Вт/м² = 10⁹ эрг/см²с.

Для периодических процессов $I = \frac{1}{T} \int_0^T p v dt$, где p и v — мгновенные значения звукового давления и скорости колебаний; T — период колебаний.

Для непериодических процессов $I = \lim_{T \rightarrow \infty} \frac{1}{T} \int_0^T p v dt$.

Для синусоидальных колебаний интенсивность звука связана со звуковым давлением и скоростью колебаний соотношениями

$$I = 0,5 p_m v_m \cos \psi = p_a v_a \cos \psi = (p_a^2 \cos \psi) / z_A = v_a^2 \omega_A,$$

где p_m и v_m — амплитуды звукового давления и скорости колебаний; p_a и v_a — эффективные значения звукового давления и скорости колебаний; ψ — сдвиг фаз между звуковым давлением и скоростью колебаний; z_A — удельное акустическое сопротивление; ω_A — активная составляющая удельного акустического сопротивления.

Плотностью энергии ϵ называют количество звуковой энергии, находящейся в единице объема. Единицей плотности является джоуль на кубический метр в системе СИ и эрг на кубический сантиметр в абсолютной системе CGS единиц: 1 Дж/м³ = 10 эрг/см³. Плотность энергии ϵ связана с интенсивностью звука I и звуковым давлением p_a соотношением $\epsilon = I/c = p_a^2/(c^2 \rho)$.

1.4. УРОВНИ

Общие сведения

В акустике, радиовещании и электросвязи за уровень параметра принимают величину, пропорциональную логарифму относительного значения этого параметра¹. Таким образом, при использовании десятичных логарифмов для параметра K уровень $N = a \lg(K/K_0)$, где a — коэффициент пропорциональности, определяемый размером выбранных логарифмических единиц. Если выбрать $a=1$, то тогда уровень энергетических параметров будет измеряться в белах (Б): $N_B = \lg(K_B/K_{0B})$, в этом случае для линейных параметров уровень $N_L = 2 \lg(K_L/K_{0L})$, так как $K_B \equiv K_L^2$. Более удобной единицей оказалась 0,1 бела — децибел (дБ), и поэтому пользуются следующими выражениями для определения уровней: для энергетических параметров $N_B = 10 \lg(K_B/K_{0B})$ и для линейных $N_L = 20 \lg(K_L/K_{0L})$. K_0 — условное значение параметра, к которому относят величину этого параметра. Оно соответствует нулевому значению уровня, и поэтому его часто называют нулевым значением, или нулевым уровнем. Если K_0 нормировано, то соответствующий уровень параметра называют абсолютным, во всех других случаях уровень называют относительным. Обычно прилагательное «абсолютный» для краткости опускают.

Относительный уровень связан с абсолютным следующим равенством: $N_{отн} = N_{абс}(K) - N_{абс}(K_0)$, где $N_{абс}(K)$ — абсолютный уровень для заданного значения параметра K ; $N_{абс}(K_0)$ — абсолютный уровень для заданной величины параметра K_0 . Оба уровня определяются относительно нормированного значения K_0 . Ранее широко применялась единица уровня непер: 1 Нп = 8,08 дБ или 1 дБ = 0,1151 Нп. Для перевода из децибел в неперы можно пользоваться рис. 1.4.

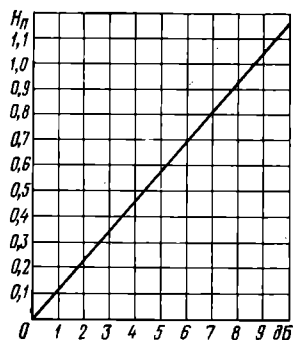


Рис. 1.4. Зависимость между величинами уровня в децибелах и неперах для значений уровня от 0 до 10 дБ

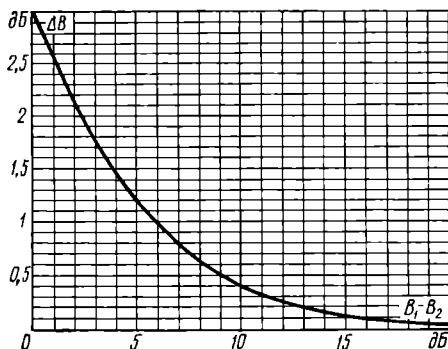


Рис. 1.5. Зависимость добавки к большему уровню от разности уровней при сложении двух уровней по интенсивности

Изменение энергетического параметра в 2 раза соответствует изменению уровня на 3 дБ, в 4 раза — на 6 дБ, в 10 раз — на 10 дБ, в 100 раз — на 20 дБ, в 10 n раз — на 10 n дБ. Изменение линейного параметра в 2 раза соответствует изменению уровня на 6 дБ, изменение его в 4 раза — на 12 дБ, изменение в 10 раз — на 20 дБ, изменение в 100 раз — на 40 дБ, в 10 n раз — на 20 n дБ и т. д.

¹ Термин уровень применяют и в других смыслах, например для ряда значений сигнала при его квантовании.

Если даны два уровня и надо найти «суммарный уровень», т. е. уровень суммарной мощности, то поступают следующим образом: находят разность между уровнями и к большему уровню добавляют поправку, приведенную на рис. 1.5 для различных значений разности уровней. Такое суммирование пригодно только в случаях независимости процессов друг от друга.

Пример. Заданы уровни 63, 60, 65 и 62 дБ. Найти суммарное значение уровня.

Первый метод (последовательное суммирование). Располагают уровни в ряд по уменьшению величины: 65, 63, 62, 60 дБ. Суммируют 65 и 63 дБ. Разность их равна 2 дБ, поправка из рис. 1.5 равна 2,1 дБ. Следовательно, суммарный уровень $65+2,1=67,1$ дБ. Суммируют его с уровнем 62 дБ. Разность равна 5,1 дБ, поправка будет равна 1,2 дБ. Суммарный уровень $67,1+1,2=68,3$ дБ. Суммируют его с уровнем 60 дБ. Разность равна 8,3 дБ. Поправка 0,6 дБ. Окончательное значение суммарного уровня $N_{\Sigma}=68,3+0,6=68,9$ дБ.

Этот метод удобен при малых количествах слагаемых уровней.

Второй метод. Переводят уровни в относительные значения для энергетических параметров. По формуле $K=10^{0,1N}$ находят $K_{65}=3,16 \cdot 10^6$, $K_{63}=2 \cdot 10^6$, $K_{62}=1,58 \cdot 10^6$ и $K_{60}=10^6$. Затем суммируют полученные величины параметров: $K_{\Sigma}=(3,16+2+1,58+1) \cdot 10^6=7,74 \cdot 10^6$. По той же формуле находят, что для значения параметра $K=7,74$ ближайшее значение уровня равно 8,9 дБ. Следовательно, суммарный уровень $N_{\Sigma}=60+8,9=68,9$ дБ. Этот метод удобен при большом количестве суммируемых уровней.

Электрические уровни

За условное (нормированное) значение нулевого уровня электрической мощности P_0 принимают 1 мВт. Абсолютный уровень электрической мощности

$$N_P = 10 \lg (P/P_0) = 10 \lg (P_{\text{Вт}}/10^{-3}) = 10 \lg P_{\text{мВт}},$$

где $P_{\text{мВт}}$ — мощность в милливаттах; $P_{\text{Вт}}$ — мощность в ваттах. Этот уровень мощности измеряется в децибелах мощности (дБм). Соответственно абсолютный уровень по напряжению

$$N_U = 20 \lg (U/U_0) = 20 \lg (U_{\text{В}}/0,775) = 20 \lg (U_{\text{мВ}}/775),$$

где U_0 — условное (нормированное) значение нулевого уровня напряжения; $U_0=775$ мВ; $U_{\text{В}}$ — действующее значение напряжения, В; $U_{\text{мВ}}$ — действующее значение напряжения, мВ.

Уровни по мощности совпадают с уровнями по напряжению при условии измерения их на сопротивлении, равном 600 Ом. Если сопротивление нагрузки $R_{\text{н}}$ отличается от 600 Ом, то уровень по мощности отличается от уровня по напряжению и току на величину

$$N_P - N_U = 10 \lg (600/R_{\text{н}}) = 27,8 - 10 \lg R_{\text{н}},$$

где $R_{\text{н}}$ — сопротивление нагрузки, Ом.

Пример. Найти уровень мощности и уровень по напряжению, если сопротивление нагрузки равно 250 Ом, а напряжение на нагрузке 5 мВ.

Уровень по напряжению $N_U = 20 \lg (5/775) = -43,8$ дБ. Уровень по мощности $N_P = 10 \lg (U^2/R_{\text{н}}P_0) = 10 \lg [(5 \cdot 10^{-3})^2/250 \cdot 10^{-3}] = -40$ дБ. Эту разность между уровнями по мощности и по напряжению можно найти из выражения $N_P - N_U = 10 \lg (600/250) = 3,8$ дБ.

Акустические уровни

За условное (нормированное) значение нулевого уровня интенсивности звука принята интенсивность, равная 10^{-12} Вт/м² или 10^{-9} эрг/см²с. Абсолютный уровень интенсивности в децибелах $L_I = 10 \lg (I/I_0) = 10 \lg (I_{\text{Вт}}/10^{-12}) =$

$= 10 \lg I_{\text{вг}} + 120 = 10 \lg (I_{\text{эрг}}/10^{-9})$, где $I_{\text{вг}}$ — уровень интенсивности, Вт/м²; $I_{\text{эрг}}$ — уровень интенсивности, эрг/см².

Уровень по звуковому давлению в децибелах для воздуха определяют относительно звукового давления по величине, соответствующей нулевому значению уровня интенсивности для удельного акустического сопротивления, равного 400 кг/м²с = 40 г/см²с, т. е. уровень определяется выражением $L_p = 20 \lg (p/p_0) = 20 \lg (p_{\text{Па}}/2 \cdot 10^{-5}) = 20 \lg p_{\text{Па}} + 94 = 20 \lg (p_d/2 \cdot 10^{-4})$, где p_0 — условное действующее значение для нулевого уровня по звуковому давлению ($p_0 = 2 \cdot 10^{-5}$ Па = $2 \cdot 10^{-4}$ дин/см²); $p_{\text{Па}}$ — действующее значение звукового давления, Па; p_d — то же самое, дин/см².

Уровень по плотности энергии в децибелах для воздуха принято определять относительно плотности, соответствующей нулевому значению интенсивности для скорости звука, равной 333 м/с, т. е. уровень определяется из выражения $L = 10 \lg (e/e_0) = 10 \lg (e_{\text{Дж}}/3 \cdot 10^{-15}) = 10 \lg (e_{\text{эрг}}/3 \cdot 10^{-14})$, где $e_0 = 3 \cdot 10^{-15}$ Дж/м³ = $3 \cdot 10^{-14}$ эрг/см³ — условное значение нулевого уровня по плотности энергии; $e_{\text{Дж}}$ — плотность энергии, Дж/м³; $e_{\text{эрг}}$ — плотность энергии, эрг/см³.

Пример. Интенсивность звука равна $2 \cdot 10^{-4}$ Вт/м². Найти уровень интенсивности: $L_I = 10 \lg (2 \cdot 10^{-4}/10^{-12}) = 10 \lg 2 \cdot 10^8 = 83$ дБ.

Пример. Звуковое давление составляет 0,1 Па. Найти уровень звукового давления для нормальных атмосферных условий ($t = 20^\circ \text{C}$, давление равно 1 атм): $L_p = 20 \lg (0,1/2 \cdot 10^{-5}) = 20 \lg 5 \cdot 10^3 = 74$ дБ.

Пример. Уровень интенсивности равен 120 дБ. Найти интенсивность и звуковое давление для нормальных атмосферных условий:

$$I = I_0 10^{0,1 L_I} = 10^{-12} \cdot 10^{0,1 \cdot 120} = 1 \text{ Вт/м}^2;$$

$$p = p_0 10^{0,05 L_p} = 2 \cdot 10^{-5} \cdot 10^{0,05 \cdot 120} = 20 \text{ Па}.$$

1.5. ПЛОСКАЯ ВОЛНА

Фронт плоской волны — плоскость, звуковые лучи идут параллельно друг другу. Энергия в плоской волне не расходится в стороны, интенсивность звука практически не зависит от расстояния, прошедшего волной, если пренебречь потерями на вязкость среды, молекулярное рассеяние, турбулентное затухание и дифракцию волн.

Амплитуды звукового давления и скорости колебаний в этом случае также не зависят от расстояния, прошедшего волной.

Волновое уравнение для плоской волны

$$\frac{\partial^2 p}{\partial t^2} = c^2 \frac{\partial^2 p}{\partial x^2} \quad c^2 = \frac{\gamma p_{a.c}}{\rho},$$

где t — время; x — координата; ρ — плотность среды; $p_{a.c}$ — атмосферное давление; γ — коэффициент адиабаты.

Общее решение волнового уравнения для плоской волны

$$p = \Phi_1(t - x/c) + \Phi_2(t + x/c),$$

где c — скорость звука (скорость движения волны); первый член — волна, движущаяся (бегущая) в положительном направлении; второй член — волна, движущаяся (бегущая) в отрицательном направлении.

Типовое частное решение волнового уравнения для волны, распространяющейся в положительном направлении,

$$p = p_m e^{i\omega \left(t - \frac{x}{c} \right)} = p_m e^{i(\omega t - kx)},$$

где p_m — амплитуда звукового давления; ω — угловая частота колебаний; $\omega = 2\pi f$; f — частота колебаний; $k = \omega/c$ — волновое число.

Скорость колебаний

$$v = v_m e^{i(\omega t - kx)} = v_m e^{i\omega(t - x/c)},$$

где $v_m = \omega u_m$ — амплитуда скорости колебаний; u_m — амплитуда смещения.

Удельное акустическое сопротивление для плоской волны чисто активное и равно

$$Z_A = p/v = \rho_m/v_m = \rho_a/v_a = \rho c.$$

В табл. 1.1, 1.2 приведены акустические сопротивления для плоской волны, распространяющейся в различных средах и телах, а на рис. 1.1 дана зависимость его в воздухе от высоты над уровнем моря.

Для воздуха при температуре 20°C и нормальном атмосферном давлении акустическое сопротивление $\rho c = 413 \text{ кг}/(\text{м}^2 \cdot \text{с}) = 41,3 \text{ г}/(\text{см}^2 \cdot \text{с})$. Интенсивность звука в плоской волне $I = p_m v_m / 2 = p_a v_a = p_a^2 / \rho c$, где p_a и v_a — эффективные значения звукового давления и скорости колебаний.

1.6. СФЕРИЧЕСКАЯ ВОЛНА

Фронт сферической волны представляет собой сферу, в центре которой находится источник колебаний, а звуковые лучи совпадают с радиусами сферы.

Полная мощность звука, исходящая из источника звука и расходящаяся по всем направлениям, не изменяется по величине с удалением от источника звука, если пренебречь потерями на вязкость среды и молекулярное рассеяние, т. е. $P_a = \text{const}$. Интенсивность звука с удалением от источника звука уменьшается по квадратичному закону $I_r = I_1/r^2$, где I_1 — интенсивность звука на расстоянии единицы длины от центра источника звука; r — расстояние фронта волны от этого центра. Звуковое давление для сферической волны с расстоянием уменьшается по гиперболическому закону $p_r = p_1/r$, где p_1 — звуковое давление на расстоянии единицы длины от центра источника звука.

Волновое уравнение для трехмерного пространства

$$\frac{\partial^2 p}{\partial t^2} = c^2 \left(\frac{\partial^2 p}{\partial x^2} + \frac{\partial^2 p}{\partial y^2} + \frac{\partial^2 p}{\partial z^2} \right), \quad c^2 = \frac{\gamma p_{a.0}}{\rho},$$

При преобразовании координат из прямоугольных в сферические волновое уравнение имеет вид

$$\frac{\partial^2 (pr)}{\partial t^2} = c^2 \frac{\partial^2 (pr)}{\partial r^2}$$

Общий вид решения волнового уравнения для сферической волны

$$p = (p_1/r) [\varphi_1(t - r/c) + \varphi_2(t + r/c)],$$

где первый член соответствует волне, распространяющейся в положительном направлении, а второй — в отрицательном.

Типовое частное решение для волны, распространяющейся в положительном направлении,

$$p = (p_1/r) e^{i\omega(t - r/c)} = (p_1/r) e^{i(\omega t - kr)} = p_m e^{i(\omega t - kr)}, \quad p_m = p_1/r,$$

где r — расстояние от центра источника звука (радиус волны); ω — угловая частота колебаний; p_1 — амплитуда звукового давления на расстоянии единицы длины от центра источника звука, $k = \omega/c$ — волновое число.

Скорость колебаний в сферической волне

$$v = (v_1/r) e^{i[\omega(t - r/c) - \psi]},$$

$$v_1/r = v_m,$$

где v_1 — амплитуда скорости колебаний на расстоянии единицы длины от цент-

ра источника звука: $v_1 = (p_1/\rho c) \sqrt{1 + c^2/\omega^2 r^2} = (p_1/\rho c) \sqrt{1 + 1/k^2 r^2} = p_1/\rho c \cos \psi$; ψ — сдвиг фаз между звуковым давлением и скоростью колебаний; $\operatorname{tg} \psi = c/\omega r = 1/kr = \lambda/2\pi r$.

На рис. 1.6 приведена зависимость сдвига фаз в сферической волне от соотношения между расстоянием фронта волны от источника звука (от центра сферы) и длиной волны. Чем меньше отношение длины волны к радиусу волны

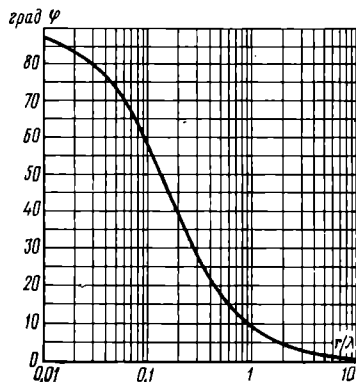


Рис. 1.6. Зависимость фазового угла между звуковым давлением и скоростью колебаний в сферической волне от отношения радиуса волны к длине волны

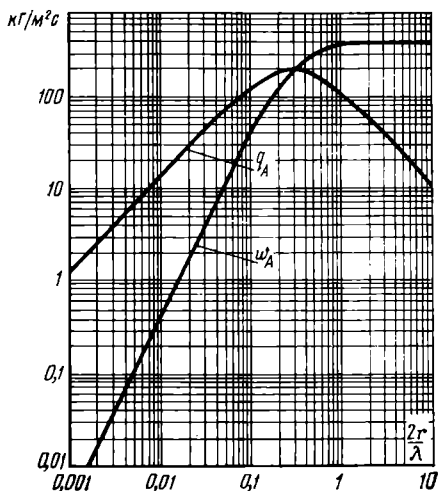


Рис. 1.7. Зависимость удельного акустического сопротивления для сферической волны от отношения удвоенного расстояния до центра источника звука к длине волны (w_A — активная составляющая; q_A — реактивная составляющая)

(расстоянию от центра источника звука), тем меньше сдвиг фаз между звуковым давлением и скоростью колебаний. Определим угол сдвига фаз на расстоянии 0,1 м от центра источника звука для частоты 100 Гц ($\lambda = 3,43$ м): $\operatorname{tg} \psi = c/(2\pi fr) = 343/(2\pi \cdot 100 \cdot 0,1) = 5,48$, что соответствует углу $\psi = 80^\circ$. Для расстояния 1 м на частоте 1000 Гц ($\lambda = 0,343$ м) этот сдвиг фаз составляет $\operatorname{tg} \psi = c/(2\pi fr) = 343/(2\pi \cdot 1000 \cdot 1) = 5,48 \cdot 10^{-2}$, что соответствует углу 3° .

На средних частотах для расстояний больше 1 м можно не считаться со сдвигом фаз.

Удельное акустическое сопротивление в сферической волне

$$\delta_A = \frac{p}{v} = \rho c \frac{i \omega r}{c + i \omega r} = \rho c \left[\frac{\omega^2 r^2}{c^2 + \omega^2 r^2} + i \frac{\omega r c}{c^2 + \omega^2 r^2} \right] = \rho c \left[\frac{k^2 r^2}{1 + k^2 r^2} + i \frac{kr}{1 + k^2 r^2} \right]$$

Активная составляющая акустического сопротивления

$$w_A = \rho c \frac{\omega^2 r^2}{c^2 + \omega^2 r^2} = \rho c \frac{k^2 r^2}{1 + k^2 r^2}.$$

Реактивная составляющая

$$q_A = \rho c \frac{\omega r c}{c^2 + \omega^2 r^2} = \rho c \frac{k r}{1 + k^2 r^2}$$

Модуль сопротивления

$$|\delta_A| = \frac{p_m}{v_m} = \rho c \frac{\omega r}{\sqrt{c^2 + \omega^2 r^2}} = \rho c \frac{k r}{\sqrt{1 + k^2 r^2}} = \rho c \cos \psi,$$

т. е. акустическое сопротивление в сферической волне по величине не превышает акустического сопротивления в плоской волне.

На рис. 1.7 приведены величины удельного акустического сопротивления для сферической волны. Реактивное сопротивление имеет характер инерционного сопротивления (см. разд. 4), т. е. сопротивления массы, называемой «соколеблющейся». Соколеблющаяся масса для всей сферы

$$M_A = 4\pi r^2 q_A / \omega = 4\pi r^3 \rho / (1 + k^2 r^2),$$

где ρ — плотность среды; r — расстояние от центра сферы; $k = \omega/c$ — волновое число.

При $kr = 2\pi r/\lambda \ll 1$ соколеблющаяся масса $M_A = \rho V_A$, $V_A = (4\pi/3)[(1,59 r)^3 - -r^3]$.

Пример. Найти активную составляющую акустического сопротивления сферической волны и соколеблющуюся массу для следующих условий: $r_1 = 0,25$ м и $f_1 = 100$ Гц; $r_2 = 1$ м и $f_2 = 1000$ Гц. Активная составляющая

$$\omega_{A1} = 413 \frac{4\pi^2 \cdot 100^2 \cdot 0,25^3}{840^2 + 4\pi^2 \cdot 100^2 \cdot 0,25^2} = 80,94 \text{ кг/м}^2\text{с}$$

и

$$\omega_{A2} = 413 \frac{4\pi^2 \cdot 1000^2 \cdot 1^2}{340^2 + 4\pi^2 \cdot 1000^2 \cdot 1^2} = 410,8 \text{ кг/м}^2\text{с}.$$

Соколеблющаяся масса

$$M_{A1} = 1,2 \frac{4\pi \cdot 0,25^3 \cdot 340^2}{340^2 + 4\pi^2 \cdot 100^2 \cdot 0,25^2} = 0,194 \text{ кг} = 194 \text{ г}$$

и

$$M_{A2} = 1,2 \frac{4\pi \cdot 1^3 \cdot 340^2}{340^2 + 4\pi^2 \cdot 1000^2 \cdot 1^2} = 4,4 \cdot 10^2 \text{ кг} = 44 \text{ г}$$

при $kr = 2\pi r/\lambda > 1$; $M_A = 4\pi r \rho / k^2 = r \rho \lambda^2 / \pi$. Интенсивность звука в сферической волне связана со звуковым давлением следующим соотношением: $I = p_m^2 / 2\rho c = p_e^2 / \rho c$, где p_e — эффективное значение звукового давления; p_m — амплитудное значение звукового давления.

1.7. ЦИЛИНДРИЧЕСКАЯ ВОЛНА

Для цилиндрической волны фронт волны имеет круглую цилиндрическую форму, ось цилиндра совпадает с осью источника звука, а радиусы цилиндра — со звуковыми лучами (если источник звука имеет бесконечную длину).

Интенсивность звука в цилиндрической волне с расстоянием от источника звука убывает по гиперболическому закону $I_r = I_1/r$, а звуковое давление — по закону $p_r = p_1/\sqrt{r}$. Цилиндрическая волна имеет место при озвучении пространства с помощью длинных прямолинейных цепочек громкоговорителей (см. разд. 9).

1.8. ИНТЕРФЕРЕНЦИЯ ВОЛН

Если две звуковые волны с одинаковыми амплитудами распространяются в противоположных направлениях, то образуется стоячая волна с пучностями и узлами. Расстояния между соседними узлами, как и расстояния между соседними пучностями, равны половине длины волны (рис. 1.8), а между пучностью

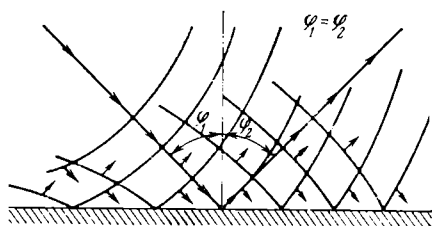
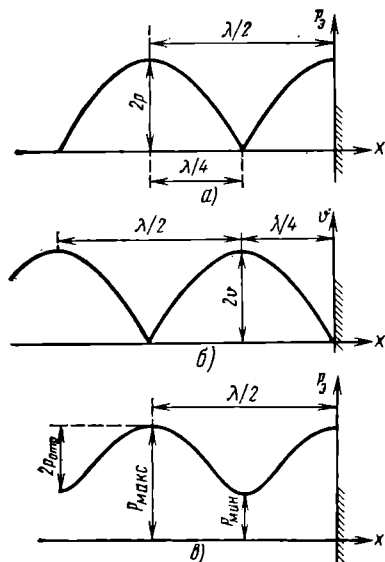


Рис. 1.9. Иллюстрация отражения волн

Рис. 1.8. Распределение амплитуд звукового давления и скорости колебаний при интерференции:

а) для одинаковых амплитуд звукового давления; б) для скорости колебаний; в) для неодинаковых амплитуд звукового давления ($p_{\max} = p_{\text{пад}} + p_{\text{отр}}$; $p_{\min} = p_{\text{пад}} - p_{\text{отр}} = p_{\text{бег}}$)

и соседним узлом — четверти волны. В пучности давления амплитуда звукового давления равна удвоенной амплитуде бегущей волны, в узле амплитуда равна нулю. Пучности давления и пучности скорости колебаний не совпадают друг с другом, а находятся на расстоянии четверти длины волны (рис. 1.8а и б). Точно так же в пучности скорости колебаний амплитуда ее получается удвоенной.

В стоячих волнах поток энергии равен нулю, поэтому их характеризуют или плотностью энергии, или квадратом звукового давления. При неодинаковых амплитудах прямой и обратной волн стоячая волна образуется из обратной волны и части прямой, по амплитуде равной амплитуде обратной волны. Остальная часть прямой волны образует бегущую волну (рис. 1.8в). Амплитуда ее по звуковому давлению $p_{\text{бег}} = p_{\text{пр}} - p_{\text{обр}}$.

В пучности такой комбинации волн амплитуды обеих волн складываются $p_{\max} = p_{\text{пр}} + p_{\text{обр}}$, в узле — вычитаются; $p_{\min} = p_{\text{пр}} - p_{\text{обр}}$. Если известны значения амплитуд давлений в пучности и узле, то $p_{\text{обр}}/p_{\text{пр}} = (p_{\max} - p_{\min})/(p_{\max} + p_{\min})$, а $p_{\text{бег}}/p_{\max} = \delta$, где δ — коэффициент бегущей волны. В этом случае поток энергии создается только бегущей волной. Плотность энергии состоит из двух составляющих — плотности бегущей волны и плотности стоячей волны: $\varepsilon = \varepsilon_{\text{бег}} + \varepsilon_{\text{ст}}$.

1.9. ОТРАЖЕНИЕ ЗВУКА

Если звуковая волна встречает на своем пути какое-либо препятствие или другую среду с иными параметрами, то происходит *отражение* звуковой волны. Законы отражения звуковых волн аналогичны законам отражения световых волн: угол падения φ_1 равен углу отражения φ_2 (рис. 1.9).

Эффективность отражения характеризуют *коэффициентом отражения*. В акустике коэффициентом отражения называют отношение интенсивности отраженной звуковой волны $I_{отр}$ к интенсивности падающей волны $I_{пад}$, т. е. коэффициент отражения $\alpha_{отр} = I_{отр}/I_{пад}$.

Эффективность отражения зависит от степени различия акустических сопротивлений обеих сред: если падающая волна имеет звуковое давление $p_{пад}$, то звуковое давление в отраженной волне

$$p_{отр} = p_{пад} \frac{z_{пад} - z_{отр}}{z_{пад} + z_{отр}} = p_{пад} \beta e^{i\psi}$$

где $z_{отр}$ и $z_{пад}$ — удельные акустические сопротивления среды отражающей и среды, в которой рассматриваются явления отражения; β — модуль коэффициента отражения по давлению; ψ — сдвиг фаз в волнах давления при отражении.

При отражении получается сдвиг фаз между звуковыми давлениями падающей и отраженной волн. Если сопротивления обеих сред активны, то сдвиг фаз или равен нулю (когда сопротивление отражающей среды больше сопротивления первичной), или равен 180° (когда сопротивление отражающей среды меньше сопротивления первичной среды). Если одно или оба акустических сопротивления имеют реактивные составляющие, то сдвиг фаз получается между 0 и 180° .

Коэффициент отражения по интенсивности определяется по формуле

$$\alpha_{отр} = \left| \frac{z_{пад} - z_{отр}}{z_{пад} + z_{отр}} \right|^2 = \left| \frac{p_{отр}}{p_{пад}} \right|^2 = \beta^2.$$

Определим коэффициент отражения (по интенсивности звука) от границы раздела воздушных масс с температурами 20 и 0°C . Берем данные из табл. 1.1 и подставляем их в формулу. Имеем

$$\alpha_{отр} = \left| \frac{428 - 413}{428 + 413} \right|^2 = 3 \cdot 10^{-6}$$

т. е. получили ничтожно малый коэффициент отражения.

В случае, когда отражение происходит от границы воздуха и водяного пара, коэффициент отражения составляет

$$\alpha_{отр} = \left| \frac{413 - 230}{413 + 230} \right|^2 = 0,08,$$

т. е. отражается 8% всей энергии.

Если отражение происходит от воды (пресной), то коэффициент отражения

$$\alpha_{отр} = \left| \frac{413 - 1,43 \cdot 10^6}{413 + 1,43 \cdot 10^6} \right|^2 = 0,9994,$$

т. е. отражается $99,94\%$ всей энергии.

Коэффициенты отражения зависят от угла падения звуковых волн, поэтому в таблицах обычно приводят величины диффузных коэффициентов отражения, измеренных для всевозможных углов падения волн и нормальных (для угла падения 90°).

Если сдвиг фаз по давлению при отражении равен нулю (акустическое сопротивление отражающей среды много больше акустического сопротивления первичной среды), то у границы раздела сред получается пучность звукового давления (рис. 1.10а), а скорость колебаний будет иметь узел колебаний. При обратном соотношении акустических сопротивлений обеих сред сдвиг фаз для звукового давления получается равным 180° : у границы раздела будут узел звукового давления (рис. 1.10б) и пучность скорости колебаний.

Если сдвиг фаз при отражении по звуковому давлению отличается от 0 и 180° , то узлы и пучности соответственно сдвигаются от поверхности раздела сред. На рис. 1.10б показан случай сдвига фаз на 90° .

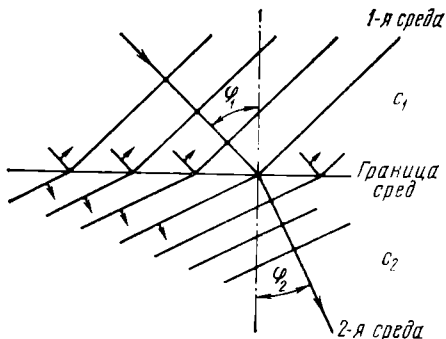
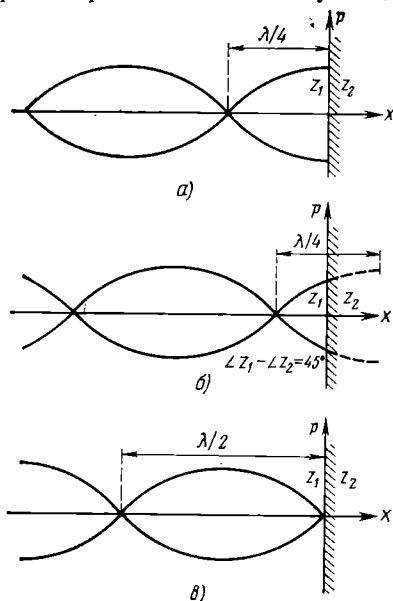


Рис. 1.11. Иллюстрация преломления волн

Рис. 1.10. Распределение амплитуд звукового давления при отражении с различным сдвигом фаз:
 а) без сдвига фаз; б) со сдвигом фаз на 90° ; в) со сдвигом фаз на 180°

1.10. ПРЕЛОМЛЕНИЕ ЗВУКА

Звуковая волна, падая на поверхность раздела двух сред, как и световая волна, частично проходит в другую среду. При этом происходит *преломление* волны, т. е. если волна падает на поверхность раздела под углом φ_1 , то в следующей среде направление движения волны (звукового луча) будет под другим углом (φ_2). Отношение угла падения к углу преломления (рис. 1.11) определяется отношением скоростей распространения звуковых колебаний в этих средах: $\sin \varphi_1 / \sin \varphi_2 = c_1 / c_2$, где c_1 и c_2 — скорости звука в обеих средах. Если удельные акустические сопротивления обеих сред близки друг к другу, то почти вся энергия перейдет из одной среды в другую, а если при этом среды (или материалы из них) будут иметь разные скорости звука, то можно сделать акустические линзы из таких материалов (см. разд. 6).

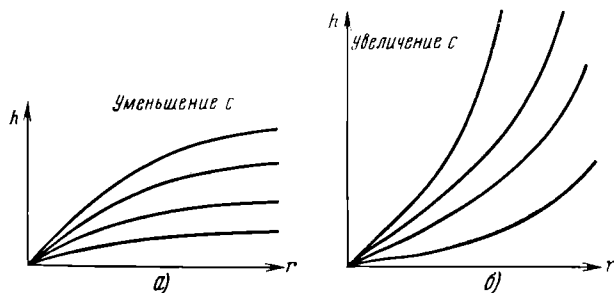


Рис. 1.12. Иллюстрация изгиба звуковых волн при изменении скорости звука:
 а) при уменьшении ее;
 б) при увеличении

Если среда имеет переменные параметры (например, атмосферное давление и плотность), то происходит изгиб звуковых волн (рис. 1.12). Например, для горизонтального распространения волны при постепенном увеличении скорости звука с высотой звуковой луч будет изгибаться вниз (рис. 1.12а), а при уменьшении — вверх (рис. 1.12б). На изгиб звуковых волн сильно влияют ветер и потоки воздуха в различных направлениях.

Пример. Вследствие воздушных течений и ветра скорость распространения звуковых волн уменьшается на 1 м/с при изменении высоты на 2 м. Определить траекторию распространения волны, если начальный угол звукового луча к вертикали был равен 89° , а скорость распространения была равна 340 м/с.

Будем считать, что скорость звука меняется скачками по 1 м/с. При падении на соседний слой под углом 89° произойдет преломление звукового луча. Угол с вертикалью будет составлять $\varphi_1 = \arcsin [(c_1/c_0) \sin \varphi_0]$. Подставляя в эту формулу 89° , получаем угол $\varphi_1 = \arcsin [(339/340) \sin 89^\circ] = 85,5^\circ$. В этом

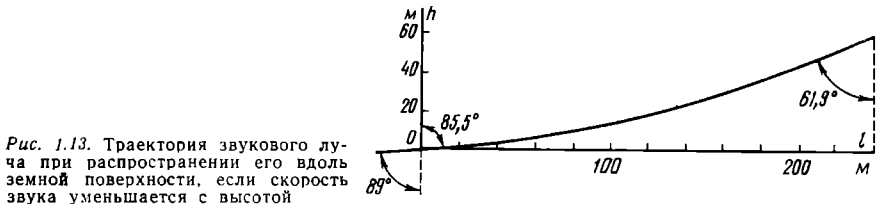


Рис. 1.13. Траектория звукового луча при распространении его вдоль земной поверхности, если скорость звука уменьшается с высотой

слое луч будет находиться до встречи со следующим слоем. Определим по той же формуле угол преломления при переходе луча в следующий слой. Он равен $83,7^\circ$. Для следующего слоя получим $82,3^\circ$ и т. д. Для десятого преломления угол будет составлять 76° , для тридцатого $61,9^\circ$. При этом луч отклонится от горизонтали на 60 м и будет находиться от первой точки преломления на 240 м. На рис. 1.13 нанесена расчетная траектория этого луча.

1.11. ДИФРАКЦИЯ ВОЛН

Если размеры препятствия имеют величину меньше длины звуковой волны или волна падает близко к краю препятствия (по сравнению с длиной волны), то волна дифрагирует вокруг препятствия (рис. 1.14). Конкретные случаи рассматриваются в § 2.3 (дифракция волн вокруг головы человека), в разд. 5 (дифракция волн около микрофона различной формы: шар, цилиндр, куб) и в § 6.5 (дифракция около акустического экрана).

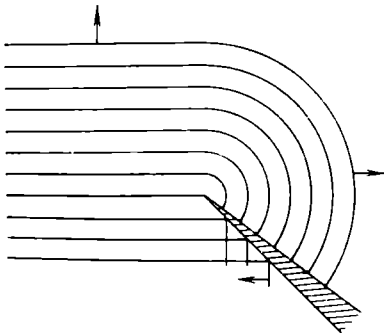


Рис. 1.14. Иллюстрация дифракции звуковых волн

1.12. ЗАТУХАНИЕ ВОЛН

В реальных средах звуковые волны затухают вследствие *вязкости среды и молекулярного затухания*.

На рис. 1.15 приведены зависимости затухания звуковых волн из-за вязкости при распространении их в воздухе в различных условиях, а на рис. 1.16—

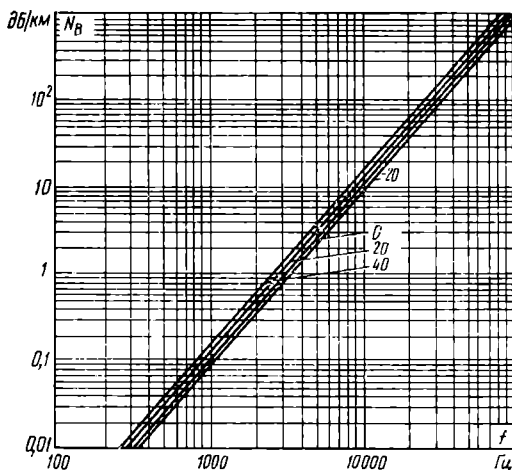


Рис. 1.15. Зависимость вязкого затухания плоской звуковой волны в сухом воздухе от частоты и температуры (указана на кривых)

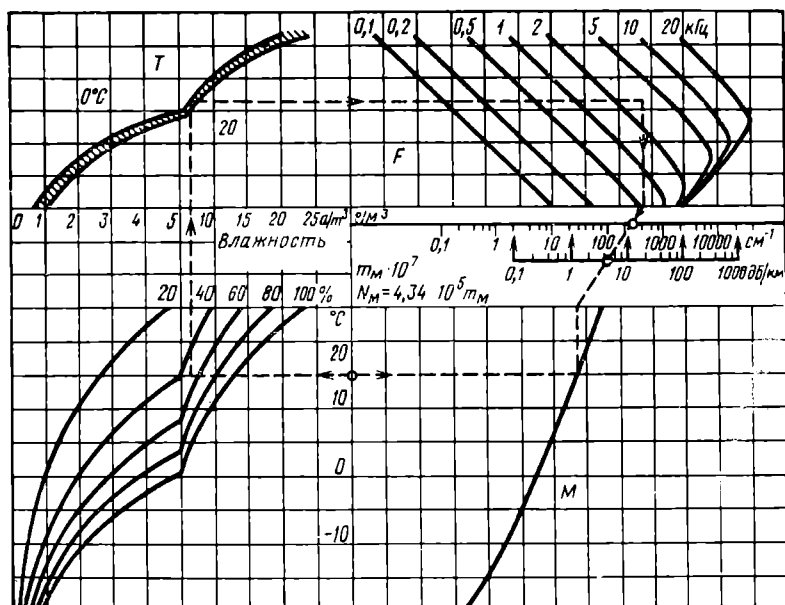


Рис. 1.16. Зависимость молекулярного затухания плоской звуковой волны от температуры, относительной влажности и частоты

то же самое для молекулярного затухания. Первая зависимость (в децибелах на километр) определяется формулой

$$N_B = 1,715 \cdot 10^7 \frac{f^2}{\rho c^3} \left[\frac{4}{3} \eta + (\gamma - 1) \frac{\kappa}{C_p} \right],$$

где ρ — плотность воздуха, кг/м^3 ; c — скорость звука, м/с ; η — коэффициент вязкости, Нс/м^2 ; $\gamma = C_p/C_v$ — отношение теплоемкости при постоянном давлении и постоянном объеме (коэффициент адиабаты); κ — коэффициент теплопроводности.

Полное затухание определяется суммой затуханий из-за вязкости N_B и молекулярного N_M : $N = N_B + N_M$. Для определения величины молекулярного затухания по графику, приведенному на рис. 1.16, проводим на нем прямые:

а) от заданной точки на оси температур (см. вертикальную ось внизу на рис. 1.16) по горизонтали влево до пересечения с кривой заданной относительной влажности, далее по вертикали вверх до середины области T , по горизонтали вправо до пересечения с кривой заданной частоты и затем по вертикали вниз до пересечения с осью абсцисс графика частот F .

б) от заданной точки на оси температур по горизонтали вправо до пересечения с кривой M , далее по вертикали вверх до пересечения с осью ординат графика M .

Полученные таким образом точки на абсциссах графиков F и M соединяем прямой, в точке пересечения которой со шкалой декрементов отсчитываем искомую величину N_M по масштабу километрического затухания.

Пример. Найти молекулярное затухание для температуры 15°C , влажности 50%, частоты 3 кГц. Из номограммы рис. 1.16 для этих данных находим величину молекулярного затухания, равную 4,3 дБ/км, и коэффициент затухания $\mu = 250 \text{ см}^{-1}$, а из графиков рис. 1.15 — величину вязкого затухания, равную 0,9 дБ/км. Общая величина затухания составит 5,2 дБ/км.

Звуковые волны затухают при распространении вдоль поглощающей поверхности. При этом чем больше коэффициент поглощения этой поверхности, тем большее затухание она вносит в распространяющуюся волну. В зависимости от частоты затухание растет с увеличением длины волны (уменьшением частоты). Например, при распространении звуковой волны касательно к поглощающей поверхности (например, публики) происходит значительное затухание звука. Так на частоте 800 Гц звуковое давление уменьшается по квадратичному закону вместо гиперболического. Точнее, на этой частоте звуковая волна испытывает

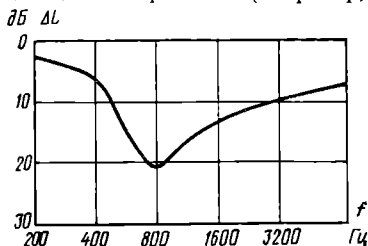


Рис. 1.17. Зависимость затухания звука от частоты при распространении его вдоль публики для десятикратного изменения расстояния

дополнительное затухание на 21 дБ при десятикратном изменении расстояния (общее затухание получается равным 41 дБ). На частоте 250 Гц дополнительное затухание составляет 3 дБ, а на частоте 6400 Гц 8 дБ. На рис. 1.17 приведена эта зависимость.

1.13. РАСПРОСТРАНЕНИЕ ЗВУКА В ТРУБАХ

Для трубы удобнее пользоваться понятиями объемного смещения и объемной скорости. Этими понятиями пользуются и в случае распространения в открытом пространстве.

Объемным смещением называют произведение смещения частиц u среды на поперечное сечение трубы S : $U = uS$.

Объемной скоростью называют произведение скорости колебаний частиц среды на поперечное сечение трубы S : $Q = vS$.

Волновым сопротивлением называют отношение звукового давления p к объемной скорости Q в данном сечении трубы: $Z_a = p/Q$. Оно связано с удельным акустическим сопротивлением \tilde{z}_a соотношением $Z_a = \tilde{z}_a/S$. Полное сопротивление определяется отношением $Z_m = F/v = \tilde{z}_a S = Z_a S^2$, где v — скорость колебаний.

Если источник звука находится в одном конце трубы с постоянным поперечным сечением, а другой конец трубы удален в бесконечность, то в такой трубе образуется плоская бегущая волна (уравнение ее см. в § 1.5). При этом предполагается, что поперечные размеры трубы значительно меньше длины волны.

Для трубы конечных размеров происходит отражение звуковых волн от ее концов. В трубе образуются две бегущие волны с встречным направлением. Их сумма

$$p = p_+ e^{i\omega(t-x/c)} + p_- e^{i\omega(t+x/c)} = (p_+ - p_-) e^{i\omega(t-x/c)} + 2p \cos \frac{\omega x}{c} e^{i\omega t},$$

где p_+ и p_- — амплитуды звукового давления в волнах, идущих от источника звука («прямая» волна) и к источнику (отраженная волна); $(p_+ - p_-)$ — амплитуда давления в бегущей волне в том же положительном направлении, что и «прямая» волна; $2p \cos(\omega x/c)$ — амплитуда давления стоячей волны.

Входная удельная акустическая проводимость конечной трубы, закрытой с обоих концов,

$$Y_{вх} = \frac{1}{\tilde{z}_{вх}} = \left(\frac{1}{\tilde{z}_1} + \frac{1}{\tilde{z}_2} \right) \cos \frac{\omega l}{c} + i \frac{1}{\rho c} \left(1 + \frac{(\rho c)^2}{\tilde{z}_1 \tilde{z}_2} \right) \sin \frac{\omega l}{c}$$

где \tilde{z}_1 и \tilde{z}_2 — удельные акустические сопротивления отражающих материалов, находящихся на концах трубы; ρc — удельное акустическое сопротивление среды, заключенной в трубе; l — длина трубы.

Для частот $\omega = \pi l c / l$ или $f = nc/2l$, для которых длина волны связана с длиной трубы соотношением $l = n\lambda/2$ (где n — любое целое число), входное удельное акустическое сопротивление чисто активно и минимально:

$$\tilde{z}_{вх.мин} = (-1)^n \frac{\tilde{z}_1 \tilde{z}_2}{\tilde{z}_1 + \tilde{z}_2} \quad \text{т. е.} \quad Y_{вх. макс} = \frac{1}{\tilde{z}_{вх.мин}} = (-1)^n \left(\frac{1}{\tilde{z}_1} + \frac{1}{\tilde{z}_2} \right).$$

Эти частоты называют резонансными частотами трубы.

Для трубы длиной l м резонансные частоты будут следующими:

$$n = 1 \quad f_{1p} = c/2l = 343/2 \cdot 1 \approx 172 \text{ Гц};$$

$$n = 2 \quad f_{2p} = c/l = 343/1 = 343 \text{ Гц};$$

$$n = 3 \quad f_{3p} \approx 515 \text{ Гц и т. д.}$$

Для частот $\omega = \frac{2n-1}{2} \frac{\pi c}{l}$ или $f = \frac{2n-1}{4} \frac{c}{l}$ для которых длина волны связана с длиной трубы соотношением $l = (2n-1)\lambda/4$, где входное удельное акустическое сопротивление имеет чисто реактивный характер и по величине достигает максимума,

$$\tilde{z}_{вх. макс} = -i \frac{\rho c}{1 + (\rho c)^2 / \tilde{z}_1 \tilde{z}_2}, \quad \text{т. е.} \quad Y_{вх. мин} = i [1/\rho c + (\rho c)/\tilde{z}_1 \tilde{z}_2].$$

Соответствующие частоты называют антирезонансными. Для той же трубы антирезонансные частоты будут следующими:

$$n = 1 \quad f_{1ар} = \frac{1}{4} \frac{c}{l} = \frac{1 \cdot 343}{4 \cdot 1} \approx 85,7 \text{ Гц};$$

$$n = 2 \quad f_{2ар} = \frac{1}{4} \frac{3 \cdot c}{l} = \frac{3 \cdot 343}{4 \cdot 1} = 257 \text{ Гц};$$

$$n = 3 \quad f_{3ар} = 429 \text{ Гц и т. д.}$$

Для воздуха обычно входное удельное акустическое сопротивление трубы численно равно акустическому сопротивлению воздуха для плоской волны, но с множителем — i , т. е. оно имеет реактивный характер (упругостное сопротивление — см. разд. 4).

Раздел 2

ОСНОВНЫЕ СВОЙСТВА СЛУХА

2.1. ВВЕДЕНИЕ

Все передачи по системам вещания, телефонной связи, звукоусиления, записи и воспроизведения звука и т. п. предназначены для человека. Поэтому для правильного проектирования и эксплуатации этих систем необходимо знать свойства слуха человека, тем более что орган слуха человека является своеобразным приемником звука, резко отличающимся от приемников звука, создаваемых человеком.

Ухо человека обладает свойствами частотного анализатора, дискретным восприятием по частотному и динамическому диапазонам (аналоговый звуковой сигнал превращается в последовательность электрических импульсов двоичного типа). Все эти операции осуществляются во внутреннем ухе, в так называемой улитке. В улитке находится основная (базиллярная) мембрана, состоящая из большого числа волокон, слабо связанных между собой. Вдоль основной мембраны расположены нервные окончания, каждое из которых (а их свыше 20 000) возбуждается от прикосновения к ним волокон основной мембраны, посылая в слуховой центр мозга электрические импульсы. Там эти импульсы подвергаются сложному анализу, в результате которого человек определяет передаваемое сообщение.

2.2. ВОСПРИЯТИЕ ПО ЧАСТОТЕ

Каждое из волокон основной мембраны резонирует на вполне определенной для него частоте. Сложный звук, состоящий из ряда частотных составляющих, вызывает колебания ряда волокон соответственно частотам составляющих. На рис. 2.1 приведен схематический разрез улитки основной мембраны. По оси абсцисс дано расстояние (в миллиметрах) от начала улитки до волокон основной мембраны, там же указаны частоты, на которые отзываются эти волокна. Частоты ниже 60 Гц воспринимаются по субъективным гармоникам. На рис. 2.2 приведена эквивалентная электрическая модель слухового анализатора. В ней 140 параллельных звеньев — резонаторов, соответствующих волокнам мембраны; последовательные индуктивности L'_k соответствуют соко-леблющейся массе лимфы. Ток в параллельных звеньях соответствует скорости колебаний волокон. На рисунке приведены числовые значения элементов модели. Модель показала хорошее соответствие реальной слуховой улитке.

Разрешающая способность слухового анализатора невелика: полоса пропускания резонатора слухового анализатора, определенная на уровне -3 дБ, составляет для моноурального (одноухого) слушания на частоте 300 Гц око-

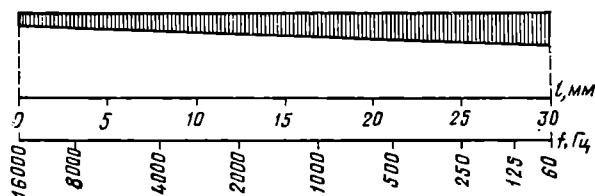


Рис. 2.1. Продольный разрез улитки вдоль основной мембраны

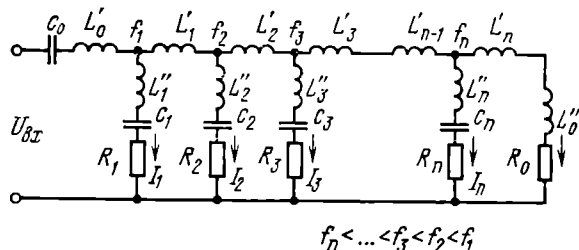


Рис. 2.2. Эквивалентная электрическая схема улитки:

$$L'_k = 21,02 \cdot 10^{-8} e^{0,029k} \text{ Гн}; L''_k = 75,12 \cdot 10^{-8} e^{0,029k} \text{ Гн}; C_k = 553 \cdot 10^{-12} e^{0,054k} \text{ Ф}; R_k = 5,825 \cdot 10^3 e^{-0,013k} \text{ Ом}; L''_0 = 0,067 \text{ Гн}; R_0 = 70,957 \text{ Ом}.$$

ло 50 Гц, на 1000 Гц — 60 Гц, на 3000 Гц — 150 Гц. Эти полосы пропускания носят название критических полосок слуха. Величины этих критических полосок слуха для моноурального и бинаурального (двухухого) слушания (по Флетчеру) приведены на рис. 2.3. По данным Цвикера критические полоски

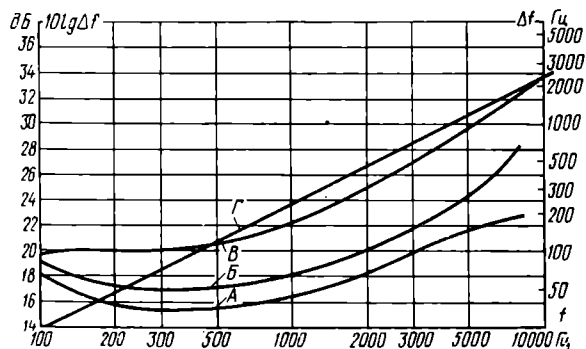


Рис. 2.3. Кривые частотной зависимости ширины критических полос и частотных групп слуха в герцах (правые ординаты) и в децибелах $10 \lg \Delta f_{кр}$ (левые ординаты) для моноурального (А) и бинаурального (Б) слушания по Флетчеру, бинаурального слушания по Цвикеру (В), ширина третьооктавных полос (Г)

слуха (см. рис. 2.3), названные им «частотными группами», в 2—3 раза шире, чем по данным Флетчера. Критическими полосками по Флетчеру пользуются при расчете разборчивости речи, а частотными группами по Цвикеру — при расчетах громкости шума. Ширина частотных групп на частотах выше 400 Гц близка к ширине третьооктавных полос (см. кривую Г на рис. 2.3).

Воспринимаемый слухом частотный диапазон ограничен снизу частотой 16—20 Гц, а сверху — частотой 20 000 Гц. В этом диапазоне человек запоминает только несколько сотен градаций частоты, причем число этих градаций резко уменьшается с уменьшением интенсивности звука и в среднем составляет не более 100—150. Соседние градации в среднем отличаются друг от друга по частоте не менее чем на 4% (самые лучшие музыканты не могут заметить разницы в звучании фильмов, снятых для кино, со скоростью 24 кадра/с при демонстрации их по телевидению со скоростью 25 кадра/с и наоборот). Человек косвенным образом может различить изменение частоты до 0,3% на средних частотах, например при условии сопоставления двух тонов, непосредственно следующих один за другим. А по биениям частот двух тонов он может обнаружить разность частот до десятых долей герца.

При медленном изменении частоты тона по синусоидальному закону слух обнаруживает эти изменения, когда девиация частоты составляет около 2% от ширины частотной группы. Например, на низких частотах ширина частотной группы равна 100 Гц, а минимально ощущаемая девиация равна 1,8 Гц. На частотах выше 500 Гц ширина частотной группы составляет 17% от средней частоты группы, а минимально ощущаемая девиация равна 0,35% от средней частоты, т. е. примерно 2% от ширины группы. На рис. 2.4 приведена зависи-

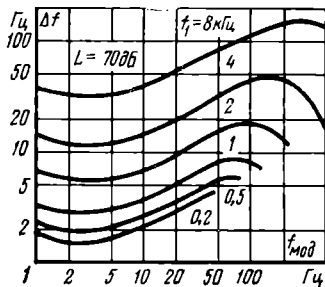


Рис. 2.4. Минимально ощущаемая девиация тонов различной частоты f_1 в функции частоты модуляции $f_{\text{мод}}$

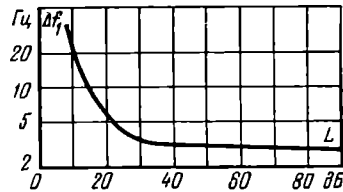


Рис. 2.5. Минимально ощущаемая девиация тона частоты 1 кГц в функции уровня звукового давления при частоте модуляции 4 Гц

мость минимально ощущаемой девиации Δf тона от частоты модуляции для разных частот тонов. Кривые даны для уровня звука 70 дБ. Как видно, наиболее заметной является частота модуляции 4 Гц. На рис. 2.5 дана зависимость минимально ощущаемой девиации от уровня тона (при частоте модуляции, равной 4 Гц). Как видим, минимально ощущаемая девиация почти не изменяется для уровней тона выше 40 дБ. Для частотномодулированных шумовых полос минимально ощущаемая девиация в 6 раз больше, чем для чистых тонов.

Субъективную меру частоты колебаний звука называют высотой звука. Высота тона на низких и средних частотах до 1000 Гц для чистого тона почти пропорциональна его частоте, на высоких частотах эта зависимость близка к логарифмической. Условились высоту тона с частотой 1000 Гц и с уровнем ощущения 40 дБ считать равной 1000 мел или 10 барк (1 барк=100 мел). На рис. 2.6 дана зависимость между частотой тона в герцах и его высотой в мелах для уровня ощущения 40 дБ.

Для звука, состоящего из ряда составляющих, его высота связана с частотами и интенсивностями составляющих сложным образом. В тех случаях, когда надо выдержать субъективный масштаб по частоте, пользуются зависимостью рис. 2.6. Приблизительно этот масштаб считают линейным до частоты 800—1000 Гц и логарифмическим выше частоты 1000 Гц. Такой комбинирован-

ный масштаб для практики не удобен, поэтому применяют логарифмический масштаб. За единицу высоты в этом случае принимают октаву и ее доли. Октава представляет частотный интервал, для которого отношение крайних час-

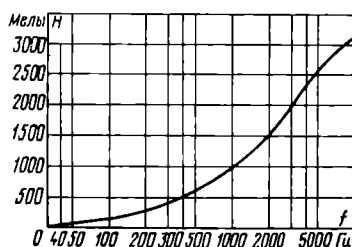


Рис. 2.6. Зависимость между высотой звука в мелах и частотой в герцах

тот равно 2. В табл. 2.1 приведены частотные границы и средние значения частот для октавных диапазонов. Средние значения округлены. Измерительные октавные диапазоны иногда делят на полуоктавные и третьоктавные. Их границы определяют из той же таблицы и табл. 2.2.

ТАБЛИЦА 2.1

Октавные диапазоны и их средние частоты¹

Границы октавы, Гц	Средняя частота, Гц	Ширина полосы, дБ	Границы октавы, Гц	Средняя частота, Гц	Ширина полосы, дБ
Гостированные измерительные октавы					
22,4—45	31,5	13,5	16 —31,5	22,5	12
45 —90	63	16,5	31,5—63	45	15
90 —180	125	19,5	63 —125	90	18
180 —355	250	22,5	125 —250	180	21
355 —710	500	25,5	250 —500	360	24
710 —1400	1000	28,5	500 —1000	710	27
1400—2800	2000	31,5	1000—2000	1400	30
2800—5600	4000	34,5	2000—4000	2800	33
5600—11200	8000	37,5	4000—8000	5650	36
11200—22400	16000	40,5	8000—16000	11300	39
Измерительные октавы для фильтров старого выпуска					
12,5—25	17,5	11	18,8—37,5	26,5	12,8
25 —50	35	14	37,5—75	53	15,8
50 —100	70	17	75 —150	105	18,8
100 —200	140	20	150 —300	210	21,8
200 —400	280	23	300 —600	425	24,8
400 —800	560	26	600 —1200	850	27,8
800 —1600	1120	29	1200—2400	1700	30,8
1600—3200	2240	39	2400—4800	3400	33,8
3200—6400	4500	35	4800—9600	6800	36,8
6400—12800	9000	38	9600—19200	13600	39,8
12800—25600	18000	41			

¹ Средние частоты определены как среднегеометрические.

В табл. 2.2 даны средние частоты третьоктавных полос ($\Delta f_{1/3окт}$) фильтров, широко применяемых в измерительной электроакустической аппаратуре. Границы третьоктавных полос по отношению к средней частоте полосы определяются отношениями $2^{-1/6} : 1 = 0,891$ и $1 : 2^{1/6} = 1,122$, а ширина полосы

$\Delta f_{1/3\text{окт}} = 0,231 f_{\text{ср}}$. В табл. 2.2 приведены величины ширины третьоктавных полос в герцах и в логарифмических единицах — в децибелах, т. е. $10 \lg \Delta f_{1/3\text{окт}}$. Последними часто пользуются при расчетах.

ТАБЛИЦА 2.2

Параметры третьоктавных полос¹

Измерительные фильтры				Нормализованные фильтры		
Границы полос, Гц	$f_{\text{ср}}, \text{Гц}^2$	$\Delta f_{1/3 \text{ окт}}$		$f_{\text{ср}}, \text{Гц}^2$	$\Delta f_{1/3 \text{ окт}}$	
		Гц	дБ		Гц	дБ
16—20	17,9	4	6	16	3,6	5,6
20—25	22,4	5	7	20	4,6	6,6
25—31,5	28,0	6,5	8,1	25	5,8	7,6
31,5—40	35,5	8,5	9,3	31,5	7,3	8,6
40—50	44,7	10	10	40	9,2	9,6
50—63	56,1	13	11,1	50	11,5	10,6
63—80	71,0	17	12,3	63	14,5	11,6
80—100	89,4	20	13	80	18,5	12,6
100—125	112	25	14	100	23	13,6
125—160	141	35	15,4	125	29	14,6
160—200	179	40	16	160	36,5	15,6
200—250	224	55	17	200	46	16,6
250—315	280	65	18,1	250	58	17,6
315—400	355	85	19,3	315	73	18,6
400—500	447	100	20	400	92	19,6
500—630	561	130	21,1	500	116	20,6
630—800	710	170	22,3	630	146	21,6
800—1 000	894	200	23	800	183	22,6
1 000—1 250	1 120	250	24	1 000	230	23,6
1 250—1 600	1 410	350	25,4	1 250	290	24,6
1 600—2 000	1 790	400	26	1 600	365	25,6
2 000—2 500	2 240	500	27	2 000	460	26,6
2 500—3 150	2 800	650	28,1	2 500	580	27,6
3 150—4 000	3 550	850	29,3	3 150	730	28,6
4 000—5 000	4 470	1 000	30	4 000	920	29,6
5 000—6 300	5 610	1 300	31,1	5 000	1 160	30,6
6 300—8 000	7 100	1 700	32,3	6 300	1 460	31,6
8 000—10 000	8 940	2 000	33	8 000	1 830	32,6
10 000—12 500	11 200	2 500	34	10 000	2 300	33,6
12 500—16 000	14 100	3 500	35,4	12 500	2 900	34,6
16 000—20 000	17 900	4 000	36	16 000	3 650	35,6
20 000—25 000	22 400	5 000	37	20 000	4 600	36,6

¹ Приведены нормализованные параметры третьоктавных полос, так как десятикратный интервал содержит 3,322 октавы, а не 31/3. Величины средних частот и ширина полосы для удобства пользования несколько округлены.

² Эти частоты определены как средние геометрические.

В логарифмическом масштабе пользуются следующими соотношениями между частотами в герцах и в единицах длины:

1) для равномерного построения частотных зависимостей (предпочтительный ряд):													
$f, \text{Гц}$		100	112	125	140	160	180	200	224	250	280	315	
ед. длины		0	0,5	1	1,5	2	2,5	3	3,5	4	4,5	5	
$f, \text{Гц}$		355	400	450	500	560	630	700	800	900	1000		
ед. длины		5,5	6	6,5	7	7,5	8	8,5	9	9,5	10		

2) для неравномерного:

$f, \text{Гц}$	100	120	140	160	180	200	225	250	275	300	350	400
ед. длины	0	0,8	1,5	2,0	2,6	3,0	3,5	4,0	4,4	4,8	5,5	6,0
$f, \text{Гц}$	450	500	550	600	650	700	800	900	1000			
ед. длины	6,5	7,0	7,4	7,8	8,1	8,4	9,0	9,5	10,0			

Здесь даны интервалы для диапазона 100—1000 Гц. Для частотных диапазонов 10—100, 1000—10 000 и 10 000—100 000 Гц эти интервалы по оси частот соответственно составляют 0,1; 10 и 100 от приведенных выше интервалов для диапазона 100—1000 Гц.

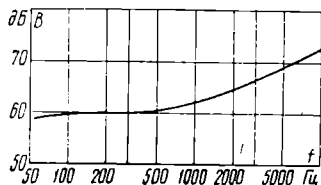


Рис. 2.7. Огибающая эквивалентного дискретного спектра для белого шума

В силу дискретности восприятия слух как бы превращает сплошной спектр в дискретный, состоящий из конечного числа составляющих по числу критических полосок слуха, охватывающих частотный спектр звука (шума). Поэтому для получения стабильного шума в практике используют дискретный спектр, состоящий из тональных составляющих. На рис. 2.7 приведена огибающая дискретного спектра, заменяющего измерительный шум со сплошным спектром типа белого шума.

Для получения шума с равномерным воздействием на слух следует внести коррекцию в спектр рис. 2.7, обратную спектральной огибающей шума.

2.3. ВОСПРИЯТИЕ ПО АМПЛИТУДЕ

Порог слышимости

Если волокно основной мембраны при своих колебаниях не достает до ближайшего к нему нервного окончания, то человек такой звук не слышит. Но как только при увеличении амплитуды колебаний волокна оно коснется нервного окончания, произойдет его раздражение. Нервное окончание сразу же начнет посылать электрические импульсы в слуховой центр мозга, и звук будет услышан. Этот скачкообразный переход из слышимого состояния в неслышимое и обратно называют порогом слышимости. Абсолютная величина слухового ощущения на пороге слышимости невелика, но все же имеет вполне конечное значение.

Величина порога слышимости зависит от частоты. На рис. 2.8 приведены эти зависимости, причем по оси ординат для удобства отложены уровни зву-

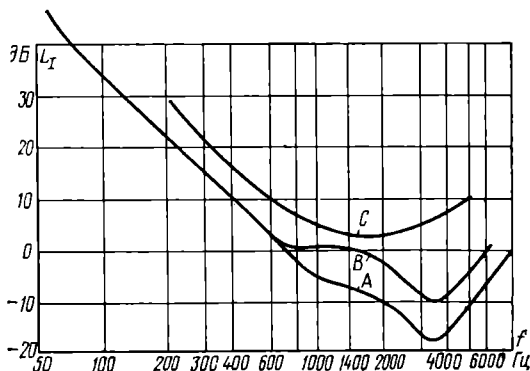
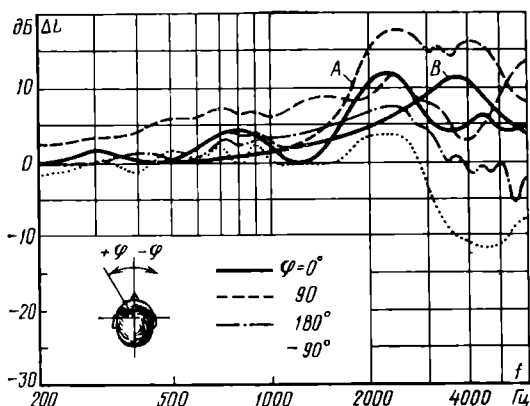


Рис. 2.8. Частотная зависимость уровней порога слышимости: А — для бинаурального слушания, когда давление создается множеством источников звука, беспорядочно расположенных в горизонтальной плоскости вокруг головы (диффузный порог); В — для бинаурального слушания, когда давление создается источником звука, расположенным на некотором расстоянии перед слушателем (фронтальный порог); С — для моноаурального слушания, когда давление в ушной раковине создается с помощью телефона (порог по давлению)

кового давления. Часто приходится иметь дело с различными зависимостями порога слышимости от частоты (см. рис. 2.8). Разница между ними обусловлена различием в условиях измерений порога. Так, например, кривая *B* на рис. 2.8 дана для случая измерения уровня тона в точке звукового поля до размещения в ней головы человека и при слушании двумя ушами (этот порог называется бинауральным порогом по полю). Кривая *C* дает порог слышимости для уровней звука, измеренных около ушной раковины при слушании через телефон (моноуральный порог по давлению). Кривая *B* представляет порог для фронтального падения звуковой волны (фронтальный порог), кривая *A* — для всестороннего (диффузный порог).

На рис. 2.9 приведена частотная зависимость разности уровней звукового давления в свободном поле, измеренном в точке, соответствующей центру головы.

Рис. 2.9. Частотная зависимость уровней звукового давления у входа в слуховой канал и звукового давления в свободном поле, измеренного в точке, соответствующей центру головы: *A* — кривая разности уровней звукового давления у барабанной перепонки и звукового давления в поле для $\varphi=0^\circ$; *B* — кривая разности уровней звукового давления у барабанной перепонки и звукового давления у входа в слуховой канал. Параметр кривых — угол между направлением звука и срединной плоскостью головы



ловы, и в слуховом канале. На рис. 2.10 приведена частотная зависимость разности уровней порога слышимости при бинауральном и моноуральном слушании.

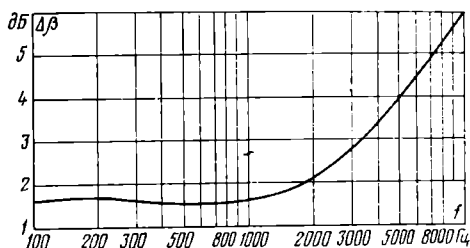


Рис. 2.10. Частотная зависимость разности уровней порога слышимости при моноуральном и бинауральном слушании

Пороги слышимости имеют значительный разброс, в первую очередь, из-за возрастных изменений, а также из-за условий работы. Статистическое исследование порогов слышимости у посетителей Всемирной выставки в Нью-Йорке в

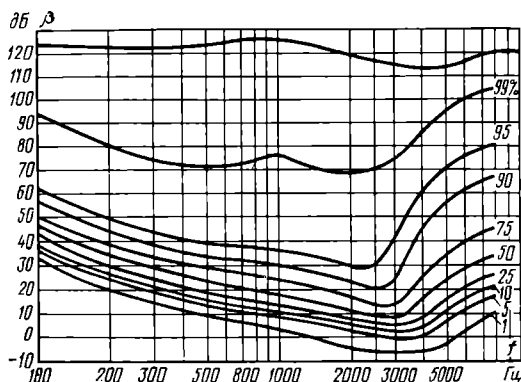


Рис. 2.11. Статистическая частотная зависимость порога слышимости при бинауральном слушании в свободном поле для случая фронтального падения звуковой волны. Параметр кривых — процент лиц, пороги которых лежат ниже величины параметра

1931 г. дало результаты, приведенные на рис. 2.11. Пороги слышимости определялись для бинаурального слушания в свободном поле в случае фронтального падения звуковой волны.

Уровень ощущения

При плавном увеличении интенсивности звука выше пороговой слуховое ощущение нарастает скачками, по мере увеличения числа возбужденных нервных окончаний.

Величины скачков $\Delta I/I_0$ могут быть найдены из рис. 2.12, на котором приведены величины едва заметных относительных изменений интенсивности звука в зависимости от частоты тона. Из рисунка следует, что на высоких и средних уровнях порог заметности изменения интенсивности звука составляет 0,05 на частоте 1000 Гц; 0,15 — на 100 Гц и 0,12 — на 8000 Гц. На низких уровнях ощущения эти величины значительно больше: для уровня 30 дБ они соответственно составляют 0,6 на частоте 100 Гц; 0,35 — на 1000 Гц и 0,4 — на 8000 Гц. Следовательно, порог заметности изменения интенсивности на высоких и средних уровнях ощущения составляет от 0,2 до 0,6 дБ, на низких уровнях он доходит до нескольких децибел, а в среднем составляет 1 дБ.

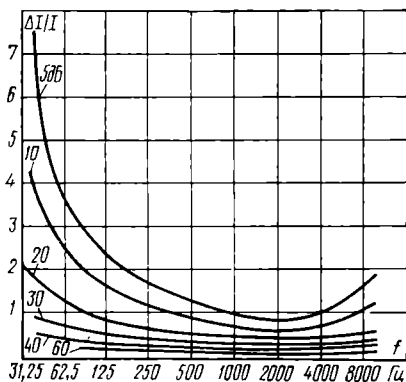


Рис. 2.12. Частотная зависимость порога заметности относительно изменения интенсивности тона $\Delta I/I$. Параметр кривых — уровень ощущения тона

Увеличение уровня интенсивности тона, в конце концов, приводит к появлению ощущения боли, наступает болевой порог. Величина болевого порога на максимуме составляет по интенсивности около 1 Вт/м^2 , тогда как минимальный порог слышимости составляет на частоте 3000 Гц около 10^{-13} Вт/м^2 , т. е. динамический диапазон по уровням звука от порога слышимости до болевого порога равен 130 дБ.

Между болевым порогом и порогом слышимости получается несколько сотен элементарных скачков ощущения, причем на низких и высоких частотах их значительно меньше, чем на средних. Дискретность восприятия слуха по частоте

те и амплитуде дает около 22 000 элементарных градаций по всей области слухового восприятия, ограниченной снизу порогом слышимости, сверху — болевым порогом и охватывающей диапазон частот от 20 до 20 000 Гц.

Вебер и Фехнер сформулировали следующий закон ощущения звука: одинаковые относительные изменения раздражающей силы вызывают одинаковые приращения слухового ощущения, т. е. слуховое ощущение пропорционально логарифму раздражающей силы: $E = a \lg(I/I_{п.с})$, где $I_{п.с}$ — величина раздражающей силы на пороге слышимости.

Величину E называют уровнем ощущения. При $a=10$ уровень ощущения выражается в децибелах: $E = 10 \lg(I/I_{п.с})$.

Уровень ощущения $E = L_I - L_{п.с}$, где $L_{п.с}$ — уровень порога слышимости; $L_I = 10 \lg I + 120$ — уровень интенсивности звука, Вт/м². Уровень ощущения представляет собой уровень над порогом слышимости, т. е. относительный уровень.

Громкость и уровень громкости

Уровень ощущения неточно характеризует субъективное ощущение. Введено понятие уровня громкости. Условились за уровень громкости любого звука (или шума) принимать уровень в децибелах равногромкого с ним чистого тона 1000 Гц. За единицу уровня громкости принят фон, поэтому L_G , фон = $= L_{1\,000\text{ Гц}}$, дБ при $G_x = G_{1\,000\text{ Гц}}$, где G_x и $G_{1\,000\text{ Гц}}$ — громкости испытуемого звука и тона 1000 Гц. Чтобы определить уровень громкости какого-либо звука, достаточно взять чистый тон 1000 Гц и изменять его уровень до тех пор, пока его громкость не будет на слух одинаковой с громкостью определяемого звука. При этом искомая величина уровня громкости этого звука будет численно равна уровню эталонного тона (1000 Гц). На рис. 2.13 приведены кривые равной громкости, определенные для чистых тонов при слушании двумя ушами.

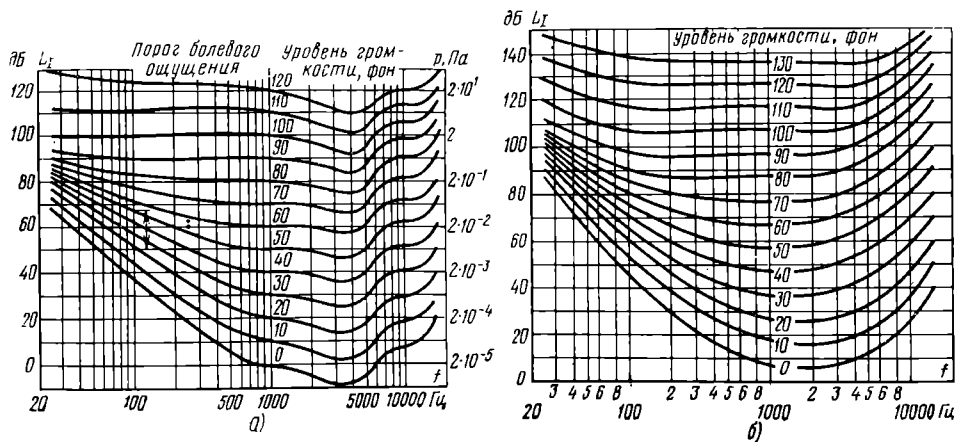


Рис. 2.13. Кривые равной громкости для бинаурального (а) и моноурального (б) слушания. Параметр кривых — уровень громкости

Пример. Задан чистый тон с частотой 100 Гц и уровнем звукового давления, равным 60 дБ. Найти его уровень громкости при слушании в свободном поле. Линии, соответствующие абсциссе 100 Гц и ординате 60 дБ, на рис. 2.13а пересекаются между кривыми с параметрами 30 и 40 фон. Следовательно, уровень громкости определяемого тона равен 35 фон.

По мере повышения уровня кривые равной громкости приближаются к прямой линии, параллельной оси частот, т. е. уровни громкости и звукового давления сближаются.

Если слушание радиопередачи ведется в среднем на уровне громкости 80 фон, то при этом почти все частотные составляющие звучат одинаково громко независимо от их положения в частотном диапазоне. При уменьшении усиления приемника на 30 дБ, если хотим, чтобы громкость низкочастотных составляющих около 100 Гц осталась в том же соотношении с громкостью средних частот, необходимо поднять их уровень на 17 дБ (см. рис. 2.13а). Поэтому в радиоприемниках высшего класса для слушания на низких уровнях вводится соответствующая коррекция на низких частотах.

Когда измеряют высокие уровни громкости шумов, то частотная характеристика измерителя шумов (шумомера) берется близкой к равномерной, что соответствует субъективному восприятию на высоких уровнях громкости (см. рис. 2.13а, кривые от 80 фон и выше). Но когда измеряют уровни громкости шумов низкого уровня, то показания шумомера будут близкими к субъективному ощущению громкости только в случае, если в шумомере будет введена коррекция, учитывающая то, что при этом слух воспринимает низкие частоты хуже, чем средние. Поэтому в шумомерах при измерении низких уровней громкости шумов вводятся коррекции на низких частотах в виде снижения усиления в сторону низких частот. Так, если измерение проводится на уровне громкости около 50 фон, то на частоте 100 Гц усиление должно быть снижено по сравнению с частотой 1000 Гц на 17 дБ (см. рис. 2.13а, кривая 50 фон). Вследствие этого в шумомерах имеются три вида частотных характеристик: шкала *A* — для уровней громкости около 40 фон (пользуются для измерения уровней в пределах 30—55 фон); шкала *B* для уровней громкости около 70 фон (пользуются для измерения уровней в пределах 55—85 фон) и шкала *C* для уровней громкости выше 85 фон.

Однако шумомеры дают правильные показания уровня громкости только для чистых тонов или узкополосных шумов, а для спектров, состоящих из нескольких составляющих, и для широкополосных спектров их показания соответствуют уровню звукового давления с поправкой по кривой равной громкости без учета взаимодействия составляющих (см. § 2.3). Поэтому, чтобы не

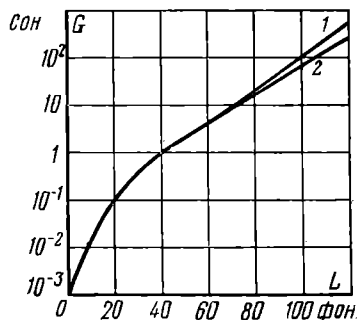


Рис. 2.14. Зависимость громкости тона (в сонах) от уровня громкости (в фонах):
1 — экспериментальная; 2 — нормализованная

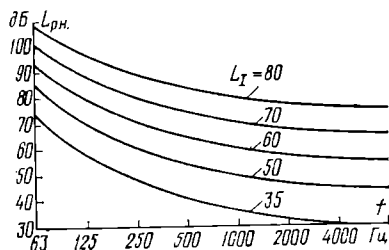


Рис. 2.15. Кривые равной неприятности: частотные зависимости уровня звукового давления тона одинаково неприятного с тоном 1000 Гц заданного уровня. Параметр кривых — уровень тона 1000 Гц

смешивать эти показания с действительным уровнем громкости, такие показания шумомера указывают не в фонах, а в дБА (т. е. для шкалы *A*). Соответствующий уровень называют уровнем звука в дБА.

Уровень громкости хотя и характеризует субъективное восприятие звука по уровню, но масштаб уровней не соответствует действительному субъективному масштабу. Например, увеличение уровня громкости на 10 фон в диапазоне уровней выше 40 фон соответствует субъективному ощущению увеличения громкости вдвое. Кстати, каждая градация громкости в музыке больше или меньше соседней вдвое (форте-фортиссимо, пиано-пианиссимо и т. п.). На рис. 2.14 приведена зависимость между уровнем громкости в фонах и громкостью в сонах, измеренная для чистых тонов. Сон — единица громкости, равная громкости тона с уровнем громкости 40 фон. В табл. 2.3 приведены измеренные величины уровня громкости и громкости для ряда наиболее типовых звучаний.

ТАБЛИЦА 2.3

Средний уровень громкости наиболее часто встречающихся звуков и шумов

Источник шума и место его измерения	Уровень громкости, фон	Громкость, сон
1	2	3
<i>Шумы вне помещений</i>		
Шум в кабине самолета	128—130	875—1400
Авиационный мотор на расстоянии 5 м	116—120	346—556
Громкий автомобильный гудок на расстоянии 8 м	95—100	57—88
Электропоезд на эстакаде на расстоянии 6 м	90	38
Шум в поезде метро во время движения	85—90	25—38
Автобус (полный ход) на расстоянии 5 м	85—88	25—32,2
Трамвай на расстоянии 10—20 м	80—85	17,1—25
Троллейбус на расстоянии 5 м	77	13,5
Грузовой автомобиль в городе на расстоянии 5—20 м	60—75	4,35—11,4
Легковой автомобиль в городе на расстоянии 5—20 м	50—65	2,2—5,87
Большая демонстрация:		
с оркестром на расстоянии 5 м	96	62
с пением на расстоянии 5 м	60—72	4,35—9,12
Свисток милиционера на расстоянии 20 м	70	7,95
Улица с интенсивным движением и трамваем	75—80	11,4—17,1
Шумная улица без трамвайного движения	60—75	4,35—11,4
Обычный средний шум на улице	55—60	3,08—4,35
То же, в момент затишья днем	40	0,975
Тихая улица (без движения транспорта)	30—35	0,36—0,62
Тихий сад	20	0,097
<i>Производственные шумы</i>		
Удары молота по стали, клепальная машина на расстоянии 2—4 м	110—113	215—288
Котельные цехи	100—103	88—116
Общий шум в ткацком цехе	96—100	62—88
Деревообрабатывающая фабрика (заготовительные, карусельные, лесопильные цехи)		
Заводы: электромеханические, автомобильные, штамповочные	96—98	62—74
Цехи резиновой промышленности (валячочные)	90—92	38—45
Вентилятор в помещении	90—92	38—45
Вентиляционное оборудование у выхода отверстия вентиляционного канала сечением 1X1 м и длиной около 100 м	90—95	38—57
	50	2,2
<i>Театры, школы, больницы</i>		
Оркестр	80—100	17,1—88
Зал при массовых сценах	75—95	11,4—57
Аплодисменты	60—75	4,35—11,4
Громкая музыка по радио	80	17,1
Радиоцентр (студия во время исполнения соло)	40—50	0,98—2,2
Актовые залы в школах во время перерыва	55—62	3,08—4,65
Аудитории при ответах учащихся	30—32	0,36—0,46
Библиотеки	25—30	0,2—0,36
Больницы	20—30	0,1—0,36

Окончание табл. 2.3

1	2	3
<i>Учреждения</i>		
Машинописное бюро (незаглушенное) на восемь маши-	60—75	4,35—11,4
нисток	65—70	5,87—7,95
Шумное собрание		
Разговор на расстоянии 1 м:		
громкий	65—70	5,87—7,95
обычный	55—60	3,08—4,35
Громкий разговор по телефону	55	3,08
Канцелярия при посетителях	40—45	0,98—1,5
Коридоры	35—40	0,62—0,98
Бухгалтерия без посетителей	30—35	0,36—0,62
Общественная столовая	50—52	2,2—2,51
Кухня при общественной столовой	48—50	1,92—2,2
<i>Жилые помещения</i>		
Комната шумная	40—50	0,98—2,2
Столовая во время обеда	45—48	1,5—1,92
Кухня на одну семью	25—28	0,2—0,29
Комната тихая	25—30	0,2—0,36
Кабинет при одном работающем	20—25	0,1—0,2
Разговор трех человек в обычной комнате	45—50	1,5—2,2
Шопот средней громкости на расстоянии 1 м	20	0,1
Тикание часов на расстоянии 0,5 м	30	0,36
<i>Степени музыкальной громкости</i>		
Форте-фортиссимо	100	88
Фортиссимо	90	38
Форте	80	17,1
Меццо-форте	70	7,95
Меццо-пиано	60	4,35
Пиано	50	2,2
Пьяниссимо	40	0,98
Пиано-пьяниссимо	30	0,36
Порог слухового ощущения	0	0

¹ Данные громкости определены для чистых тонов.

Для $L_G \geq 40$ фон зависимость между громкостью G в тонах и уровнем громкости в фонах для чистых тонов может быть выражена в следующем приближенном виде: $G = 2^{0,1(L_G - 40)}$.

Заметим, что по этой формуле и табл. 2.3 получаются несколько заниженные значения громкости, особенно для ее больших значений, по сравнению с экспериментальными данными рис. 2.14.

Введено понятие кривых равной неприятности. Они представляют собой частотную зависимость уровней интенсивности тона или узкополосного шума, субъективно ощущаемых с одинаковой неприятностью. Эти уровни определяют путем подбора такого уровня чистого тона 1000 Гц, который будет слышаться одинаково неприятно с заданным уровнем тона (или шума) на заданной частоте. На рис. 2.15 приведены кривые неприятности для различных уровней (параметром кривых служит уровень тона 1000 Гц). Для широкополосных шумов кривые равной неприятности соответствуют уровням шума в полосах частотных групп. Для удобства эти кривые пересчитывают в октавные уровни и относят к средней частоте октавы. Соответствующие кривые названы предельными спектрами. Для каждого предельного спектра определяют общий уровень громкости, измеренный шумомером по шкале А. В табл. 2.4 приведены предельные спектры (ПС) для разных уровней. Число при них означает уровень

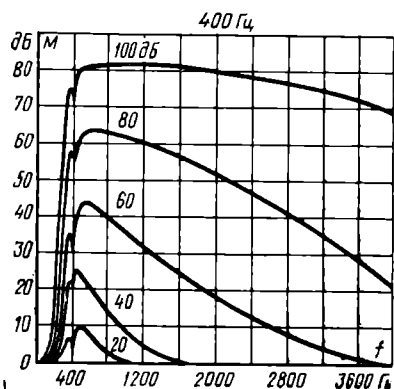
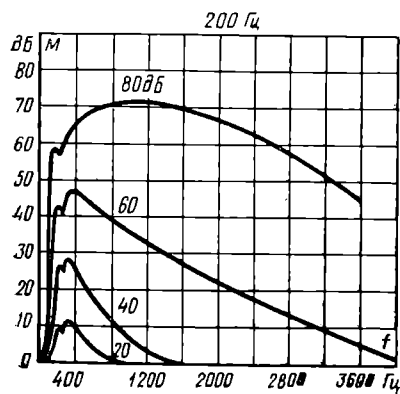
ТАБЛИЦА 2.4
Предельные спектры шумов по уровням звукового давления

Тип	Предельные спектры шумов, дБ, для среднегеометрических частот октавных полос, Гц								Уровень, дБА
	63	125	250	500	1 000	2 000	4 000	8 000	
ПС-20	51	39	31	24	20	17	14	13	25
ПС-25	55	44	35	29	25	22	20	18	30
ПС-30	59	48	40	34	30	27	25	23	35
ПС-35	63	52	45	39	35	32	30	28	40
ПС-40	67	57	49	44	40	37	35	33	45
ПС-45	71	61	54	49	45	42	40	38	50
ПС-50	75	66	59	54	50	47	54	43	55
ПС-55	79	70	63	58	55	52	50	49	60
ПС-60	83	74	68	63	60	57	55	54	65
ПС-65	87	78	73	68	65	62	60	59	70
ПС-70	89	82	77	73	70	68	66	65	75
ПС-75	94	87	82	78	75	73	71	70	80
ПС-80	99	92	88	83	80	78	76	74	85

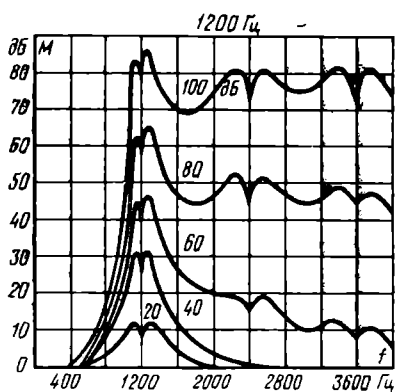
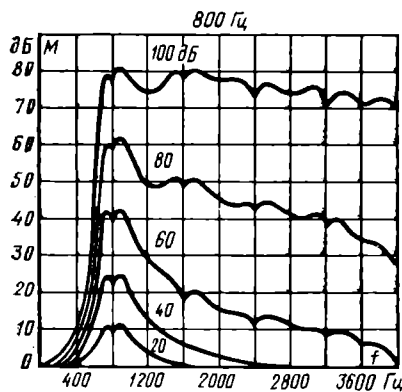
ТАБЛИЦА 2.5
Санитарные нормы по уровню шумов для учреждений связи

Тип помещения	Норма
Для сна и отдыха	ПС-35
Для умственной работы без собственных источников шума (конструкторские бюро, комнаты программистов, лаборатории для теоретических работ и обработки экспериментальных данных)	ПС-45
Для речевой связи и телефонной связи (диспетчерские пункты, пульта управления, кабины наблюдения, контрольно-справочная служба), ЦУС, ОУС с малоомощным оборудованием, лаборатории, фотолаборатории, аккумуляторные и т. п.	ПС-50
Для конторского труда с источниками шума (арифмометры), для точной сборки, цеховой администрации, а также помещения, где источником шума являются люди (коммутационные залы МТС, справочные залы, АТС, переговорные пункты, бюро ремонта, служба приема телеграмм по телефону), коммутаторы с координатной системой (автоматные залы, узлы входящих и исходящих сообщений, автоматные и стативные залы АТС, цехи прямых соединений и абонентского телеграфа), залы с аппаратурой уплотнения (релейные, воздушно-кабельные, линейно-аппаратные цехи, МТС, цехи КРР АТС, тонального телеграфа), залы для обработки письменной корреспонденции, телеграмм, операционные залы, для кроссов, мастерские для регулировки реле и ДШИ, лаборатории без собственных источников шума	ПС-55
Помещения пультов, кабин наблюдения и дистанционного управления, не требующие речевой связи, а также помещения с телеграфными аппаратами, аппаратные и коммутационные залы ЦТ, фотоаппаратные, помещения с коммутационным оборудованием для декадно-шаговой системы МТС и ЦТ (автоматные и стативные залы МТС, цехи прямых соединений и абонентского телеграфа), ОУС с мощным оборудованием, электроцехи с полупроводниковыми преобразователями тока	ПС-60
Декадно-шаговая система и машинная АТС (автоматные залы и узлы входящих и исходящих сообщений)	ПС-65
Лаборатории с источниками шума, а также помещения шумных счетно-вычислительных машин, помещения перфораторных МТС и регулировочных мастерских телеграфных аппаратов	ПС-70
Производственные помещения (на рабочих местах и на территории предприятий): электроцехи с электромашинными преобразователями тока (генераторные, вентиляционные, насосные, кондиционеры), дизельные, гаражи, механические мастерские	ПС-80

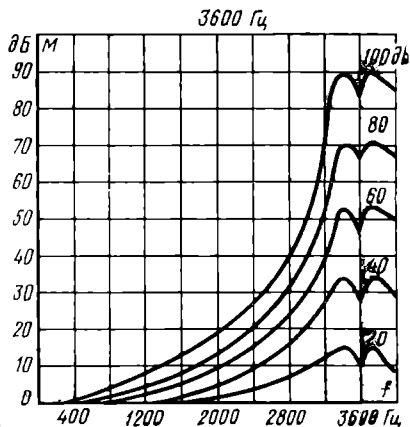
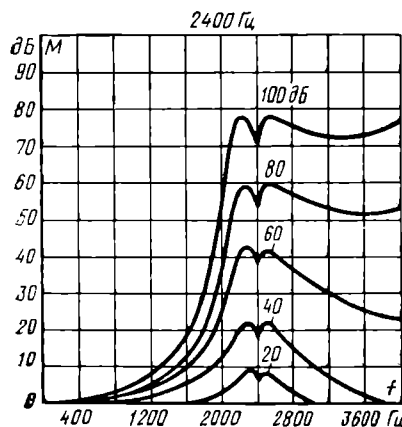
Примечание. ЦУС — центральная усилительная станция; ОУС — оконечная усилительная станция; АТС — автоматическая телефонная станция; ЦТ — центральный телеграф; МТС — машинная телефонная станция; КРР — кросс-распределительный зал; ДШИ — декадно-шаговый искатель.



а)



б)



в)

Рис. 2.16. Кривые маскировки для ряда частот тонов и их уровней. По оси абсцисс отложена частота маскируемого тона, по оси ординат — величина маскировки. Параметр кривых — уровень ощущения маскирующего тона, дБ. Вверху каждого графика указана частота маскирующего тона

шума в октавной полосе со средней частотой 1000 Гц. В этой же таблице приведены суммарные уровни громкости всего шума для данного спектра. (Эти кривые используются при определении уровня шума по санитарным нормам.) В табл. 2.5 даны санитарные нормы для ряда учреждений и территорий.

Пример. Найти уровень шума для октавных полос со средними частотами 125 и 8000 Гц, одинаково неприятные со звучанием полосы частот со средней частотой 1000 Гц, имеющей уровень интенсивности 60 дБ. Из табл. 2.5 для ПС-60 находим, что эти уровни соответственно равны 74 и 54 дБ.

Пример. Найти уровни тонов 125 и 8000 Гц, звучащих одинаково неприятно с тоном 1000 Гц, имеющим уровень 60 дБ. Из рис. 2.15 находим для кривой 60 дБ значения таких уровней: 80 и 55 дБ.

Эффект маскировки

В условиях тишины слышны писк комара, жужжание мухи, тиканье часов и другие звуки, а в условиях шума и помех можно не услышать даже громкий разговор. Другими словами, в условиях шума и помех порог слышимости для приема слабого звука возрастает. Это повышение порога слышимости называют маскировкой. Величина маскировки определяется величиной повышения порога слышимости для принимаемого звукового сигнала $M = L_{п.с.ш} - L_{п.с.т}$, где $L_{п.с.т}$ и $L_{п.с.ш}$ — уровни порога слышимости в тишине и при помехах.

При повышении порога слышимости соответственно изменяется и уровень ощущения. В этом случае уровень ощущения $E_{ш} = 10 \lg(I/I_{п.с.ш}) = L_I - L_{п.с.ш} = E_t - M$, где E_t — уровень ощущения того же звука в тишине. Уровень ощущения звукового сигнала изменяется при изменении уровня шумов и помех даже при неизменном уровне сигнала.

Низкочастотные тоны сильнее маскируют высокочастотные, чем наоборот. На рис. 2.16 приведены кривые маскировки для ряда частот и уровней тонов. При разности частот около нескольких десятков герц величина маскировки начинает уменьшаться (из-за биений), и при равенстве частот она имеет минимум. Точно такие же минимумы наблюдаются и на частотах, кратных частоте маскирующего тона. (Это вызывается появлением биений между маскируемым тоном и субъективными гармониками маскирующего тона.)

Пример. Мешающий тон имеет частоту 400 Гц и уровень 80 дБ. Найти минимальный уровень для тона 1200 Гц, который может быть услышан на фоне мешающего тона. Из кривой рис. 2.16 для параметров 400 Гц и 80 дБ находим для частоты 1200 Гц величину маскировки, равную 60 дБ. Так как для частоты 1200 Гц порог слышимости в тишине (см. кривую В на рис. 2.8) равен 0 дБ, порог слышимости в шуме будет равен 60 дБ. Поэтому уровень интенсивности тона 1200 Гц должен быть не менее 60 дБ. Если же мешающий тон будет иметь частоту 2400 Гц и уровень 80 дБ, то величина маскировки на 1200 Гц (см. кривые на рис. 2.16 для параметров 2400 Гц и 80 дБ) будет равна 5 дБ. Следовательно, можно не считаться с маскировкой от действия тона 2400 Гц.

На рис. 2.17а приведены кривые маскировки узкополосной шумовой помехи. Кривые отличаются от тональных только отсутствием провала из-за биений. На рис. 2.17б приведены кривые маскировки для широкополосного шума флуктуационного типа. В этом случае величина маскировки чистого тона определяется интенсивностью шумов, попадающих в одну и ту же критическую полосу слуха: порог слышимости для тона численно равен интенсивности этих шумов. Для шума с достаточно равномерным спектром и уровнем выше 20 дБ пороговая интенсивность $I_{п.с.ш} = J_f \Delta f_{кр}$, где J_f — спектральная плотность на частоте f ; $\Delta f_{кр}$ — ширина критической полосы.

Если взять белый шум, то его общая интенсивность будет превышать интенсивность в каждой из критических полосок. Например, для равномерного (белого) шума со спектральной плотностью, равной 10 единицам, в диапазо-

не до 4000 Гц общая интенсивность будет составлять $10 \cdot 4000 = 40\,000$ единиц, а в критической полоске около 1000 Гц интенсивность будет $10 \cdot 62 = 620$ еди-

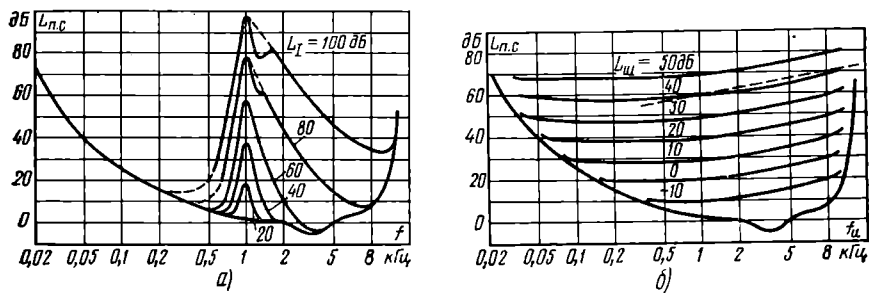


Рис. 2.17. Кривые порога слышимости тона при маскировке узкополосным (а) и белым (б) шумами. Параметр кривых — уровень интенсивности, дБ

ниц ($\Delta f_{кр} = 62$ Гц). Следовательно, уровень порога слышимости на частоте 1000 Гц будет на $10 \lg 40\,000/620 = 18,1$ дБ ниже общего уровня интенсивности.

Громкость сложных звуков

Если тональные или шумовые составляющие попадают в одну и ту же частотную группу, то их суммирование происходит по интенсивности. Громкость такого сложного звука определяется суммарной интенсивностью, т. е. суммарный уровень для двух составляющих с одинаковым уровнем будет на 3 дБ выше и на столько же увеличится уровень громкости, если уровень составляющих выше 70 дБ. При более низких уровнях следует считаться с кривыми равной громкости.

Пример. Заданы два узкополосных шума, находящихся в частотной группе 200—300 Гц, уровни интенсивности их равны 60 дБ. Следовательно, их уровни громкости равны 53 фон (см. рис. 2.13а), а громкости 2,40 сон (см. табл. 2.3). Суммарный уровень интенсивности будет равен 63 дБ. Уровень громкости такого сложного звука будет равен 59 фон (см. рис. 2.13а), что соответствует громкости 3,73 сон (см. табл. 2.3). Если бы шумы находились в полосе около 1000 Гц, то соответственно табл. 2.3 уровни громкости их были бы равны 60 фон, громкости 4 сон, суммарные уровни интенсивности и громкости 63 фон и суммарная громкость 4,92 сон.

Если несколько тонов или узкополосных шумов расположены по частоте так далеко друг от друга, что их взаимной маскировкой можно пренебречь, то их суммарная громкость будет равна сумме громкостей каждой из составляющих. Так, например, если взять два тона с частотами 200 и 2000 Гц с громкостью 8 сон каждый, т. е. имеющих уровни громкости по 70 фон (см. табл. 2.3), то суммарная громкость этих тонов будет равна 16 сон, т. е. суммарный уровень громкости такого сложного звука будет равен 80 фон (см. табл. 2.3), а не 73 фон, как это следовало бы из простого сложения интенсивностей.

Если составляющие сложного звука расположены по частоте близко друг к другу и наблюдается взаимная маскировка между ними (см. рис. 2.16), то громкость такого сложного звука будет меньше суммы громкостей всех составляющих.

Если расширять спектр шума, оставляя спектральную плотность постоянной, то в пределах частотной группы громкость будет определяться суммарной

интенсивностью, так как слух в этих пределах интегрирует интенсивность. Если расширить спектр вдвое, то суммарная интенсивность увеличится вдвое (уровень интенсивности увеличится на 3 дБ), и если полоса частот находится

недалеко от частоты 1000 Гц, то уровень громкости возрастет более чем на 3 фон, но менее, чем на 10 фон, что получается при воздействии разнесенных по частоте полосок частот. Поэтому для широкополосного шума уровень громкости выше уровня его интенсивности. На рис. 2.18 дана экспериментальная зависимость между уровнем интенсивности тона с частотой 1000 Гц, уровнем белого шума (БШ) и уровнем шума с одинаковой интенсивностью в каждой частотной группе (равномерно воздействующий шум — РВШ), с одной стороны, и их уровнями громкости, — с другой. Там же нанесена шкала громкостей. Как и предполагается, для тона уровень громкости и уровень интенсивности совпадают друг с другом. Уровень громкости белого шума получается выше уровня его интенсивности на 7—10 фон. Для равномерно воздействующего шума это приращение составляет около 13—17 фон. Для сложных спектров шумов расчет громкости дан в [2.2].

При сложении основного и запаздывающего (например, отраженного) речевых сигналов наблюдается приращение уровня громкости речи. При этом для слабых сигналов (до $L_G = 55$ фон) это приращение для запаздывания на 20 мс и более составляет около 3 фон, т. е. такое, какое должно быть при сложе-

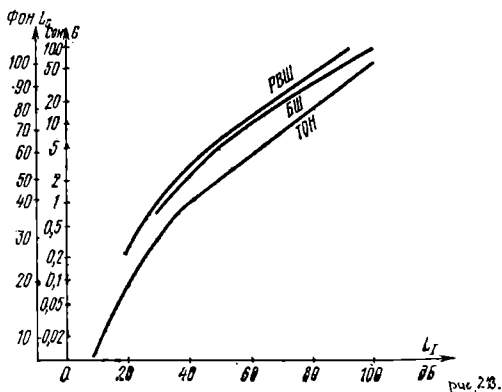
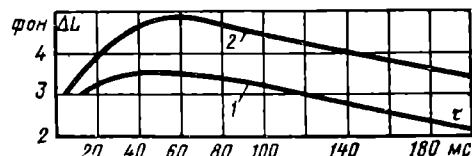


Рис. 2.18. Зависимость громкости тона 1 кГц, белого шума (БШ) и равномерно воздействующего шума (РВШ) от уровня звукового давления

Рис. 2.19. Приращение уровня громкости в зависимости от величины запаздывания при сложении речевого сигнала с его запаздывающим повторением:

1 — уровень громкости каждого из сигналов 55 фон; 2 — уровни громкости 65—75 фон



нии некоррелированных сигналов. Для сигналов с уровнями громкости выше 55 фон приращение уровня громкости получается до 5 фон при запаздывании около 50 мс. При больших запаздываниях приращение снижается до 3 фон, т. е. как при энергетическом сложении сигналов. На рис. 2.19 показаны кривые приращения уровня громкости речи от величины запаздывания отраженного звука.

2.4. ВРЕМЕННЫЕ ХАРАКТЕРИСТИКИ СЛУХА

По данным Гельмгольца и Флетчера в случае сложных колебаний, состоящих из нескольких частотных составляющих, попадающих в разные критические полосы слуха, слух не реагирует на взаимные фазовые сдвиги между составляющими, т. е. не реагирует на форму кривой. Так, например, звучание

сложных звуков типа

$$1) \sum_{k=1}^{10} \frac{(-1)^{k+1}}{2k-1} \sin(2k-1)\omega t \text{ и } 2) \sum_{k=1}^{10} \frac{1}{2k-1} \sin(2k-1)\omega t,$$

имеющих вид, представленный на рис. 2.20, различается на слух только из-за нелинейности слуха, появляющейся при уровнях громкости выше 60 фон.

При исчезновении раздражающей силы слуховое ощущение исчезает не сразу, а постепенно уменьшается до нуля. Этот эффект называют слуховым впечатлением. Время, в течение которого ощущение по уровню громкости па-

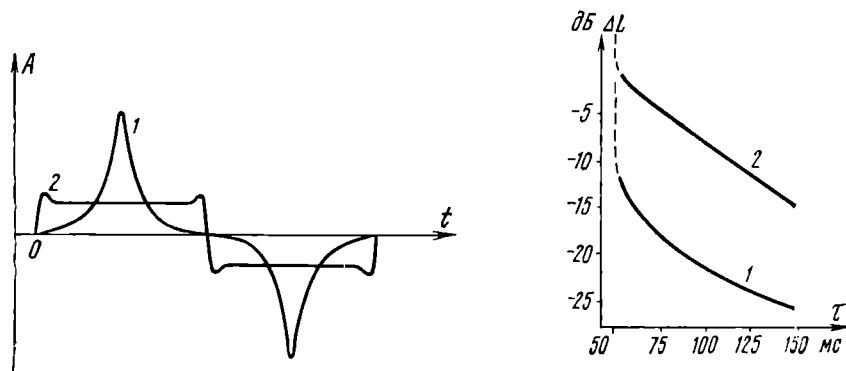


Рис. 2.20. Звуковые колебания, одинаково воспринимаемые слухом

Рис. 2.21. Зависимость между разностью уровней прямого и отраженного звуков и минимально необходимым временем запаздывания отраженного звука:

1 — для раздельного восприятия; 2 — для появления мешающего эха

дает на 8,7 фон, считается постоянной времени слуха. Величина этой постоянной времени зависит от ряда обстоятельств и даже от параметров воспринимаемого звука. В среднем она считается равной 150—200 мс.

Если к слушателю приходят два звука с длительностью менее 50 мс, но один из них запаздывает на время не более 50 мс, то оба звука всегда воспринимаются слитно. При запаздывании на время более 50 мс эти звуки могут восприниматься раздельно. Но если второй звук будет иметь уровень ниже первого, то он может приниматься слитно с первым или раздельно в зависимости от того, насколько уровень второго звука ниже уровня первого. На рис. 2.21 приведена зависимость между временем запаздывания и разностью уровней обоих звуков, при которых они воспринимаются раздельно (см. кривую 1). Если звуки исходят из одного источника звука, но один из них проходит больший путь, например из-за отражения от какого-либо препятствия, то возможность раздельного восприятия этих звуков называют эхом.

Пример. Слушатель находится между источником звука и отражающей стеной на расстоянии 17 м. Если коэффициент отражения звука от стены близок к единице, то интенсивность прямого звука будет в $51^2:17^2=9$ раз больше, чем отраженного звука. По уровню эта разница будет составлять $10 \lg 9 = 9,5$ дБ. Разность хода отраженного звука и прямого составит 34 м, поэтому отраженный звук будет запаздывать по отношению к прямому на $(34 \cdot 1000)/340 = 100$ мс. Из рис. 2.21 следует, что эхо будет заметно. А если источник звука будет находиться на расстоянии 3 м от слушателя, то разность уровней будет составлять $10 \lg [(3+2 \cdot 17)^2/3^2] = 21,8$ дБ. В этом случае это будет уже за пределами заметности.

Слуховое впечатление дает возможность сравнивать частоты двух тонов при быстром переключении с одного на другой и обнаруживать даже неболь-

шую разницу между частотами двух тонов и замечать небольшие изменения частоты тона.

Так называемая послемаскировка сигнала, вызываемая слуховым впечатлением, тем длительнее, чем выше уровень предшествующего сигнала. Послемаскировка звуков речи часто называется самомаскировкой, и величина маскировки для неискаженного спектра речи примерно равна -24 дБ, т. е. на 24 дБ ниже среднего уровня речи в каждой достаточно узкой полосе частот, т. е. если спектральный уровень речи в заданной полосе частот равен B_p , то порог слышимости будет $B_p + K_c - 24$, где K_c — критическая полоса частот, дБ. Поэтому уровень ощущения речи по отношению к среднему ее уровню даже в отсутствие шумов и помех только от самомаскировки речи будет составлять $E = (B_p + K_c) - (B_p - 24 + K_c) = 24$, т. е. не превышает 24 дБ.

Кроме самомаскировки, тот же эффект послемаскировки сказывается и на восприятии речи в других полосах частот.

Длительность установления тональности звука и его высоты определяется временем, равным $2-3$ периодам колебаний. На низких частотах это время составляет 30 мс, на высоких — доли миллисекунды.

2.5. ВОСПРИЯТИЕ ИМПУЛЬСОВ

Для тональных импульсов длительностью более 200 мс порог слышимости определяется так же, как и для непрерывного тона. Для длительности импульсов $t < 200$ мс порог слышимости зависит от отношения длительности импульса к 200 мс и определяется выражением $I_{п.с} = I_{п.п} 200/t$. Два коротких импульса воспринимаются одинаково громко, если это произведение одинаково для обоих импульсов. Для коротких повторяющихся импульсов порог слышимости падает с увеличением частоты повторений, и при частоте повторений, равной 200 Гц, порог слышимости импульсов равен порогу непрерывного тона.

Для узкополосных шумовых импульсов (с шириной спектра уже или равной ширине частотной группы) справедливы все соотношения, определенные для тональных импульсов.

Для широкополосных шумовых импульсов граничная длительность импульса составляет только 50 мс, т. е. шумовые импульсы длительностью более 50 мс воспринимаются так же, как и непрерывный шум. При уменьшении длительности в 10 раз, т. е. до 5 мс, порог слышимости снижается не на 10 дБ, как для тональных импульсов, а всего на 7 дБ. Повторяющиеся импульсы сливаются в непрерывный шум при большем значении частоты повторений, чем для тональных импульсов.

Громкость тональных импульсов зависит от интенсивности импульса и его длительности. На рис. 2.22 приведена зависимость разности уровней тонально-

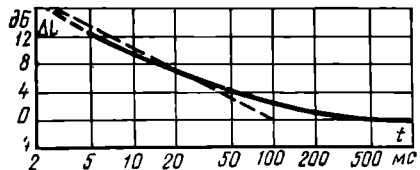


Рис. 2.22. Зависимость разности уровней тонального импульса 1 кГц и равногромкого стационарного тона от длительности импульса

го импульса 1 кГц и равногромкого стационарного тона от длительности импульса. Из этих данных следует, что громкость импульса определяется произведением интенсивности импульса на его длительность, причем граничной частотой является частота 100 Гц, т. е. громкость импульсов длительностью более 100 мс определяется только его интенсивностью и не зависит от длительности.

Громкость повторяющихся импульсов растет с увеличением частоты повторения до частоты 200 Гц. При более частых повторениях громкость импульсов определяется, как и для непрерывного тона. То же самое справедливо и для узкополосных шумов.

Для широкополосных шумовых импульсов громкость импульсов определяется аналогично громкости тональных импульсов. Для шумовых импульсов, имеющих спектр в полосе частот, охватывающих несколько частотных групп, громкость импульсов определяется еще и шириной полосы шума.

Для повторяющихся импульсов широкополосного шума громкость зависит от частоты повторений до частоты 1000 Гц. При большей частоте повторений громкость не зависит от длительности импульсов.

2.6. НЕЛИНЕЙНЫЕ СВОЙСТВА СЛУХА

При воздействии звука, имеющего одну частотную составляющую (чистый тон) с уровнем 100 дБ, человек слышит тон второй гармоники, как бы имеющий уровень 88 дБ, третьей — с уровнем 74 дБ и т. д. Наличие этих гармоник в ощущении легко прослеживается с помощью «ищущего» тона: к уху дополнительно подается другой тон — «ищущий», частота которого плавно изменяется в диапазоне выше частоты исследуемого тона. На каждой кратной частоте этого тона прослушиваются биения, как если бы в действительности к уху подводились гармоники этого типа. Поэтому они называются субъективными.

На рис. 2.23 приведены зависимости уровней субъективных гармоник от уровня чистого тона, действующего на слух. Если надо определить уровень четвертой гармоники для тона с уровнем 100 дБ, то ищем пересечение кривой с параметром 4 и вертикальной прямой, соответствующей уровню 100 дБ. Пересечение происходит на ординате 64 дБ. Следовательно, четвертая гармоника по своему уровню соответствует тону с уровнем 64 дБ.

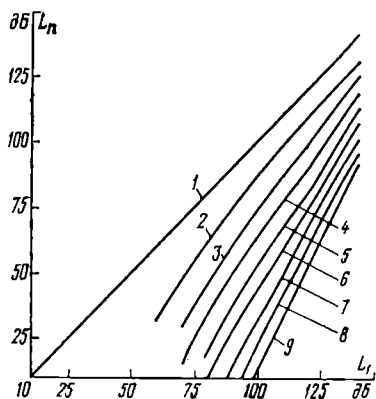


Рис. 2.23. Зависимость уровней интенсивности субъективных гармоник различных порядков от уровня тона, измеренного у входа в слуховой канал. Параметр кривых — порядок гармоники

При слушании двух чистых тонов с частотами, не попадающими в одну и ту же критическую полосу слуха, человек часто слышит тон разностной частоты с достаточно высоким уровнем ощущения. С меньшими уровнями он слышит тон суммарной частоты и других комбинационных частот типа $m f_1 \pm n f_2$, где m и n — целые числа.

Например, если уровень каждого из чистых тонов составляет 60 дБ, то уровень разностного тона не превышает 40 дБ. При уровнях составляющих, равных 80 дБ, уровень разностного тона достигает также 80 дБ.

Приближенно интенсивность разностного тона растет пропорционально произведению интенсивностей первичных тонов, т. е. уровень разностного тона $L_p = L_1 + L_2 - 80$.

При воздействии на слух сложного тона, имеющего большое число гармоник, комбинационные составляющие будут иметь частоты, равные частотам гармоник, т. е. только несколько изменится огибающая спектра. При воздействии на слух сложного звука, состоящего из тонов с некратными составляющими, получается «засорение» спектра многочисленными комбинационными частотами, по частоте не совпадающими с исходными.

В громкой передаче даже при отфильтровывании всех частотных составляющих ниже 1000 Гц человек все же слышит низкочастотные составляющие,

если уровень исходного звука достаточно высокий. Эти частотные составляющие являются продуктами нелинейности в слуховом тракте. При плохом воспроизведении низких частот стремятся слушать передачу на высоких уровнях: создается впечатление лучшего звучания низких частот. Правда, при этом искажение происходит и на высоких частотах, но оно менее значительно и менее заметно.

2.7. БИНАУРАЛЬНЫЙ ЭФФЕКТ

Бинауральным эффектом называют эффект слушания двумя ушами. Он выражается в виде стереоакустического (стереофонического) эффекта, аналогичного стереоскопическому эффекту зрения, а также заключается в том, что вследствие такого слушания резко повышается точность определения направления прихода звуковых волн.

В обычных условиях слушания человек определяет направление прихода звуковых волн в горизонтальной плоскости с точностью 3—4°. Если к ушам приставить раструбы (рупоры) с большим расстоянием (базой) между отверстиями раструбов, то точность определения направления прихода звуковых волн повышается пропорционально увеличению расстояния между отверстиями раструбов до тех пор, пока это расстояние не будет близко к половине длины принимаемой звуковой волны. Точность определения направления прихода звуковых волн в вертикальной плоскости головы не превышает 20°, такая же точность определения получается при одноухом слушании.

Стереоакустический эффект слушания заключается в том, что человек «ощущает» поперечные размеры источника звука, а также его «глубину», т. е. размеры источника звука по линии прихода звуковых волн к слушателю. Слушатель на слух легко определяет местонахождение того или иного инструмента в оркестре, «его координаты», т. е. слушание двумя ушами создает акустическую перспективу.

Если человек слушает одну и ту же передачу от двух одинаковых источников звука, расположенных на равных расстояниях от него, и расстояние между источниками звука значительно меньше расстояния от слушателя (по крайней мере, в 3—5 раз), то при одинаковом уровне звучания источников звука виртуальный¹ источник звука находится на середине между источниками звука. При неодинаковых уровнях звучания виртуальный источник звука смещается в сторону источника звука с более высоким уровнем звучания. Местонахождение виртуального источника звука можно определить по отношению интенсивностей, создаваемых источниками звука (отношение интенсивностей примерно равно отношению расстояния виртуального источника звука от действительных источников).

Если человек слушает одну и ту же передачу от источников звука (например, громкоговорителей), находящихся перед ним на разных расстояниях от него (или находящихся на одинаковом расстоянии от него, но при этом один из источников воспроизводит сигнал с некоторой временной задержкой по отношению к другому источнику), то при равном уровне основного и задержанного сигналов виртуальный источник звука ощущается на месте источника звука, излучающего опережающий сигнал, т. е. источник звука, излучающий задержанный сигнал как бы не существует, хотя его добавление и ощущается в виде повышения гулкости звучания передачи. При временных задержках свыше 50 мс наличие запаздывающего сигнала ощущается как появление помехи в виде эха, хотя местонахождение виртуального источника звука остается на прежнем месте. Следовательно, опережающий сигнал при одинаковом уровне с задержанным полностью подавляет последний. Если же повысить уровень запаздывающего сигнала, то можно добиться того, что оба источника звука бу-

¹ Виртуальным источником называют кажущийся источник звука, находящийся в направлении, по которому, как это кажется слушателю в отсутствие зрительного восприятия, приходит воспринимаемый им сигнал.

дуг восприниматься раздельно даже при запаздывании менее 50 мс. На рис. 2.24 дано необходимое повышение уровня запаздывающего сигнала в зависимости от величины временной задержки. По оси ординат дана разность уровней задержанного и основного сигналов. При задержке 15–20 мс задержанный сигнал должен быть повышен по уровню на 11 дБ, чтобы оба источника звука воспринимались раздельно. При временной задержке 50 мс достаточно

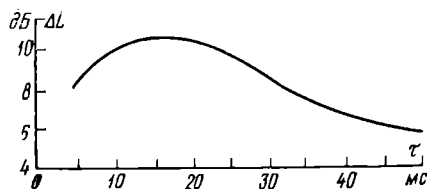


Рис. 2.24. Влияние запаздывающего повторения сигнала на локализацию виртуального источника сигнала

разница между ними в 6 дБ; при задержке свыше 50 мс запаздывающий сигнал ощущается как эхо; при задержке менее 5 мс наблюдается неустойчивый режим: виртуальный источник звука совпадает то с основным источником, то с источником задержанного сигнала.

Если источники звука имеют резко различающийся тембр, то они могут легче различаться слушателем и возможен их раздельный прием даже при равных уровнях интенсивности сигналов, приходящих от них к слушателю.

Эти свойства используются для создания стереоакустического эффекта и акустической перспективы при воспроизведении передач с помощью электроакустических устройств, т. е. для стереофонических передач.

Раздел 3

ПЕРВИЧНЫЕ АКУСТИЧЕСКИЕ СИГНАЛЫ И ИХ ИСТОЧНИКИ

3.1. ВВЕДЕНИЕ

К первичным сигналам относят сигналы, создаваемые музыкальными инструментами, пением, речью (включая информационную), а также шумовые сигналы, создаваемые для сопровождения различных музыкальных и речевых художественных передач (шум поезда, пение соловья и т. п.).

Акустические сигналы, как правило, относятся к случайным процессам. Исключением являются сигналы, подобные завыванию сирены, вою гудка и т. п. Правда, в музыкальных сигналах очень большие участки могут иметь периодический характер, но в среднем для больших интервалов времени и музыкальные сигналы можно рассматривать как случайные. Поэтому акустические сигналы определяют распределениями по уровню, по частоте и во времени и соответственно средним значением по уровню, динамическим диапазоном, формой спектра, частотным диапазоном и временем корреляции отдельных участков сигнала.

3.2. ДИНАМИЧЕСКИЙ ДИАПАЗОН И УРОВНИ

В процессе любой передачи уровень акустического сигнала непрерывно изменяется. Диапазон его изменения может быть довольно широким. На рис. 3.1а показана зависимость уровня сигнала от времени, называемая уровне-

граммой. Обычно она представляет временную зависимость уровня, определенного для постоянных времени или 15—20 мс (объективная уровнеграмма, необходимая для определения условий прохождения сигнала через аппаратуру), или 150—200 мс (субъективная уровнеграмма, необходимая для оценки восприятия сигнала). Эти уровни называют кратковременными. Для измерений пиковых значений пользуются уровнеграммой, представляющей временную зависимость пиковых уровней, определенных для постоянных времени 1—2 мс для нарастания уровня сигнала и 150—200 мс для спадания сигнала.

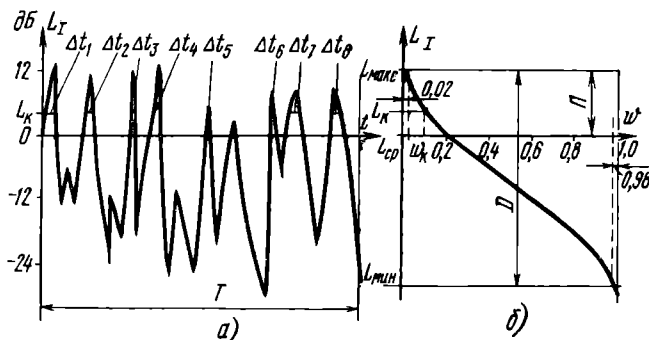


Рис. 3.1. Уровнеграмма (а) и к построению кривой интегрального распределения по уровнеграмме (б):
D — динамический диапазон; П — пик-фактор

С определенной степенью точности можно считать, что уровень сигнала изменяется, как правило, по случайному закону, поэтому его можно характеризовать интегральным распределением и средними значениями для этого распределения. Возьмем какой-либо уровень, например L_K . Для этого уровня (см. рис. 3.1а) можно написать, что время, в течение которого уровень сигнала будет не ниже его, определится суммой $\tau = \Delta t_1 + \Delta t_2 + \dots + \Delta t_m \dots + \Delta t_n$, где Δt_m — временные интервалы действия сигнала. Следовательно, относительное время пребывания уровня сигнала над заданным $w = \tau/T$, где T — длительность всего участка сигнала (она должна быть достаточно большой: не менее 15 с для речи и 1 м для музыки). При меньших интервалах времени распределение будет иметь значительный разброс из-за нестационарности процесса. Если таким образом определить величину w для разных уровней, то можно построить кривую интегрального распределения уровней для данного сигнала. На рис. 3.1б дано такое распределение для рассматриваемой уровнеграммы.

Установлено, что средние распределения уровней, полученных для первичных музыкальных и речевых сигналов, близки к нормальному распределению.

Введено понятие квазимаксимального уровня сигнала L_{\max} . Для этого уровня относительная длительность существования уровней не ниже его равна 2% для музыкальных сигналов и 1% для речевых, информационных. Одновременно введено и понятие квазиминимального уровня L_{\min} . Для этого уровня относительная длительность существования уровней не ниже его составляет соответственно 98 и 99%, что адекватно относительной длительности существования уровней не выше его, равной 2 и 1% (см. рис. 3.1б).

Разность между квазимаксимальным и квазиминимальным уровнями называют динамическим диапазоном: $D = L_{\max} - L_{\min}$. Таким образом (см. рис. 3.2) находят динамические диапазоны для ряда первичных акустических сигналов, включая и речевой сигнал. Некоторые из них приведены в табл. 3.1. Из таблицы следует, что вещательный динамический диапазон очень широк и поэтому в большинстве случаев не может быть передан через тракты вещательных каналов без предварительной обработки, т. е. без сжатия (компрессии)

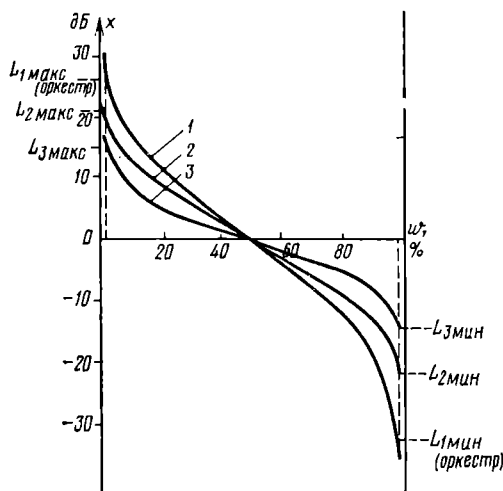


Рис. 3.2. Интегральные распределения уровней:
1 — симфонический оркестр из 75 исполнителей;
2 — эстрадный оркестр; 3 — рояль ($D_1=58$ дБ;
 $D_2=45$ дБ; $D_3=28$ дБ)

динамического диапазона. Но и речевой информационный сигнал имеет широкий динамический диапазон по отношению к трактам связи, и поэтому его также приходится предварительно сжимать или считаться с наличием ограничения его в самом тракте передачи.

Поскольку уровень акустического сигнала изменяется в широких пределах, то введено понятие среднего уровня.

Средний уровень интенсивности акустического сигнала можно определить или исходя из того, как человек его ощущает, или как он воспринимается соответствующей аппаратурой: как средний статистический для отдельных длительных участков и интервалов времени или как средний, измеряемый прибором, имеющим большую постоянную времени (не менее 3—5 с). Для первичных сигна-

ТАБЛИЦА 3.1

Вид сигнала	Речь диктора	Телефонные разговоры	Небольшие ансамбли	Симфонический оркестр
Динамический диапазон, дБ	25—35	35—45	45—55	65—75

лов необходимо знать все эти средние значения, так как первичный акустический сигнал в системах вещания и связи принимается и человеком, и аппаратурой. Все эти средние значения можно измерить, если соответственно подбирать постоянную времени прибора. Для получения длительного среднего (усредненного) значения постоянную времени берут равной 15 с для речи и 1 м для музыки.

Во всех случаях среднее значение по интенсивности в момент времени t_0 определяется выражением

$$I_{cp} = \frac{1}{T} \int_{-\infty}^{t_0} f(t) e^{-(t_0-t)/T} dt,$$

где $e^{-(t_0-t)/T}$ представляет характер процесса регистрации сигнала с учетом «памяти» прибора вследствие наличия у него интегратора с определенной постоянной времени; T — постоянная времени интегратора-регистратора; $f(t)$ — временная зависимость интенсивности сигнала.

В соответствии с определением уровня средний акустический уровень сигнала

$$L_{cp} = 10 \lg (I_{cp}/I_0) = 10 \lg I_{cp} \text{ Вт} + 120 \quad (I_0 = 10^{-12} \text{ Вт/м}^2).$$

В табл. 3.2 приведены величины средних значений звукового давления, создаваемого музыкальными инструментами для отрывков исполнения длительностью 15 с. В табл. 3.3 приведены такие же данные для речи. Приведенные средние значения для музыкальных инструментов характеризуют не только мощность инструмента, но и исполняемый отрывок музыкального произведения.

ТАБЛИЦА 3.2

Звуковое давление и мощность, развиваемые музыкальными инструментами

Инструмент	Расстояние, м	Среднее звуковое давление, Па	Пик-фактор, дБ	Пиковое значение мощности излучения, Вт	Область наибольших пиковых значений, Гц	Пиковое значение в пределах полосы наибольшей мощности, Вт
Большой барабан 90×38 см:						
проба А	0,9	9,9	10	24,6	250—500	9,8
проба В	0,9	2,78	7,7	1,2	20—62,5 250—500	0,24 0,19
Большой барабан:						
75×30 см	0,9	3,5	16	13,4	125—250	1,7
85×48 см	0,9	6,6	5,8	4,9	20—62,5	1,2
Барабан военный	1,2	1,46	20,5	11,9	250—500	3,7
Цимбалы 37 см	0,9	1,8	—	9,5	8 000—11 300	0,95
Треугольник	0,9	0,23	—	0,050	5 600—8 000 62,5—125	0,017 0,078
Контрабас	1,5	0,42	10,8	0,156	125—250	0,078
Бас-саксофон	1,05	0,41	16,6	0,288	250—500	0,228
Бас-труба	1,5	0,54	9,7	0,206	250—500	0,082
Тромбон	0,9	0,65	17,5	6,4	600—700 2 000—2 800	0,064 0,051
Труба	0,9	0,86	12	0,314	250—500 500—700	0,047 0,047
Английский рожок	0,9	0,38	11,2	0,053	250—500	0,053
Кларнет	0,9	0,35	11,5	0,050	250—500	0,0055
Флейта	1,05	0,16	—	0,055	700—1 000 1 400—2 000	0,0045 0,0045
Пикколо	1,05	0,22		0,084	2 000—2 800	0,021
Рояль	3,00	0,26	9,8	0,267	250—500	0,267
	3,00	0,35		0,248	250—500	0,248
Орган	3,6	0,21	13,2	0,35	250—500	0,11
Орган фортиссимо	3,6	2,0	8,7	12,6	20—62,5	2,5
Оркестр из 15 инструментов в лаборатории	Пульс дирижера 4,00	0,79	14,3	9,0	250—500 2 000—2 800	0,45 0,32
То же, из 18	То же	0,66	10,3	2,5	250—500 2 000—2 800	0,80 —
Оркестр из 75 инструментов в театре, проба А	Пульс дирижера в среднем 4,5	0,51	17,7	8,2	125—250 250—500 2 000—2 800	0,82 1,03 1,03
То же, проба В	То же	0,46	27,8	66,5	250—500 8 000—12 000	6,7 5,3
проба С		0,47	21,2	13,9	250—500 2 000—2 800	1,4 1,4
проба D		0,66	24,1	13,8	125—250 250—500 2 000—2 800	1,7 1,7 1,7

ТАБЛИЦА 3.3

Звуковое давление и мощность, развиваемые голосом человека при произнесении речи

Условия произнесения речи	Рас- стоя- ние, см	Сред- нее звуче- мое давле- ние, Па	Пико- вое значе- ние мощно- сти, мВт	Пик- фак- тор, дБ	Область наивысших пиков, Гц
Речь телефонная:					
со средним уровнем	2,5	2	0,24	12	250—500
громкая	2,5	4	4,0	18	500—1000
тихая	2,5	1	0,025	8	250—500
Разговор	100	0,05	0,5	10	250—500
Оратор	100	0,1	2,0	12	250—500

Разность между квазимаксимальными и усредненным уровнями (за длительный промежуток времени, т. е. 15 с для речи и 1 м для музыки) называют пик-фактором: $P = L_{\text{макс}} - L_{\text{ср}}$ (см. рис. 3.1). Пик-фактор показывает, насколько ниже надо взять усредненный уровень передачи по сравнению с уровнем ограничения в канале, чтобы не перегружать канал. В табл. 3.2 приведены величины пиковой мощности и пик-фактора для ряда музыкальных программ, исполняемых на различных инструментах. В табл. 3.3 такие же данные приведены для речи. Для музыкальных сигналов пик-фактор доходит до 25 дБ и более, а для речевого сигнала в среднем он составляет 12 дБ.

Ниже приведены данные по частоте встречаемости пиков различной величины в речи.

$L - L_{\text{ср}}$	Выше	20	18—20	16—18	14—16	12—14	10—12	8—10	6—8	4—6	2—4	0—2	Ниже 0 дБ
n		2	3	6	8	10	11	11	10	8	6	4	22

В этом выводе $L - L_{\text{ср}}$ — пределы уровней, в которых лежит пиковое значение над средним уровнем речи, дБ; n — число промежутков (длительностью 1/8 с), в течение которых пиковое значение лежит выше данного предела, %.

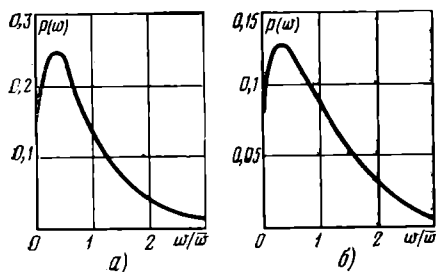


Рис. 3.3. Усредненные распределения текущей мощности речи (а) и музыки (б). По оси абсцисс отложено отношение текущей мощности к усредненной, по оси ординат — вероятность появления этого значения

Мощность голосов и соответственно уровень, создаваемый ими, имеют очень большой разброс. Ниже приведены данные Флетчера по разбросу величины мощности голоса.

P_a	Менее	1/16	1/16—1/8	1/8—1/4	1/4—1/2	1/2—1	1—2	2—4	4—8	Более 8
$m, \%$		7	9	14	18	22	17	9	4	0

Примечание. За единицу принята средняя мощность голоса. Все эти данные относятся к сигналам, не прошедшим обработки, в том числе и воздействия акустических свойств помещения.

На рис. 3.3 приведены усредненные распределения текущей мощности речи и музыки [3.4]. Как видно из этих распределений, мода обоих распределений лежит около 0,5 ω . Это означает, что наиболее вероятные значения текущей мощности ω лежат примерно на 3 дБ ниже долговременного (длительного) среднего значения мощности ($\bar{\omega}$).

3.3. ЧАСТОТНЫЙ ДИАПАЗОН И СПЕКТРЫ

Акустический сигнал от каждого из первичных источников звука, используемых в системе вещания, связи, телевидения и т. п., как правило, имеет непрерывно изменяющуюся форму и состав спектра. Эти спектры могут быть дискретными, сплошными и смешанными, высокочастотными и низкочастотными. Дискретные спектры могут быть гармоническими, т. е. представляющими спектр сложного тона, и тональными, т. е. представляющими суммарный спектр ряда сложных тонов, не кратных по частоте. Сигнал с гармоническим спектром может быть представлен в виде ряда Фурье

$$f(t) = \sum_{-\infty}^{\infty} C_k e^{i 2\pi k t / T} = \sum_{-\infty}^{\infty} C_k e^{i k \omega_1 t},$$

где T — период колебаний; $k\omega_1$ — угловая частота колебаний; k — целые числа от $-\infty$ до ∞ ; $C_k = c_k e^{-i\varphi_k}$ — комплексная амплитуда; c_k — амплитуда гармоники; φ_k — начальная фаза ее.

Комплексная амплитуда

$$C_k = \frac{1}{T} \int_{-T/2}^{T/2} f(t) e^{-i 2\pi k t / T} dt.$$

В вещественной форме ряд Фурье имеет вид

$$f(t) = C_0 + \sum_{k=1}^{\infty} (a_k \cos k \omega_1 t + b_k \sin k \omega_1 t),$$

где C_0 , a_k и b_k — коэффициенты Фурье:

$$C_0 = \frac{1}{T} \int_{-T/2}^{T/2} f(t) dt;$$

$$a_k = \frac{2}{T} \int_{-T/2}^{T/2} f(t) \cos 2\pi k \frac{t}{T} dt,$$

$$b_k = \frac{2}{T} \int_{-T/2}^{T/2} f(t) \sin 2\pi k \frac{t}{T} dt.$$

Отсюда $C_k = a_k - i b_k$; $c_k = \sqrt{a_k^2 + b_k^2}$; $\operatorname{tg} \varphi_k = b_k / a_k$.

Спектр тонального сигнала с некратными частотами ω_k имеет вид¹

¹ Различают еще сигналы с почти периодическими и квазигармоническими спектрами. К первым относятся сигналы, состоящие из нескольких сложных тонов с некратными основными частотами, ко вторым — эквидистантные спектры типа спектров амплитудной и частотной модуляции с несущей частотой, не кратной основной частоте модулирующего сигнала.

$$f(t) = \sum_{k=1}^{\infty} c_k \cos(\omega_k t + \varphi_k),$$

где ω_k , c_k и φ_k — частоты, амплитуды и фазы составляющих:

$$c_k = \sqrt{a_k^2 + b_k^2}; \quad \operatorname{tg} \varphi_k = b_k/a_k;$$

$$a_k = \lim_{T \rightarrow \infty} \int_0^T f(t) \cos \omega_k t dt;$$

$$b_k = \lim_{T \rightarrow \infty} \int_0^T f(t) \sin \omega_k t dt.$$

Для сплошного спектра его плотность (по амплитуде)

$$S(\omega) = \int_{-\infty}^{\infty} f(t) e^{-i\omega t} dt,$$

а сигнал имеет вид

$$f(t) = \frac{1}{2\pi} \int_{-\infty}^{\infty} S(\omega) e^{i\omega t} d\omega.$$

Для процессов, ограниченных во времени, введено понятие текущего спектра

$$S_{t_0}(\omega) = \int_0^{t_0} f(t) e^{-i\omega t} dt$$

и мгновенного¹

$$S_{\text{мгн}}(\omega) = \int_{-\infty}^{t_0} f(t) h(t_0 - t) e^{-i\omega t} dt,$$

где $h(t_0 - t)$ — весовая функция или временное окно, представляющее импульсный отклик прототипа полосового фильтра. Для резонансного контура $h(t_0 - t) = e^{-\Delta\omega(t_0 - t)}$, для фильтра с П-образной характеристикой $h(t_0 - t) = (\sin x)/x$, где $x = \Delta\omega(t_0 - t)$; $\Delta\omega$ — полоса пропускания фильтра на уровне -3 дБ.

В практике часто приходится иметь дело с энергетическим спектром сигнала. Под ним подразумевается огибающая квадратичных значений амплитуд частотных составляющих сигнала (для дискретных спектров) или плотности спектра квадрата амплитуд $A^2(x)$ (для сплошных спектров). Последняя будет представлять собой спектральную плотность по интенсивности $J(\omega) = kA^2(\omega)$, т. е. спектральной плотностью называют интенсивность звука в полоске частот шириной в единицу частоты. В акустике эту полоску берут равной 1 Гц, т. е. спектральная плотность $J = I_{\Delta f} / \Delta f$, где $I_{\Delta f}$ — интенсивность, измеренная в узкой полоске частот Δf . Измерения для этой цели проводят с помощью узкополосных фильтров (обычно третьоктавных).

Для удобства введена логарифмическая мера оценки плотности спектра аналогично оценке по уровню интенсивности. Эта мера называется уровнем

¹ По терминологии, принятой за границей, он иногда называется кратковременным спектром.

спектральной плотности, или спектральным уровнем. Спектральный уровень $B = 10 \lg (J/I_0) = 10 \lg J_{\text{Вт}} + 120$, где $I_0 = 10^{-12}$ Вт/м², т. е. то же условное (нормированное) значение, что и для оценки уровня интенсивности, поэтому размерность J выражается в единице на герц (Гц⁻¹).

Очень часто для представления спектра вместо спектральной плотности пользуются интенсивностью или звуковым давлением, измеренными в октавной, полуоктавной или третьоктавной полосе частот, и соответственно определяют уровни в этих полосах. В этом случае спектральный уровень $B = 10 \lg (I_{\text{окт}}/\Delta f_{\text{окт}} I_0) = 20 \lg (p_{\text{окт}}/p_0) - 10 \lg \Delta f_{\text{окт}}$ ($p_0 = 2 \cdot 10^{-5}$ Па), а уровень в октавной полосе $L_{\text{окт}} = 10 \lg (I_{\text{окт}}/I_0) = 20 \lg (p_{\text{окт}}/p_0)$, где $\Delta f_{\text{окт}}$ — ширина соответствующей октавной полосы. Вычитая первое из второго, имеем $L_{\text{окт}} - B = 10 \lg \Delta f_{\text{окт}}$. На рис. 3.4 приведены огибающие для спектрального уровня и третьоктавных уровней речевого шума.

У каждого источника звука, даже того же самого типа, спектры имеют индивидуальные черты, что придает звучанию этих источников, как говорят, характерную окраску. Эта окраска называется тембром. Существуют понятия тембра скрипки, тромбона, органа и т. п., а также спектра голоса: звонкий, когда подчеркнуты высокочастотные составляющие; глухой, когда они подавлены по отношению к среднему голосу. Чаще всего необходимо знать средний спектр для однородных источников звука и усредненный спектр за длительный интервал времени (15 с для информационных сигналов и 1 м — для художественных). Усредненный спектр может быть только сплошным и достаточно сглаженным по форме. Такие сплошные спектры хорошо характеризуются зависимостью спектральной плотности от частоты и вероятностью появления уровня в октавной полосе.

На рис. 3.5 приведены усредненные спектры максимальной мощности для различных значений вероятности появления заданных уровней в октавных полосах, там же приведены средние спектры. Эти спектры даны для речи и различных музыкальных звучаний. На рис. 3.6 приведены усредненные частотные распределения (спектральные плотности) средней мощности для речи и ряда музыкальных звучаний.

В табл. 3.2 и 3.3 даны величины акустической мощности в пределах полосы с максимальным уровнем.

Пример. Определить, какова вероятность появления уровня речи на 12 дБ ниже пикового на расстоянии 30 см от рта в полуоктавной полосе частот около 1000 Гц. Из рис. 3.5а для частоты 1000 Гц и уровня —12 дБ находим точку, лежащую около кривой 20%. Следовательно, вероятность появления уровня выше —12 дБ в этой полосе составляет 20%.

Когда спектры имеют спад в ту или иную сторону, то их оценивают тенденцией, т. е. средним наклоном спектральной кривой в сторону низких или высоких частот. Так, например, речевой спектр в диапазоне выше 500 Гц оценивают тенденцией спектра в —7 дБ/окт (спад в сторону высоких частот).

Если известны спектральные или октавные уровни сигнала, то можно определить его суммарный уровень. Если спектр задан в форме уровней в октавных (третьоктавных или полуоктавных) полосах, то достаточно перевести эти уровни (в каждой из полос) в относительные интенсивности

$$I_{\text{окт}}/I_0 = 10^{0,1L_{\text{окт}}}$$

и затем просуммировать все эти интенсивности, а по суммарной интенсивно-

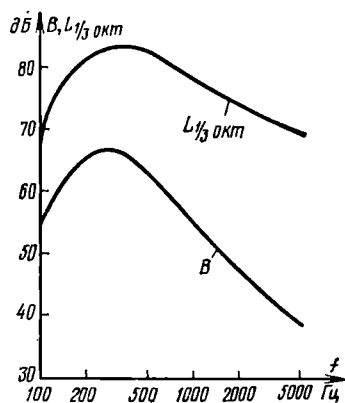


Рис. 3.4. Огибающая спектрального уровня B и третьоктавных уровней $L_{1/3\text{окт}}$

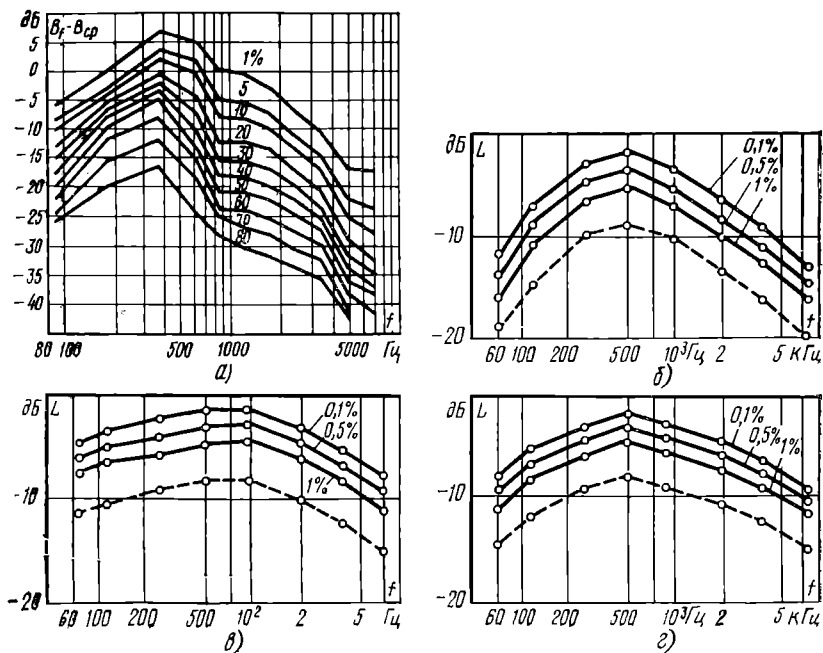


Рис. 3.5. Усредненные спектры максимальной и средней мощности: а) речи на расстоянии 30 см от рта; б) фортепьяно, вокальной и камерной музыки; в) легкой и эстрадной музыки; г) симфонической музыки. Параметр кривых — вероятность превышения данного уровня. Пунктиром дана кривая средней мощности. Нулевой уровень по оси ординат соответствует общей максимальной мощности сигнала

сти для всего спектра найти суммарный уровень $L_{\Sigma} = 10 \lg(I_{\Sigma}/I_0) = 10 \lg(\Sigma I_{\text{окт}}/I_0)$.

Пример. Заданы уровни в октавных полосах, найти суммарный уровень.

Полоса, Гц	100—200	200—400	400—800	800—1600	1600—3200	3200—6400
Уровень, дБ	60	64	66	66	63	60
Относительная интенсивность $(I_{\text{окт}}/I_0) \cdot 10^6$	1	2,51	3,98	3,98	2	1

Суммарный уровень $L_{\Sigma} = 10 \lg 14,5 \cdot 10^6 = 71,6$ дБ.

Если заданы спектральные уровни, то точное значение суммарного уровня для всего спектра определится интегралом

$$L_{\Sigma} = 10 \lg \int_{f_n}^{f_B} 10^{0,1B} df,$$

где f_B и f_n — верхняя и нижняя границы частотного диапазона.

Пример. Задан равномерный спектр, соответствующий рис. 3.8. Спектральный уровень равен 40 дБ, диапазон 20—15 500 Гц. Соответственно имеем

$$L_{\Sigma} = 10 \lg \int_{f_n}^{f_B} 10^{0,1B} df = 10 \lg [10^4 (15\,500 - 20)] = 81,9 \text{ дБ},$$

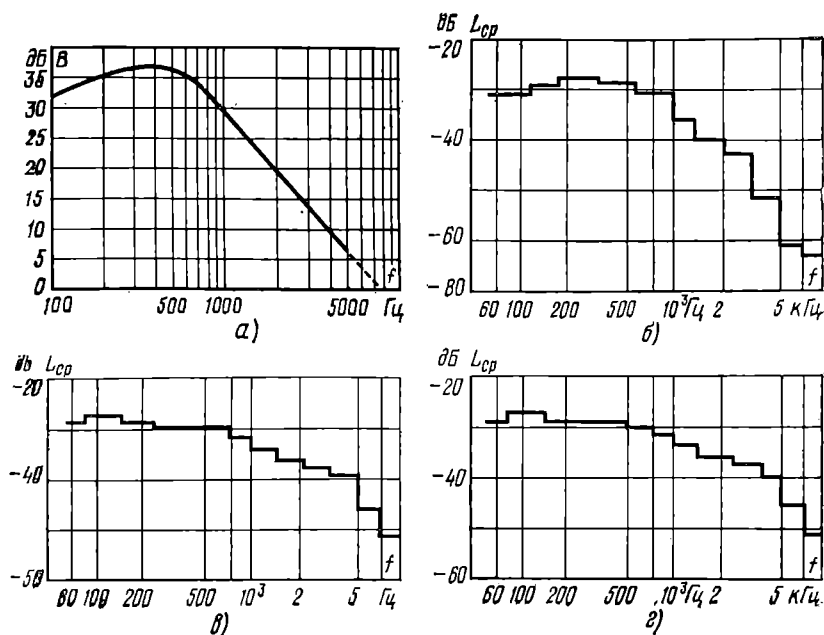


Рис. 3.6. Усредненная спектральная плотность средней мощности:

а) речи; б) фортепьяно, вокальной и камерной музыки; в) легкой и эстрадной музыки; г) симфонической музыки

в то время как для составляющей около 100 Гц уровень в частотной группе равен $L_{гр} = B + 10 \lg \Delta f_{гр} = 40 + 20 = 60$ дБ, а в самой верхней группе (12 000–15 500 Гц) он составляет $L_{гр} = 40 + 35 = 75$ дБ. Суммарный уровень можно приближенно найти путем деления частотного диапазона на n полосок Δf_k , в пределах каждой из которых спектральный уровень B_k примерно постоянен. Суммарный уровень

$$L_{\Sigma} \approx 10 \lg \sum_{k=1}^n 10^{0,1 B_k} \Delta f_k.$$

Пример. В табл. 3.4 приведены величины спектральных уровней для речевого сигнала на средних частотах третьоктавных полос, там же дана ширина третьоктавных полос. По спектральному уровню $B = 10 \lg (J_{отн}/I_0)$ с помощью табл. 1.10 находим спектральную плотность в относительных единицах. Найденные значения приведены в 4-й графе табл. 3.4. Например, для пятой строки $B_5 = 45,5$ дБ ширина третьоктавной полосы $\Delta f_5 = 58$ Гц (см. табл. 1.7). Поэтому относительная интенсивность в этой третьоктавной полосе $I_{отн5} = 10^{4,55} \cdot 58 \cdot 3,55 \times 10^4 \cdot 58 I_0 = 2,05 \cdot 10^6 I_0$, а уровень в этой третьоктавной полосе $L_5 = 10 \lg 2,05 \cdot 10^6 = 63,1$ дБ. Вычисленные значения интенсивности и уровня в других третьоктавных полосах приведены в 5-й и 6-й графах табл. 3.4. Общая сумма интенсивностей по всем полосам составляет $I_{\Sigma} = 1,306 \cdot 10^7 I_0$. Следовательно, общий уровень $L_{\Sigma} = 10 \lg 1,306 \cdot 10^7 = 71,2$ дБ. В 7-й графе табл. 3.4 приведены значения разности третьоктавных уровней и соответствующих спектральных уровней, равные ширине третьоктавной полосы в децибелах (см. табл. 2.2). Для пятой строки имеем $10 \lg \Delta f_5 = 63,1 - 45,5 = 17,6$ дБ.

ТАБЛИЦА 3.4

Данные примера расчета суммарного уровня

Средняя частота, Гц	Спектральный уровень, дБ	Ширина полосы, Гц	Спектральная плотность	Интенсивность полосы ¹	Уровень для полосы, дБ	Разность 6-й и 2-й граф, дБ
			отн. ед.			
100	28,5	23	708	16 300	42,1	13,6
125	34,5	29	2 820	81 800	49,1	14,6
160	40,0	36,5	10 000	365 000	55,6	15,6
200	43,5	46	22 400	1 030 000	60,1	16,6
250	45,5	58	35 500	2 060 000	63,1	17,6
315	45,5	73	31 600	2 310 000	63,6	18,6
400	43,5	92	22 400	2 060 000	63,1	19,6
500	41,5	116	14 100	1 635 000	62,1	20,6
630	39,0	146	7 940	1 160 000	60,6	21,6
800	36,0	183	3 980	728 000	58,6	22,6
1 000	33,0	230	1 990	457 000	56,6	23,6
1 250	30,5	290	1 120	325 000	55,1	24,6
1 600	28,0	365	631	231 000	53,6	25,6
2 000	25,5	460	355	163 000	52,1	26,6
2 500	23,5	580	224	130 000	51,1	27,6
3 150	21,5	730	141	103 000	50,1	28,6
4 000	19,5	920	89,1	82 000	49,1	29,6
5 000	17,0	1 160	50,1	58 000	47,6	30,6
6 300	14,0	1 460	25,1	36 000	45,6	31,6
8 000	11,0	1 830	12,6	23 000	43,6	32,6

¹ $I_{\Sigma} = 13\,058\,500$; $10 \lg 1,306 \cdot 10^7 = 71,2$ дБ.

Частотный диапазон акустического сигнала определяют из кривой спектральных уровней. Но так как нет четких определений границы частотного диапазона, то это определение можно сделать только приближенно, на слух. Считают такими границами заметность ограничения диапазона для 75% слушателей. На рис. 3.7 показаны частотные диапазоны для ряда акустических сигналов и первичных источников звука, в том числе и для речи.

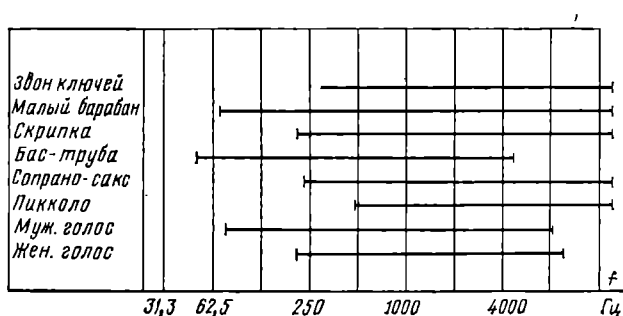


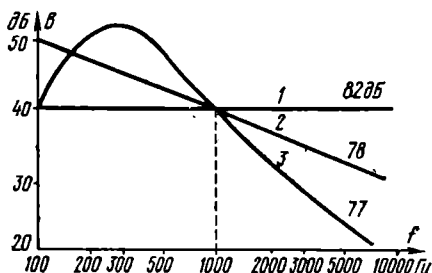
Рис. 3.7. Частотные диапазоны первичных источников звука

Как видим, весь оркестр имеет широкополосный спектр. Флейта-пикколо и труба имеют соответственно высокочастотный и низкочастотный спектры.

Акустические шумы могут рассматриваться и как акустические сигналы и как помехи. На рис. 3.8 приведены три типа шумов: белые, розовые и речевые.

Термин «белые» относится к шумам, имеющим одинаковую спектральную плотность во всем частотном диапазоне. Термин «розовые» относится к шумам, имеющим тенденцию спада на 3 дБ/окт в сторону высоких частот. Речевые шумы — шумы, создаваемые одновременным разговором нескольких человек.

Рис. 3.8. Спектральные уровни некоторых шумов:
1 — белого; 2 — розового; 3 — речевого. На графике показан суммарный уровень для каждого типа шума



3.4. ВРЕМЕННЫЕ ХАРАКТЕРИСТИКИ АКУСТИЧЕСКОГО СИГНАЛА

Одной из таких характеристик является уровнеграмма сигнала. Она дает возможность определения резких переходов интенсивности, и, следовательно, по ней можно предъявить требование в отношении постоянных времени для трактов передачи сигнала.

Другой важной временной характеристикой акустического сигнала является функция автокорреляции сигнала. Если суммируют два сигнала, один из которых представляет повторение другого сигнала с некоторым запаздыванием τ по отношению к нему (как, например, прямой и отраженный сигналы), то средняя мощность суммарного сигнала за время T может быть определена следующим образом:

$$P_{\text{ср}}(t) = \frac{1}{T} \int_{t-T}^t [f(\xi) - f(\xi - \tau)]^2 d\xi = P_1 + P_2 + 2r\tau,$$

где

$$P_1 = \frac{1}{T} \int_{t-T}^t f^2(\xi) d\xi, \quad P_2 = \frac{1}{T} \int_{t-T}^t f^2(\xi - \tau) d\xi$$

являются средними мощностями складывающихся сигналов, а

$$r(\tau) = \frac{1}{T} \int_{t-T}^t f(\xi) f(\xi - \tau) d\xi —$$

функцией автокорреляции сигнала $f(t)$.

Все акустические сигналы делят на однородные стационарные и неоднородные. Если при увеличении интервала усреднения средние значения мощности каждого из сигналов стремятся к одному и тому же предельному значению, не зависящему от времени t , то такие сигналы называют однородными. В этом случае функция корреляции также стремится к некоторому пределу, зависящему от времени запаздывания. Минимальное время усреднения $T = T_0$, необходимое для достижения этих предельных значений при любой величине времени запаздыва-

ния, называют пределом однородности сигнала. Для однородных сигналов при $T \geq T_0$

$$P_1 = P_2 = \frac{1}{T} \int_{-T/2}^{T/2} f^2(t) dt \text{ и } r(\tau) = \frac{1}{T} \int_{-T/2}^{T/2} f(t) f(t - \tau) dt$$

при произвольности выбора интервала T во времени. Время T_0 называют временем корреляции сигнала.

Если при увеличении интервала усреднения величины мощности и функции корреляции не имеют предельных значений, а непрерывно изменяются со временем, то такие сигналы называют неоднородными.

Для речевого сигнала однородность получается в интервале 3—5 с, но для большей точности этот интервал берут равным 15 с. Для музыкальных программ интервал однородности доходит до 1 м.

Для оценки когерентности сигналов пользуются нормированной функцией корреляции $r_n = r(\tau)/r(0)$, где $r(0)$ — функция корреляции при $\tau = 0$.

При $\tau = 0$ для двух одинаковых сигналов суммарная амплитуда удваивается и мощность будет в 4 раза больше мощности одиночного сигнала P_1 . При $\tau \geq \tau_0$ (где τ_0 — интервал корреляции) суммарная мощность этих сигналов $P_\Sigma = 2P_1$.

3.5. ПРОСТРАНСТВЕННОЕ РАСПРЕДЕЛЕНИЕ ИНТЕНСИВНОСТИ РЕЧИ ВОКРУГ ГОЛОВЫ

Рот как источник звука излучает в разных направлениях по-разному. Играть роль как соотношение между длиной излучаемой волны и размером отверстия рта, так и размеры головы сравнительно с той же длиной волны. Низкие частоты излучаются более равномерно, высокие — имеют направленное излучение. В табл. 3.5 приведены уровни интенсивности на разных расстояниях от рта под разными азимутами и углами высоты. Даны как суммарные значения уровня для всего диапазона частот, так и для октавных полос в диапазоне 62,5—12 000 Гц.

Цифры в этой таблице представляют собой разности уровней интенсивности в децибелах в заданной точке с координатами r , Θ , Φ и в точке, определяемой координатами 0,3 м, 0° , 0° для той же полосы частот. Способ отсчета координат показан на рис. 3.9.

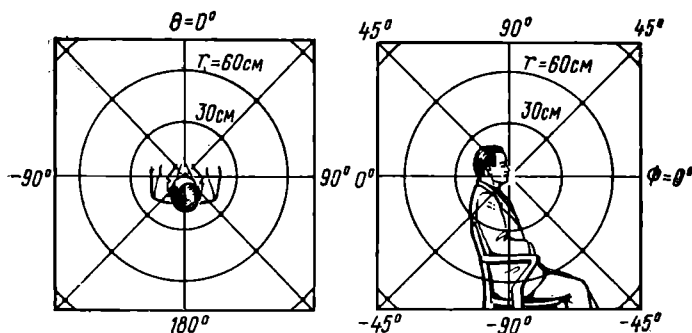


Рис. 3.9. Способ отсчета координат и углов

Пример. Определить относительный уровень речи во всем диапазоне и в полосе 250—500 Гц в точке, расположенной впереди (0°) вверху под углом 45° на расстоянии 0,3 м.

ТАБЛИЦА 3.5
Частотный анализ и пространственное распределение интенсивности речи вокруг головы

Угол, град.		Относительный уровень, дБ														
		в частотных полосах, Гц														
азимута θ	высоты Φ	во всем диапазоне														
		62,5—125	125—250	250—500	500—700	700—1000	1000—1400	1400—2000	2000—2800	2800—4000	4000—5600	5600—8000	8000—12000			
1	2	3	4	5	6	7	8	9	10	11	12	13	14	15		
$r=100$ см																
0	0	-9,7	-10,2	-11,1	-8,9	-10,5	-8,9	-11,2	-9,5	-11,2	-9,6	-12,2	-9,7	-9,7	-9,7	-9,7
45	0	-9,8	-11,2	-10,3	-11,3	-9,1	-9,9	-12,8	-13,7	-12,3	-13,1	-12,8	-11,9	-10,3	-10,3	-10,3
90	0	-10,5	-8,4	-13,0	-12,4	-11,5	-10,6	-21,0	-15,7	-15,7	-16,5	-14,9	-15,9	-15,2	-15,2	-15,2
135	0	-13,8	-8,7	-10,8	-15,0	-18,1	-16,4	-21,0	-20,7	-21,4	-23,1	-25,0	-23,8	-26,2	-26,2	-26,2
0	+45	-10,7	-10,0	-12,2	-10,5	-12,4	-2,0	-8,5	-11,6	-10,5	-10,8	-15,1	-16,6	-10,0	-10,0	-10,0
45	+45	-10,1	-10,5	-10,9	-11,0	-12,2	-2,1	-9,0	-11,9	-10,6	-11,5	-15,3	-14,6	-11,5	-11,5	-11,5
90	+45	-12,1	-10,0	-13,4	-12,0	-12,6	-3,8	-14,9	-15,5	-12,3	-17,2	-18,4	-18,3	-15,6	-15,6	-15,6
135	+45	-12,4	-14,3	-14,3	-14,3	-12,3	-13,8	-17,8	-20,0	-18,2	-17,0	-24,9	-25,3	-23,9	-23,9	-23,9
180	+45	-12,9	-13,0	-13,0	-13,0	-12,2	-13,8	-16,8	-17,6	-15,0	-17,6	-23,7	-25,0	-22,3	-22,3	-22,3
0	-45	-7,8	-10,8	-11,8	-9,6	-5,3	-6,1	-12,3	-13,6	-12,7	-17,0	-23,5	-25,0	-6,1	-6,1	-6,1
45	-45	-9,8	-11,4	-13,3	-10,8	-8,6	-9,1	-15,9	-14,5	-14,8	-13,1	-15,3	-8,9	-6,1	-6,1	-6,1
90	-45	-11,1	-11,1	-13,3	-12,8	-9,7	-10,9	-16,9	-18,0	-19,6	-19,6	-22,3	-9,9	-9,9	-9,9	-9,9
135	-45	-11,9	-9,4	-11,9	-16,9	-15,5	-15,5	-16,9	-21,6	-22,9	-19,6	-29,7	-28,8	-26,7	-26,7	-26,7
180	-45	-15,2	-7,1	-10,8	-15,0	-19,8	-16,4	-22,5	-25,6	-29,3	-30,9	-33,7	-31,2	-27,2	-27,2	-27,2
$r=60$ см																
0	0	-5,4	-6,0	-5,5	-5,9	-4,2	-6,9	-6,9	-6,4	-7,4	-5,3	-6,4	-5,3	-5,9	-5,9	-5,9
45	0	-5,1	-5,5	-7,1	-6,3	-4,6	-5,2	-7,8	-8,9	-8,8	-6,2	-7,9	-6,8	-6,5	-6,5	-6,5
90	0	-7,1	-6,5	-8,3	-7,5	-6,6	-5,7	-9,4	-11,3	-11,3	-11,9	-13,2	-11,8	-13,2	-13,2	-13,2
135	0	-10,9	-4,2	-9,6	-11,4	-12,6	-10,8	-15,8	-14,7	-14,5	-18,3	-20,7	-16,5	-15,2	-15,2	-15,2
0	+45	-6,5	-7,1	-8,3	-7,2	-6,7	-3,0	-5,7	-13,5	-19,1	-23,0	-25,8	-26,5	-23,3	-23,3	-23,3
45	+45	-7,6	-7,8	-7,1	-7,2	-6,8	-9,1	-6,7	-7,4	-5,7	-6,8	-10,6	-11,0	-5,0	-5,0	-5,0
90	+45	-8,4	-7,0	-8,0	-8,5	-7,2	-9,1	-6,9	-7,0	-8,1	-8,7	-10,8	-10,9	-7,0	-7,0	-7,0
135	+45	-9,3	-7,1	-9,3	-9,1	-7,3	-11,0	-13,6	-10,5	-9,4	-13,1	-16,1	-16,5	-12,8	-12,8	-12,8
180	+45	-8,7	-5,1	-9,3	-9,9	-7,1	-9,0	-12,6	-13,9	-13,7	-14,0	-17,9	-19,2	-17,1	-17,1	-17,1
0	+90	-4,8	-6,2	-8,9	-8,3	-2,7	-9,9	-8,4	-10,4	-8,6	-9,4	-13,6	-11,7	-6,7	-6,7	-6,7
0	-22,5	-4,4	-4,0	-4,5	-4,8	-5,1	-3,6	-8,2	-6,9	-5,7	-6,9	-7,0	-3,9	-2,5	-2,5	-2,5
45	-45	-4,4	-4,4	-3,8	-4,8	-4,1	-3,7	-8,6	-8,2	-8,5	-8,2	-6,9	-3,2	-1,8	-1,8	-1,8
90	-45	-4,6	-5,5	-4,5	-4,0	-4,4	-3,7	-8,6	-11,2	-6,6	-9,2	-10,5	-6,0	-1,4	-1,4	-1,4
135	-45	-7,9	-5,7	-6,9	-8,4	-6,4	-5,8	-11,8	-10,2	-10,2	-13,3	-14,9	-10,8	-8,7	-8,7	-8,7
180	-45	-10,9	-5,7	-9,8	-11,3	-11,5	-9,4	-13,9	-18,3	-18,3	-20,6	-26,5	-26,1	-24,1	-24,1	-24,1
0	-45	-12,2	-5,0	-9,8	-12,3	-13,8	-11,8	-22,9	-21,7	-23,4	-26,9	-28,9	-30,6	-24,7	-24,7	-24,7

Окончание табл. 3.5

1	2	3	4	5	6	7	8	9	10	11	12	13	14	15
$r=10$														
0	0	9,4	10,0	9,3	9,2	9,5	10,0	10,2	8,9	9,4	9,8	8,8	9,1	7,9
45	0	9,5	9,4	9,0	8,8	9,9	10,0	10,8	10,6	7,6	8,8	7,0	9,3	7,5
90	0	8,3	8,7	8,8	8,7	10,1	9,7	9,4	9,2	5,1	6,3	3,9	5,0	1,0
0	+45	9,3	9,5	9,3	8,5	9,6	10,6	10,9	8,2	6,7	8,9	4,2	5,7	10,7
0	-45	9,8	10,5	10,0	9,3	11,3	10,5	8,5	7,5	8,0	9,6	8,1	12,1	14,1
-	-90	10,3	11,3	10,0	10,0	12,6	11,9	7,6	5,9	4,4	6,3	5,9	8,7	9,7
$r=5$														
0	0*	15,3	15,4	15,3	14,3	15,0	15,9	15,8	14,4	15,1	13,9	14,4	11,4	11,0
45	0	15,3	17,3	14,6	15,6	15,2	16,6	15,6	15,9	15,6	13,9	13,9	11,5	13,1
0	+45	16,0	16,1	16,1	16,5	15,3	16,6	15,6	13,4	14,5	15,3	10,7	13,2	15,2
0	-45	15,7	14,3	14,2	14,8	16,7	16,2	16,1	14,6	15,1	15,1	16,3	16,2	16,2
$r=0$														
0	0*	33,9	32,6	31,9	33,8	37,1	35,3	34,6	30,5	32,2	34,7	39,6	34,4	37,9

Примечание. Относительные уровни, приведенные в таблице, представляют собой разности [в дБ] уровней интенсивности речи в данной частотной полосе в точке с координатами r, θ, Φ и в точке с координатами 30 см, $0^\circ, 0^\circ$, r — расстояние от рта, см. Способ отсчета координат поясняется рис. 3.9. В точках, отмеченных звездочкой, применяется экран для исключения влияния тока воздуха изо рта.

Искомые уровни находим в табл. 3.5 в шестой строке в 3-й и 6-й графах для $r=30$ см. Общий уровень будет равен 0,8 дБ, уровень в полосе — 1,9 дБ. Для оратора из табл. 3.3 находим, что на расстоянии 1 м звуковое давление равно 0,1 Па. На расстоянии 0,3 м уровень звукового давления соответственно табл. 3.5 увеличится (см. графу 4, строку 1 для 100 и 30 см) на 9,7 дБ, а звуковое давление — в 3,06 раза, поэтому оно будет равно $0,1 \cdot 3,06 = 0,306$ Па. Затем находим уровень $L = 20 \lg(0,306/2 \cdot 10^{-5}) = 83,7$. Поэтому уровень в полосе будет $L_d = 83,7 - 1,9 = 80,8$ дБ, а общий уровень интенсивности $L_\Sigma = 0,8 + 83,7 = 84,5$ дБ.

3.6. ПЕРВИЧНЫЙ РЕЧЕВОЙ СИГНАЛ

Речь с физической точки зрения состоит из последовательности звуков речи с паузами между их группами. При нормальном темпе речи паузы появляются между отрывками фраз, так как при этом слова произносятся слитно (хотя слух, как правило, воспринимает слова по отдельности). При замедленном темпе речи, например при диктовке, паузы могут делаться между словами и даже их частями. Предлоги, союзы звучат всегда слитно с последующим словом.

Один и тот же звук речи разные люди произносят по-разному, каждому человеку свойственна своя манера произнесения звуков речи (своего рода устный почерк). Произношение звуков речи зависит от ударения, соседних звуков и т. п. Но при всем многообразии в их произношении они являются физическими реализациями (произнесением) ограниченного числа обобщенных звуков речи, называемых фонемами. Фонема — это то, что человек хочет произнести, а звук речи — это то, что человек фактически произносит. Фонема по отношению к звуку речи играет ту же роль, что и образцовая буква (например, курсивная) по отношению к ее рукописной форме в конкретном написании.

В русском языке насчитывается 41 основная и 3 неопределенные фонемы.

Звуки речи делятся на звонкие и глухие. Звонкие звуки образуются с участием голосовых связок, в этом случае находящихся в напряженном состоянии. Под напором воздуха, идущего из легких, они периодически раздвигаются, в результате чего создается прерывистый поток воздуха. Импульсы потока воздуха, создаваемые голосовыми связками, с достаточной точностью могут считаться периодическими. Соответствующий период повторения импульсов называют периодом основного тона голоса T_0 . Обратная величина $f_0 = 1/T_0$ называется частотой основного тона. Если связки тонкие и сильно напряжены, то период получается коротким и частота основного тона — высокой; для толстых, слабо напряженных связок частота основного тона получается низкой. Частота основного тона для всех голосов лежит в пределах от 70 до 450 Гц. При произнесении речи частота основного тона непрерывно изменяется в соответствии с ударением и подчеркиванием звуков и слов, а также для проявления эмоций (вопрос, восклицание, удивление и т. д.). Изменение частоты основного тона называется интонацией. У каждого человека свой диапазон изменения основного тона (обычно он бывает немногим более октавы) и своя интонация. Последняя имеет большое значение для узнаваемости говорящего. (Основной тон, интонация, устный почерк и тембр голоса служат для опознавания человека, и степень достоверности опознавания выше, чем по отпечаткам пальцев. Это свойство используют для аппаратуры, срабатывающей только от определенных голосов.) Импульсы основного тона имеют пилообразную форму, и поэтому при их периодическом повторении получается дискретный спектр с большим числом гармоник (до 40), частоты которых кратны частоте основного тона. Огибающая спектра основного тона имеет спад в сторону высоких частот с крутизной около 6 дБ/окт, поэтому для мужского голоса уровень составляющих около 3000 Гц ниже их уровня около 100 Гц примерно на 30 дБ.

При произнесении глухих звуков связки находятся в расслабленном состоянии и поток воздуха из легких свободно проходит в полость рта. Встречая на своем пути различные преграды в виде языка, зубов, губ, он образует завихрения, образующие шум со сплошным спектром.

Согласные по способу образования делятся на сонорные (л, ль, р, рь, м, мь, н, нь, й), щелевые (ж, з, зь, в, вь, ш, с, сь, ф, фь, х, хь), взрывные (б, бь, д, ды, г, гь, п, пы, т, ты, к, кь) и аффрикаты (ц, ч — комбинация глухих взрывных и щелевых). Гласных фонем 6: а, о, у, э, и, ы (гласные е, я, ё, ю — составные из й и гласных э, а, о, у).

По месту образования фонемы делятся на губные, зубные, нёбные, гортанные, передние и задние.

При произнесении звуков речи язык, губы, зубы, нижняя челюсть, голосовые связки должны находиться для каждой фонемы в строго определенном положении или движении. Эти движения называют артикуляцией органов речи. При этом в речеобразующем тракте создаются резонансные полости, определенные для данной фонемы, а для слитного звучания фонем в речи — и определенные переходы от одной формы тракта к другой.

При произнесении звуков речи через речевой тракт проходит или тональный импульсный сигнал, или шумовой, или тот и другой вместе. Речевой тракт представляет собой сложный акустический фильтр с рядом резонансов, создаваемых полостями рта, носа и носоглотки, т. е. с помощью артикуляционных органов речи. Вследствие этого равномерный тональный или шумовой спектр превращается в спектр с рядом максимумов и минимумов. Максимумы спектра называют формантами, а резкие провалы — антиформантами. Для каждой фонемы огибающая спектра имеет индивидуальную и вполне определенную форму (рис. 3.10, на

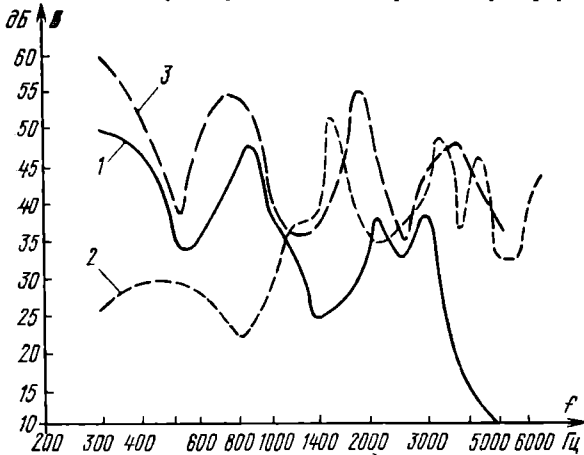


Рис. 3.10. Огибающие спектра для ряда звуков речи: 1 — «в»; 2 — «г»; 3 — «м»

котором приведены спектральные огибающие для звуков в, г, м). При произнесении речи спектр ее непрерывно изменяется и образуются формантные переходы. Частотный диапазон речи находится в пределах 70—7000 Гц. Форма усредненного спектра речи дана на рис. 3.4.

Звонкие звуки речи, особенно гласные, имеют высокий уровень интенсивности, глухие — самый низкий. При произнесении речи громкость ее непрерывно изменяется. Особенно резко она изменяется при произнесении взрывных звуков речи. Динамический диапазон уровней речи находится в пределах 35—45 дБ. Гласные звуки речи имеют в среднем длительность около 0,15 с, согласные — около 0,08, звук п — около 30 мс.

Звуки речи неодинаково информативны. Так, гласные звуки содержат малую информацию о смысле речи, а глухие согласные наиболее информативны (например, в слове «посылка» последовательность «о. ы. а» ничего не говорит, а «п. з.

лк.» дает почти однозначный ответ о смысле. Поэтому разборчивость речи снижается при действии шумов, в первую очередь из-за маскировки глухих звуков.

Известно, что для передачи одного и того же сообщения по телеграфу и по речевому тракту требуется различная пропускная способность тракта. Для телеграфного сообщения достаточно пропускная способность не более 100 бит/с, а для речевого — около 100 000 бит/с (полоса равна 7000 Гц, динамический диапазон 42 дБ, т. е. требуется семизначный код, откуда имеем $2 \cdot 7000 \cdot 7 = 98\,000$ бит/с), т. е. в 100 раз большая.

Образование звуков речи происходит путем подачи команд к мускулам артикуляционных органов речи от речевого центра мозга. Общий поток сообщений от него составляет не более 100 бит/с. Вся остальная информация в речевом сигнале называется сопутствующей.

Речевой сигнал представляет собой своего рода модулированную несущую. Его спектр $p(\omega) = E(\omega)F(\omega)$, где $E(\omega)$ — спектр генераторной функции, т. е. импульсов основного тона или шума; $F(\omega)$ — фильтровая функция речевого тракта — модулирующая кривая. Эта модуляция особая — спектральная. При ней несущая имеет широкополосный спектр, а в результате модуляции изменяется соотношение между частотными составляющими, т. е. изменяется форма огибающей спектра. Почти вся информация о звуках речи заключена в спектральной огибающей речи и ее временном изменении¹ (частично информация о звуках речи заключена в переходах от тонального спектра к шумовому и обратно — по этим переходам узнают о смене звонких звуков на глухие и обратно). Все эти изменения происходят медленно (в темпе речи). Установлено, что избыточность самого речевого сигнала лишь немного превышает избыточность телеграфного сигнала с таким же сообщением: речевой сигнал отличается от телеграфного тем, что в последнем нет информации об эмоциях и личности говорящего.

Для передачи смысла речи достаточно передавать сведения о форме огибающей спектра речи и ее временном изменении в темпе смены звуков речи, а также изменение основного тона речи и переходов тон — шум.

3.7. ГОРТАНЬ КАК ИСТОЧНИК ЗВУКОВЫХ КОЛЕБАНИЙ

Для получения шумозащищенного речевого сигнала используют гортань как источник речевых колебаний. Эти колебания создаются при произнесении звуков речи и являются чисто механическими колебаниями тканей, прилегающих к

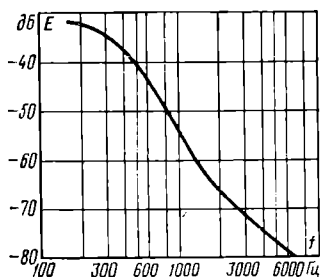


Рис. 3.11. Частотная зависимость колебательной скорости гортани для постоянного звукового давления, создаваемого ртом на расстоянии 1 м от него

гортани. Наиболее интенсивные колебания получаются на низких частотах. Скорость колебаний этих тканей уменьшается к высоким частотам по квадратичному закону. При увеличении частоты вдвое скорость колебаний уменьшается

¹ По теории, предложенной проф. А. А. Пироговым, распознавание звуков речи определяется скоростью изменения спектральных уровней (фонетическими функциями).

вчетверо, что соответствует снижению уровня на 12 дБ/окт (см. § 1.4). На рис. 3.11 приведена экспериментальная частотная зависимость уровня скорости колебаний тканей гортани для постоянного уровня звукового давления, создаваемого при этом на расстоянии 1 м от рта. На этом графике за нулевое значение уровня взята величина $1 \frac{\text{м/с}}{\text{Па}}$.

Раздел 4

ЭЛЕКТРОМЕХАНОАКУСТИЧЕСКИЕ СИСТЕМЫ И МАТЕРИАЛЫ

4.1. ВВЕДЕНИЕ

Электроакустическая аппаратура и акустические устройства состоят из электрических, механических и акустических элементов, объединенных в системы.

К электрическим элементам относятся индуктивности, емкости, активные сопротивления, трансформаторы. Как правило, они представляют собой простую электрическую систему — электрический контур. Конструктивно такой контур имеет вид: катушки, находящейся в магнитном поле (электродинамические системы); или на сердечнике из магнитного материала (электромагнитные системы); конденсатора или пьезоэлемента (электростатические системы); угольного порошка, расположенного между электрическими контактами (угольные системы); угольного порошка, расположенного между электрическими контактами (угольные системы). Трансформаторы применяются в тех случаях, когда надо согласовать сопротивления данной системы с внешней электрической цепью. Для электродинамических систем индуктивное сопротивление обычно (кроме самых высоких частот) значительно меньше активного, для электромагнитных систем, наоборот, индуктивное сопротивление значительно преобладает над активным (кроме самых низких частот), для электростатических систем активная составляющая, как правило, очень мала.

К механическим и акустическим элементам относятся массы, упругости (гибкости), сопротивления потерь (например, на трение) и своего рода механоакустические трансформаторы. Эти элементы комбинируют в виде различного рода цепочек и узлов. Механические и акустические системы элементов бывают как с сосредоточенными, так и с распределенными параметрами. В большинстве случаев акустические и механические системы (в зависимости от участка звукового диапазона частот) могут рассматриваться как с сосредоточенными, так и с распределенными параметрами. Например, на низких частотах все механические системы могут рассматриваться как системы с сосредоточенными параметрами, а на высоких — как с распределенными параметрами. Большинство акустических систем представляет собой системы с распределенными параметрами, и только на низких частотах с некоторым приближением их можно рассматривать как системы с сосредоточенными параметрами.

Конструктивно механические системы представляют собой различной формы диафрагмы и мембраны. Идеальная диафрагма может колебаться только как целое, т. е. представляет собой систему с сосредоточенными параметрами. Практически диафрагмы всегда колеблются с той или иной величиной изгиба от центра к краям. Для уменьшения изгиба применяют гофрировку на краях диафрагмы. Идеальная мембрана представляет собой абсолютно гибкую пластину, упругость которой дается только ее натяжением по периметру. Мембрана представляет собой систему с распределенными параметрами. В пьезоаппаратуре ме-





ханическая система иногда имеет вид пластинки, зажатой или опертой по одному краю.

Акустические системы конструктивно представляют собой различного рода трубки, закрытые с одного конца или открытые с обоих концов, различного вида объемы, резонаторы, комбинации трубок и объемов, открытое пространство и т. п.

Электрические, механические и акустические системы в электроакустической аппаратуре связывают между собой с помощью электромеханических и механоакустических преобразователей. Под последними подразумевают устройства, позволяющие преобразовывать колебания одного вида энергии в другой, например акустические колебания в электрические или электрические — в акустические. В качестве элементов связи, например в электромеханических преобразователях, используют магнитные или электрические поля.

ТАБЛИЦА 4.1

Электромеханические аналоги

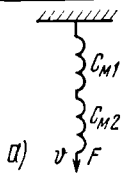
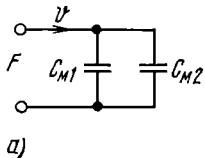
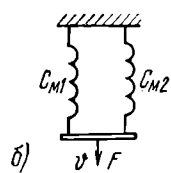
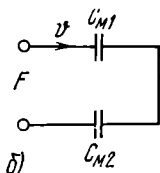
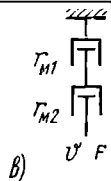
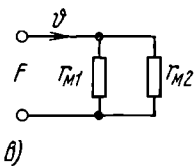
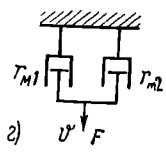
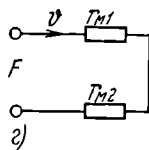
Электрические величины	Механические величины	Условные обозначения
Напряжение U Ток i Количество электричества q	Сила F Скорость v Смещение (отклонение) x	
$U_L = L \frac{di}{dt}$ Индуктивность L	$F_m = m \frac{dv}{dt}$ Масса m	а) 
$U_C = q/C$ Емкость C	$F_k = sx = x/c_m$ Гибкость c_m Упругость $s = 1/c_m$	б) 
$U_R = iR$ Активное сопротивление R	$F_r = r_m v$ Коэффициент потерь r_m	в) 
Полное электрическое сопротивление $z = U/i$	Полное механическое сопротивление $z_m = F/v$	г) 
Энергия магнитного поля $W_m = Li^2/2$	Кинетическая энергия $T = mv^2/2$	
Энергия электрического поля $W_e = CU^2/2$	Потенциальная энергия $\Pi = c_m F^2/2$	

4.2. ЭЛЕКТРОМЕХАНИЧЕСКИЕ АНАЛОГИИ

Почти вся электроакустическая аппаратура имеет в своем составе механическую систему как посредник между электрической и акустической системами. Для возможности использования хорошо разработанного аппарата в виде теории электрических четырехполюсников при анализе процессов, происходящих в сложных механических системах, разработаны методы электромеханических аналогий. Они позволяют сводить механические системы к электрическим. Наиболее распространенный метод электромеханических аналогий основан на аналогиях, приведенных в табл. 4.1. В табл. 4.2 приведены аналогии соединений механических и электрических элементов. Аналогом последовательного [а) и в)] соединения механических элементов, называемого цепочкой, является параллельное соединение электрических, а аналогом параллельного соединения [б) и г)] механических элементов (узла) является последовательное соединение электрических.

ТАБЛИЦА 4.2

Электромеханические аналогии соединения элементов

Механические элементы	Электрические аналогии	Формулы
 <p>а) v F</p>	 <p>а)</p>	$a) \quad c = c_{M1} + c_{M2}$
 <p>б) v F</p>	 <p>б)</p>	$б) \quad 1/c = 1/c_{M1} + 1/c_{M2} = s;$ $s = s_1 + s_2$
 <p>в) v F</p>	 <p>в)</p>	$в) \quad 1/r_M = 1/r_{M1} + 1/r_{M2}$
 <p>г) v F</p>	 <p>г)</p>	$г) \quad r_M = r_{M1} + r_{M2}$

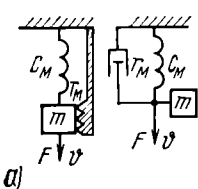
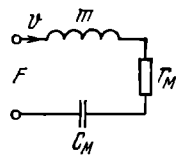

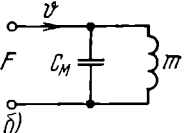
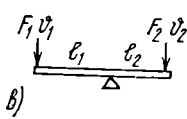
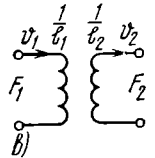
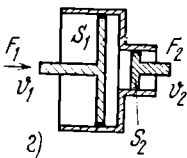
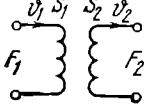
Для механической колебательной системы с параллельным соединением механических элементов уравнение вынужденных колебаний имеет вид

$$m \frac{d^2 x}{dt^2} + r_m \frac{dx}{dt} + \frac{x}{c_m} = F,$$

где F — сила, приложенная к узлу механических элементов; m — масса колебательной системы; r_m — активное сопротивление ее; c_m — гибкость системы. Это уравнение аналогично уравнению для контура с последовательным соединением электрических элементов (табл. 4.3, рис. а), т. е. узел механических сопротивле-

ТАБЛИЦА 4.3

Электрические аналоги механических систем

Механическая система	Электрические аналоги	Формула
 <p>а)</p>	 <p>а)</p>	<p>а) $F/v = z_m = r_m + i\omega m + 1/(i\omega c_m);$ $\omega_0 = 1/\sqrt{m c_m}$</p>
 <p>б)</p>	 <p>б)</p>	<p>б) $F/v = z_m = \frac{m/c_m}{i\omega m + \frac{1}{i\omega c_m}};$ $\rho = \sqrt{m/c_m}$</p>
 <p>в)</p>	 <p>в)</p>	<p>в) $F_1/F_2 = v_2/v_1 = l_2/l_1$</p>
 <p>г)</p>	 <p>г)</p>	<p>г) $v_2/v_1 = F_1/F_2 = p S_1/p S_2 = S_1/S_2$</p>

ний аналогичен контуру из электрических сопротивлений. Механическое сопротивление для такого узла

$$z_m = r_m + i\omega m + \frac{1}{i\omega c_m} = |Z_m| e^{i\psi}; \quad |Z_m| = \sqrt{r_m^2 + \left(\omega m - \frac{1}{\omega c_m}\right)^2};$$

$$\operatorname{tg} \psi = \frac{\omega m - 1/\omega c_m}{r_m},$$

где $|Z_m|$ — модуль сопротивления;
 ψ — фаза его.

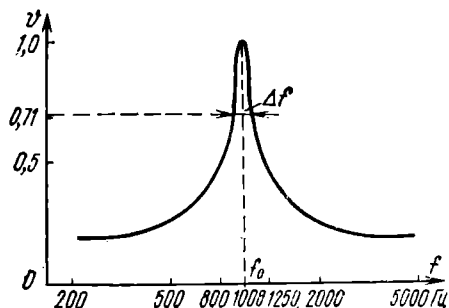


Рис. 4.1. Зависимость скорости колебаний от частоты для механической колебательной системы

На рис. 4.1 показана зависимость скорости колебаний v от частоты f при постоянстве амплитуды приложенной силы для рассматриваемой механической системы. Резонансная частота для механической системы

$$\omega_0 = \frac{1}{\sqrt{mc_m}} = \sqrt{\frac{s}{m}}; f_0 = \omega_0/2\pi \quad (s=1/c_m)$$

и добротность

$$D = f_0/\Delta f = \frac{1}{r_m} \sqrt{\frac{m}{c_m}} = \frac{Z_{\text{вол}}}{r_m},$$

где Δf — ширина полосы пропускания контура на уровне — 3 дБ; ($Z_{\text{вол}} = \sqrt{m/c_m}$) — волновое сопротивление контура.

На частотах выше резонансной ($\omega > \omega_0$) механическое сопротивление определяется инерционным сопротивлением, т. е. $z_m = i\omega m$, если только активное сопротивление не очень велико. На частотах ниже резонансной ($\omega < \omega_0$) механическое сопротивление определяется гибкостью, т. е. $z_m = 1/i\omega c_m$, с той же оговоркой, что и в предыдущем случае.

Механическая система в виде цепочки сопротивлений, состоящей из резинки, на которой подвешен грузик (так называемый «мяч-раскидай»), имеет аналог в виде электрической системы с параллельным соединением элементов (см. табл. 4.3, рис. б).

Далее, аналогом рычага первого рода является трансформатор, причем отношение плеч рычага l_1/l_2 соответствует коэффициенту трансформации n_2/n_1 (см. табл. 4.3, рис. в), а рычагу второго рода — автотрансформатор.

Одним из видов механического трансформатора с акустической связью является соединение двух поршневых диафрагм с помощью двух трубок небольших (по сравнению с длиной волны) диаметра и длины (см. табл. 4.3, рис. г). Давление в обеих трубках по закону Паскаля одинаково, поэтому отношение сил (при условии несжимаемости воздуха) обратно пропорционально отношению скоростей в трубках:

$$\frac{F_1}{F_2} = \frac{\rho S_1}{\rho S_2} = \frac{v_2}{v_1},$$

а коэффициент трансформации равен отношению сечений трубок, т. е. $n_2/n_1 = S_2/S_1$. Такой трансформатор применяется в электроакустической аппаратуре для преобразования сопротивлений в целях их согласования.

Приведем параметры некоторых механических систем.

Мембрана, натянутая по периметру, имеет основную резонансную частоту

$$f_0 = \frac{0,38}{r} \sqrt{\frac{\tau}{\rho h}},$$

где τ — натяжение мембраны; h — толщина ее; r — радиус; ρ — плотность материала. Для расчета резонансной частоты более высоких порядков m и n (где m — число узловых диаметров; n — число узловых окружностей; $n=1$ соответствует окружности по периметру мембраны) полученные из формулы величины необходимо умножать на следующие коэффициенты k :

m	0	1	2	0	1	2	0	1	2
n	1	1	1	2	2	2	3	3	3
k	1,0	1,6	2,1	2,3	2,9	3,5	3,6	4,2	4,8

Предельное значение основной резонансной частоты определяется пределом текучести материала мембраны (для алюминия допустимое натяжение $\tau_{\max} = 7 \cdot 10^7$ Н/м, для дюралюминия $\tau_{\max} = 15 \cdot 10^7$ Н/м).

Пример. Определить предельную основную резонансную частоту для дюралюминиевой мембраны ($\rho = 2,51 \cdot 10^3$ кг/м³) толщиной 10 мкм (10^{-5} м) и радиусом 10^{-2} м. Допустимое натяжение $\tau_{\max} = 15 \cdot 10^7 \cdot 10^{-5} = 1500$ Н/м. Предельная резонансная частота

$$f_{0\text{ пр}} = \frac{0,38}{10^{-2}} \sqrt{\frac{1500}{2,51 \cdot 10^3 \cdot 10^{-5}}} = 9290 \text{ Гц.}$$

В диапазоне частот до 20 кГц эта мембрана будет иметь еще два резонанса: на частотах $f_{1\text{ вр}} = 1,6 \cdot 9290 = 14864$ Гц и $f_{2\text{ вр}} = 2 \cdot 1 \cdot 9290 = 19509$ Гц, т. е. для одного и двух узловых диаметров.

Эквивалентная масса мембраны (в диапазоне до основного резонанса) $m_{\text{экр}} = 0,3 m$, где m — фактическая масса мембраны. Для данного примера $m = 2,51 \times 10^3 \cdot 10^{-5} \pi (2 \cdot 10^{-2})^2 / 4 = 7,89 \cdot 10^{-6}$ кг, а эквивалентная масса $m_{\text{экр}} = 0,3 \cdot 7,89 \times 10^{-6} = 2,37 \cdot 10^{-6}$ кг.

Эквивалентная упругость определяется из величин резонансной частоты и эквивалентной массы: $s_{\text{экр}} = \omega_0^2 m_{\text{экр}}$, или $s_{\text{экр}} = 0,54$ т. Для данного примера эквивалентная упругость $s_{\text{экр}} = 4\pi^2 9290^2 \cdot 2,37 \cdot 10^{-6} = 8,07 \cdot 10^3$ Н/м, или $s_{\text{экр}} = 0,54 \cdot 15 \times 10^3 = 8,07 \cdot 10^3$ Н/м.

Круглая диафрагма с центральной жесткой частью имеет упругость

$$s = 3,14 \frac{E}{1 - \sigma^2} \frac{\alpha + 1}{(\alpha - 1)^3} b \beta^3,$$

где E и σ — модуль упругости и коэффициент Пуассона для материала воротника диафрагмы; h — толщина воротника; r — радиус диафрагмы; b — радиус ее жесткой части; $\alpha = r/b$; $\beta = h/b$.

Пример. Найти упругость алюминиевой диафрагмы с радиусом $r = 3$ см, радиусом жесткой части $b = 2$ см, толщиной воротника $h = 0,1$ мм. Для алюминия $E = 7 \cdot 10^{10}$ Н/м²; $\sigma = 0,33$ (см. табл. 4.5). Подставляя эти данные в формулу, получаем упругость

$$s = 3,14 \frac{7 \cdot 10^{10} \left(\frac{3}{2} + 1 \right)}{(1 - 0,33^2) \left(\frac{3}{2} - 1 \right)^3} 2 \cdot 10^{-2} \left(\frac{10^{-4}}{2 \cdot 10^{-2}} \right)^3 = 1,23 \cdot 10^4 \text{ Н/м.}$$

Следовательно, гибкость $c_M = \frac{1}{s} = 0,813 \cdot 10^{-4}$ м/Н.

Эквивалентная масса такой диафрагмы $m_{\text{экр}} = m_{\text{ж}} + 0,3 m_{\text{в}}$, где $m_{\text{ж}}$ и $m_{\text{в}}$ — массы жесткой части и воротника диафрагмы.

Если жесткая часть имеет толщину 1 мм, то ее масса $m_{ж}=2,51 \cdot 10^{-3} \times \times 10^3 \pi \cdot 2^2 \cdot 10^{-4} = 3,15 \cdot 10^{-3}$ кг. Эквивалентная масса воротника и диафрагмы соответственно:

$$m_{в} = 0,3 \cdot 2,51 \cdot 10^3 \cdot 10^{-4} \cdot \pi (3^2 - 2^2) \cdot 10^{-4} = 0,12 \cdot 10^{-3} \text{ кг};$$

$$m_{эКВ} = (3,15 + 0,3 \cdot 0,12) \cdot 10^{-3} = 3,27 \cdot 10^{-3} \text{ кг}.$$

Резонансная частота диафрагмы

$$f_0 = \frac{1}{2\pi} \sqrt{\frac{s}{m_{эКВ}}}$$

Для данного случая

$$f_0 = \frac{1}{2\pi} \sqrt{\frac{1,23 \cdot 10^4}{3,27 \cdot 10^{-3}}} = 309 \text{ Гц}.$$

Круглая, зажатая по периметру, пластинка имеет упругость и основную резонансную частоту соответственно:

$$s = 4,19 \frac{E}{1-\sigma^2} \frac{h^3}{r^2}; f_0 = 0,47 \frac{h}{r^2} \sqrt{\frac{E}{\rho(1-\sigma^2)}},$$

где E и σ — модуль упругости и коэффициент Пуассона для материала пластинки; h — толщина пластинки и r — радиус ее; ρ — плотность материала.

Эквивалентная масса пластинки $m_{эКВ} = 0,151 m$, где m — фактическая масса пластинки.

Для определения резонансной частоты сложного колебания полученные значения основной частоты необходимо умножить на следующие коэффициенты: 1, 6, 15, 28 соответственно числу узловых окружностей: 1, 2, 3, 4.

Пример. Найти основную резонансную частоту, упругость и эквивалентную массу стальной пластинки радиусом 2 см и толщиной 0,2 мм. Для стали из табл. 4.5 находим модуль $E = 2 \cdot 10^{11}$ Н/м², коэффициент Пуассона $\sigma = 0,28$ и плотность $\rho = 7,8$ кг/м³.

Основная резонансная частота

$$f_0 = 0,47 \frac{2 \cdot 10^{-4}}{(2 \cdot 10^{-2})^2} \sqrt{\frac{2 \cdot 10^{11}}{7,8 \cdot 10^3 (1 - 0,28^2)}} = 1240 \text{ Гц}.$$

Упругость

$$s = 4,19 \frac{2 \cdot 10^{11}}{(1 - 0,28^2)} \frac{(2 \cdot 10^{-4})^3}{(2 \cdot 10^{-2})^2} = 18,2 \cdot 10^3 \text{ Н/м}.$$

Эквивалентная масса $m_{эКВ} = 0,151 \cdot 7,8 \cdot 10^3 \cdot 2 \cdot 10^{-4} \pi (2 \cdot 10^{-2})^2 = 3 \cdot 10^{-4}$ кг.

Круглая, опертая по периметру, пластинка имеет упругость и резонансную частоту соответственно:

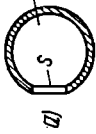
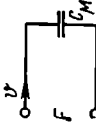
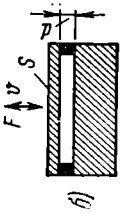
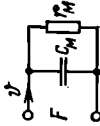
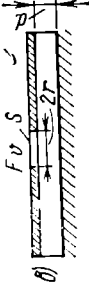
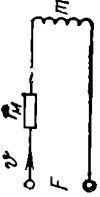
$$s = 4,19 \frac{E(1+\sigma)}{(1-\sigma^2)(3+\sigma)} \frac{h^3}{r^2}; f_0 = 0,225 \frac{h}{r^2} \sqrt{\frac{E}{\rho(1-\sigma^2)}},$$

Эквивалентная масса $m_{эКВ} = 0,28 m$.

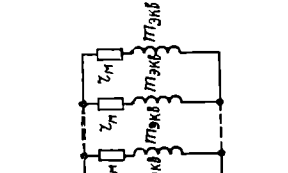
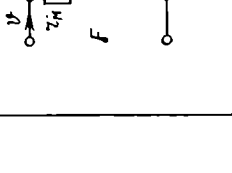
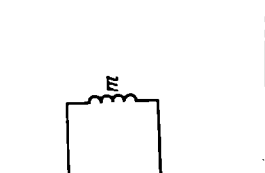
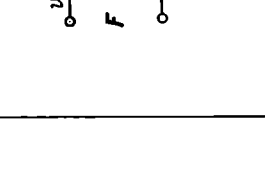
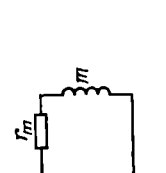
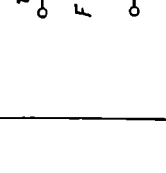
Для пластинки из предыдущего примера упругость будет меньше в $(3 + \sigma)/(1 + \sigma) = 3,33/1,33$ раза, а резонансная частота в $(0,47/0,225)^2$ раз меньше, т. е. $f_0 = 595$ Гц; $s = 7,27 \cdot 10^5$ Н/м. Эквивалентная масса $m_{эКВ} = 0,28 \cdot 19,6 \cdot 10^{-4} = 5,23 \cdot 10^{-4}$ кг, т. е. в 1,74 раза больше, чем для зажатой пластинки.

ТАБЛИЦА 4.4

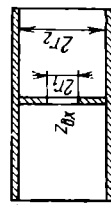
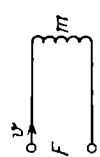
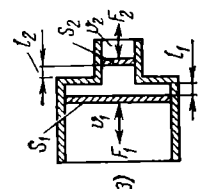
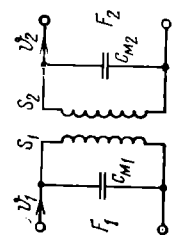
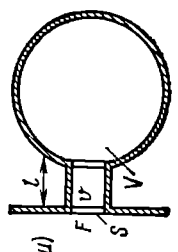
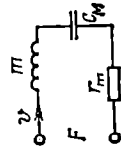
Акустические элементы и системы

Описание	Чертеж	Аналоговая схема	Входное сопротивление
1	2	3	4
а. Замкнутый объем V с горлом площадью $S = \pi r^2$ без учета сопротивления излучения			$Z_{ВХ} = 1/i\omega C_M;$ $C_M = V/\rho c^2 S^3$
б. Слой воздуха между двумя параллельными дисками площадью S . Один диск колеблется по своей оси под действием силы F . Радиальное движение воздуха отсутствует. Толщина слоя $d \ll \lambda_{\text{зв}}$			Для жестких дисков $Z_{ВХ} = 1/i\omega C_M, R_M \approx 0;$ $C_M = d/\rho c^2 S.$ Для мембран с учетом радиального движения воздуха $Z_{ВХ} = r_M + 1/i\omega C'_M,$ $C'_M = (4 \pm 7) C_M,$ r_M изменяется в широких пределах
в. Круглое отверстие радиуса r (в бесконечно тонкой стене), излучающее в одну сторону, $d \ll \lambda$			$Z_{ВХ} = r_M + i\omega m,$ $r_M = \pi \rho \omega^2 r^4 / 2c, \quad m = \pi^2 \rho r^3 / 2$ при $r \ll \lambda, r_M \rightarrow 0$

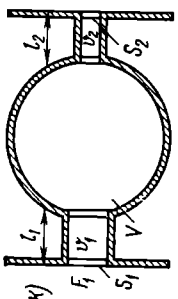
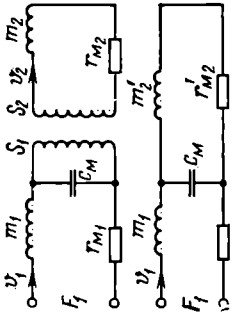
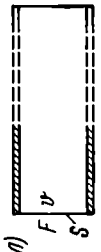
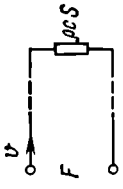
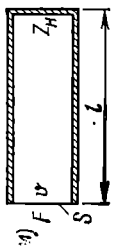
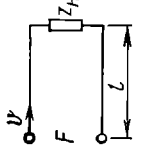
Продолжение табл. 4.4

1	2	3	4
<p>г. n круглых отверстий каж- дое площадью $S = \pi r^2$ в тонкой перегородке бес- конечных размеров, если объем за перегородкой, на приходящийся на одно отверстие, $V_1 > \lambda^3_{\text{макс}}/4\pi$</p>			$Z_{BX} = (r_m + i \omega m) / n,$ r_m и m см. п. в
<p>д. Труба с поперечным се- чением $S = \pi r^2$ и дли- ной l в толстой и широ- кой стене без учета по- терь, b — ширина стены, при $l < \lambda_{\text{мин}}$ $b > \lambda_{\text{макс}}$</p>			$Z_{BX} = i \omega m, \quad m = \pi r^2 I_{\text{эKB}},$ $I_{\text{эKB}} = l + 16 r / 3 \pi$
<p>е. Узкая трубка длиной $l < \lambda$ и сечением $S = \pi r^2$. β — коэффициент тепло- проводности стенок</p>			$Z_{BX} = r_m + i \omega m, \quad r_m = 8 \pi \beta l \beta \alpha,$ $m = 4 \pi r l r^2 / 3, \quad 1 < \beta < 2,$ α см. рис. 4.2 ($\alpha = 1$ при $r^2 < \mu \pi r$)

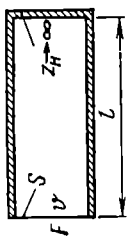
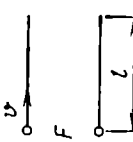
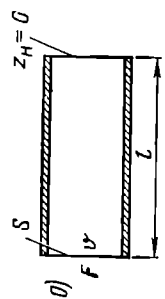
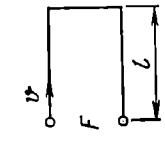
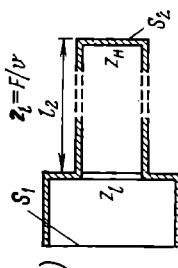
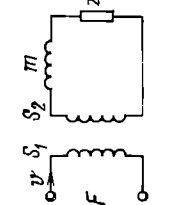
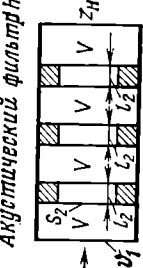
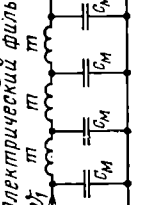
Продолжение табл. 4.4

1	2	3	4
<p>ж. Отверстие с радиусом r_1 в перегородке, стоящей поперек трубы с радиусом r_2 без учета потерь на вязкость, φ — функция Фока</p>			$z_{BX} = i \omega m,$ $m = 0,5 \pi^2 \rho r_1^3 \varphi(r_1/r_2),$ $\varphi(r_1/r_2) = 1 - 1,47 (r_1/r_2)^2 + 0,338 (r_1/r_2)^3 + 0,079 (r_1/r_2)^4$
<p>з. Механический трансформатор из двух трубок при учете сжимаемости воздуха</p>			$n = S_2/S_1, \quad c_{M1} = l_1/\rho c^2 S_1,$ $c_{M2} = l_2/\rho c^2 S_2,$ $c'_{M2} = l_2 S_2/\rho c^2 S_1^2$
<p>и. Резонатор Гельмгольца с объемом V и офланцованной трубкой длиной l и сечением $S = \pi r^2$ с учетом излучения горла и вязкости воздуха в нем</p>			$z_{BX} = r_M + i \omega m + 1/i \omega c_M,$ $r_M = S^2 [\rho \omega^2/4 \pi c + (l/\pi r^3) \sqrt{2 \rho \mu \omega}],$ $m = \rho S l', \quad l' = l + 1,48 r,$ $c_M = V/\rho c^2 S^2, \quad f_0 = V/l' V/2\pi,$ $D = \omega m/r_M, \quad \Delta f = f_0/D$

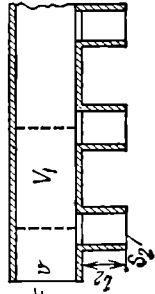
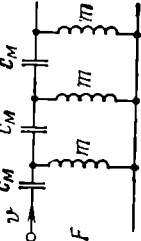
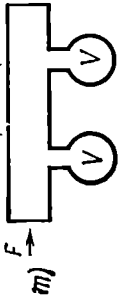
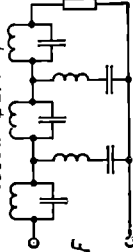
Продолжение табл. 4.4

1	2	3	4
<p>к. Двойной Гельмгольца с объемом V и длинами трубок l_1 и l_2 и сечениями S_1 и S_2</p>			$m'_2 = m_2 S_1^2 / S_2^2$ $r'_{M2} = r_{M2} S_1^2 / S_2^2$
<p>л. Длинная узкая труба без отражения от конца</p>			$z_{BX} = z_{вол} = \rho c S$
<p>м. Труба длиной l и сечением S, нагруженная на конце механическим сопротивлением z_H</p>			$z_{вол} = \rho c S$ $z_{BX} = \rho c S \frac{z_H + i \rho c S \operatorname{tg}(\omega l / c)}{\rho c S + i z_H \operatorname{tg}(\omega l / c)}$ <p>при $z_H = \rho c S$ $z_{BX} = \rho c S$, при $l \ll \lambda$ $z_{BX} = (z_H + i \omega m) / (1 + i \omega c_M z_H)$, для $z_H \gg \omega m$ $z_{BX} = z_H / (1 + i \omega c_M z_H)$, для $z_H \ll 1 / \omega c_M$, $z_{BX} = z_H + i \omega m$, $m = \rho l S$, $c_M = l / \rho c^2 S$</p>

Продолжение табл. 4.4

1	2	3	4
н. То же, закрытая с одного конца ($z_H \rightarrow \infty$)			$z_{BX} = -i \rho c S \operatorname{ctg}(\omega l/c),$ при $l < \lambda$ $z_{BX} \approx l/i \omega c_M,$ $c_M = l/\rho c^2 S$
о. То же, открытая с обоих концов ($z_H \approx 0$)			$z_{BX} = i \rho c S \operatorname{tg}(\omega l/c),$ при $l < \lambda$ $z_{BX} \approx i \omega m,$ $m = \rho S l',$ $l' = l + 1,48 r,$ $r = \sqrt{S/\pi}$
п. Труба сечением $S_1 = \pi r_1^2$, нагруженная на конце тонкой трубкой длиной l_2 и сечением $S_2 = \pi r_2^2$, с нагрузкой на конце механическим сопротивлением z_H			Нагрузка на конце широкой трубы $z_L = (z_H + i \omega m) S_2^2 / S_1^2,$ $m = \rho S_2 l_2 + 16 \rho r_2 S_2 / 3 \pi$
р. Отрезки широких и узких трубок, соединенные между собой последовательно			$m = \rho S_2 l_2, \quad c_M = V_1 / \rho c^2 S_1^2,$ $\Theta_{гр} = 2c \sqrt{S_2 / l_2} V_1 = 2 \omega_0,$ $\gamma = \operatorname{Arth} \left[\sqrt{1 - \omega_0^2 / \omega^2} / (1 - 2 \omega_0^2 / \omega^2) \right]$

Продолжение табл. 4.4

1	2	3	4
<p>с. Труба с ответвлениями в виде трубок с открытыми концами</p>			<p> $m = \rho S_2 l'_2, \quad c_M = V_1 / \rho c^2 S_1^2,$ $\omega_{гр} = 0,5 c \sqrt{S_2 / V_1 l'_2} = 0,5 \omega_0,$ $\gamma = \text{Ar ch} [\cos (\omega l_1 / c) + (c S_2 / 2 \omega S_1 l_2) \sin (\omega l_1 / c)]$ </p>
<p>т. То же, в виде резонаторов Гельмгольца</p>		<p>Электрический полусовой фильтр</p> 	<p>—</p>

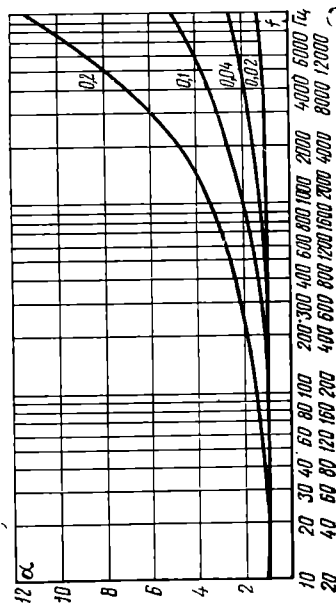


Рис. 4.2. Поправочный коэффициент α в зависимости от частоты и теплопроводности стенок. Верхний ряд абсцисс для теплоизолированных стенок, $\beta=1$, нижний — для теплопроводных, $\beta=2$. Параметр кривых — радиус трубки

4.3. ЭЛЕКТРОАКУСТИЧЕСКИЕ АНАЛОГИИ

Для анализа акустических систем разработан метод электроакустических аналогий. По этому методу давление p считают аналогом напряжения, скорость колебаний v — аналогом плотности тока, а объемную скорость колебаний $U_a = vS$ (где S — поперечное сечение звукопровода) — аналогом тока. Для трубки длиной l акустическая масса $m_a = m/S^2 = \rho l/S$ и акустическое активное сопротивление $r_a = r_m/S^2$. Для объема V акустическая гибкость $c_a = c_m S^2 = V/\gamma p_{a.c.}$. Методом этих аналогий удобно пользоваться при рассмотрении устройств, состоящих только из акустических систем, например акустических фильтров. Комбинации из акустических и механических систем можно рассматривать и с помощью электроакустических аналогий. При этом все механические сопротивления надо заменить на соответствующие им акустические, а силы и скорости — на давления и объемные скорости по формулам $z_a = z_m/S^2$, $p = F/S$, $U = vS$, где S — величина площади диафрагмы или мембраны. При рассмотрении этих систем можно пользоваться для каждой системы своими аналогиями, но при этом в аналоговой схеме между механической и акустической системами приходится включать трансформатор. Число витков его с механической стороны численно равно площади диафрагмы, а с акустической — равно единице. Но все же для рассмотрения этих систем удобнее всего единая система электро-механических аналогий. При рассмотрении чисто акустических систем также можно пользоваться электромеханическими аналогиями, но в такой аналоговой схеме в каждом стыке двух звукопроводов с разными поперечными сечениями надо включать трансформаторы с коэффициентом трансформации S_k/S_{k+1} , где S_k и S_{k+1} — сечения звукопровода в смежных участках его, или все акустические элементы приводить к одному поперечному сечению, например входному отверстию S_0 . Это приведение делается по формулам: механические массы $m = m_a S_0^2$, механические активные сопротивления $r_m = r_a S_0^2$, механические гибкости $c_m = c_a/S_0^2$.

С помощью электромеханических аналогий рассмотрим применяемые в практике акустические элементы и системы (см. табл. 4.4). Следует иметь в виду, что за исключением п. б) сила, действующая на входе элемента или системы, $F = pS$, где p — звуковое давление на этом входе, а S — площадь входного отверстия.

4.4. ЭЛЕКТРОМЕХАНИЧЕСКИЕ ПРЕОБРАЗОВАТЕЛИ

Электромеханические преобразователи являются четырехполюсниками, у которых одна сторона механическая, а другая — электрическая. Большинство электромеханических преобразователей (кроме угольных, транзисторных и ионных), используемых в электроакустической аппаратуре, являются обратимыми и практически линейными преобразователями. Электромеханические преобразователи делят на генераторы, преобразующие механическую энергию в электрическую, и двигатели, преобразующие механическую энергию в электрическую.

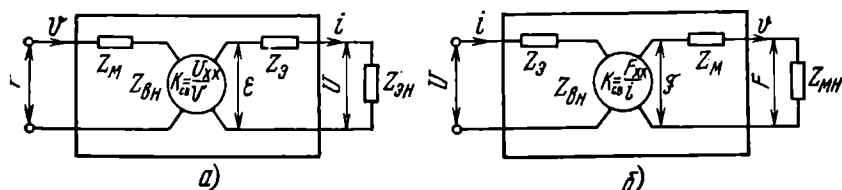


Рис. 4.3. Механический четырехполюсник — генератор (а) и электромеханический четырехполюсник — двигатель (б)

Для генератора (рис. 4.3а) уравнения четырехполюсника имеют вид:

$$F_{\Gamma} = z_{\text{м.г}} v_{\Gamma} + K_{\text{д}} i_{\Gamma} = (z_{\text{м.г}} + z_{\text{вн.г}}) v_{\Gamma} = z_{\text{вх.г}} v_{\Gamma};$$

$$U_{\Gamma} = K_{\Gamma} v_{\Gamma} - z_{\text{э.г}} i_{\Gamma} = \mathcal{E}_{\Gamma} - z_{\text{э.г}} i_{\Gamma},$$

а для двигателя (рис. 4.3б):

$$U_{\text{д}} = z_{\text{э.д}} i_{\text{д}} + K_{\Gamma} v_{\text{д}} = (z_{\text{э.д}} + z_{\text{вн.д}}) i_{\text{д}} = z_{\text{вх.д}} i_{\text{д}};$$

$$F_{\text{д}} = K_{\text{д}} i_{\text{д}} - z_{\text{м.д}} v_{\text{д}} = \mathcal{F}_{\text{д}} - z_{\text{м.д}} v_{\text{д}},$$

где K_{Γ} — коэффициент электромеханической связи для генератора; $K_{\text{д}}$ — коэффициент электромеханической связи для двигателя:

$$K_{\Gamma} = \frac{\mathcal{E}_{\Gamma}}{v_{\Gamma}} = \frac{U_{\Gamma}}{v_{\Gamma}} \Big|_{i_{\Gamma}=0}; \quad K_{\text{д}} = \frac{\mathcal{F}_{\text{д}}}{i_{\text{д}}} = \frac{F_{\text{д}}}{i_{\text{д}}} \Big|_{v_{\text{д}}=0}.$$

Интересно отметить, что когда двигатель заторможен (т. е. когда скорость его равна нулю), то это соответствует холостой работе четырехполюсника, так как в этом случае сопротивление нагрузки $z_{\text{м.н}}$ бесконечно большое и ток во вторичной цепи равен нулю. А холостая работа двигателя соответствует его работе на небольшое сопротивление нагрузки (скорость наибольшая, т. е. выходной «ток» в четырехполюснике максимальный). Для обратимых четырехполюсников $|K_{\Gamma}| = |K_{\text{д}}| = K_{\text{св}}; z_{\text{вн.г}} = K_{\text{св}}^2 / (z_{\text{э.г}} + z_{\text{э.н}})$ — вносимое сопротивление для генератора; $z_{\text{вн.д}} = K_{\text{св}}^2 / (z_{\text{м.д}} + z_{\text{м.н}})$ — вносимое сопротивление для двигателя; \mathcal{E}_{Γ} — ЭДС генератора; $\mathcal{F}_{\text{д}}$ — усилие двигателя; $z_{\text{вх.г}}$ — входное (механическое) сопротивление генератора; $z_{\text{вх.д}}$ — входное (электрическое) сопротивление двигателя; $z_{\text{м.г}}$ — собственное (механическое) сопротивление генератора; $z_{\text{м.д}}$ — внутреннее (механическое) сопротивление двигателя ($z_{\text{м.г}} = z_{\text{м.д}} = z_{\text{м}}$); $z_{\text{э.д}}$ — собственное (электрическое) сопротивление двигателя; $z_{\text{э.г}}$ — внутреннее (электрическое) сопротивление генератора ($z_{\text{э.д}} = z_{\text{э.г}} = z_{\text{э}}$); $z_{\text{э.н}}$ — электрическое сопротивление нагрузки генератора; $z_{\text{м.н}}$ — механическое сопротивление нагрузки двигателя; F_{Γ} — сила, приложенная к генератору; v_{Γ} — скорость генератора; i_{Γ} — ток нагрузки генератора; U_{Γ} — напряжение на нагрузке генератора; $U_{\text{д}}$ — напряжение, приложенное к двигателю; $i_{\text{д}}$ — ток в двигателе; $v_{\text{д}}$ — скорость двигателя; $F_{\text{д}}$ — сила, действующая на нагрузку двигателя.

Для электродинамических типов электроакустической аппаратуры (рис. 4.4

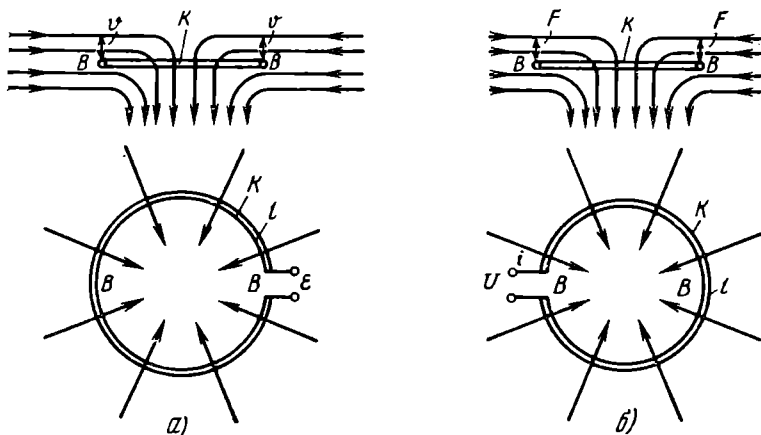


Рис. 4.4. Преобразователь динамического типа (катетерный вариант):

а) механоэлектрический; б) электромеханический;

K — катушка с проводом длиной l ; B — индукция поля вблизи катушки

и 4.5) наводимая ЭДС в проводнике, пересекающем магнитное поле, $\mathcal{E} = Blv$, а усилие, действующее на проводник с током, $F = Bli$, где B — индукция поля; l — длина проводника. Коэффициент электромеханической связи для этих систем $K_{св} = Bl$.

Если взять конденсатор с постоянным напряжением на его обкладках, равным U_0 , и одну из его обкладок колебать с переменной скоростью v (рис.

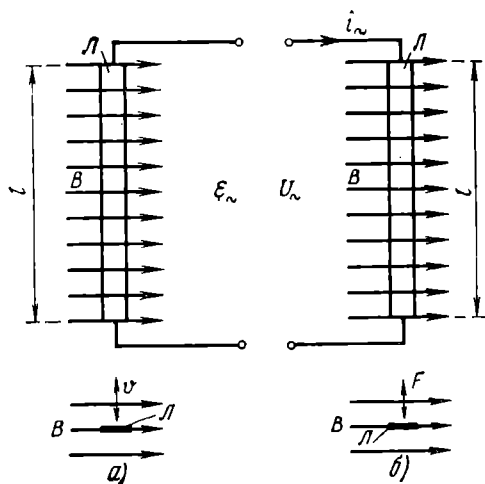


Рис. 4.5. Преобразователь динамического типа (ленточный вариант): а) механоэлектрический; б) электро-механический; l — ленточка длиной l ; B — индукция поля вблизи ленточки

4.6а), то конденсатор будет создавать переменную ЭДС $\mathcal{E} = U_0 v / i\omega d$, где d — расстояние между обкладками конденсатора в отсутствие колебаний; ω — частота колебаний. С другой стороны, если через этот конденсатор будет проте-

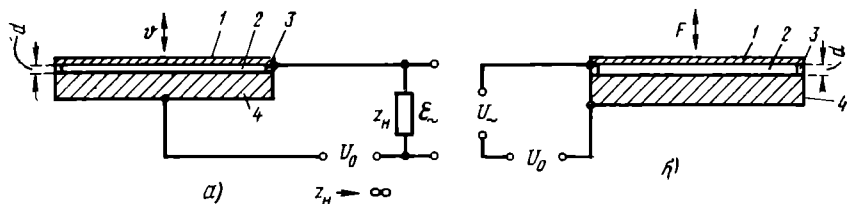


Рис. 4.6. Преобразователь конденсаторного типа:

а) механоэлектрический; б) электро-механический;

d — расстояние между электродами; U_0 — постоянное напряжение на конденсаторе; 1 — мембрана; 2 — зазор между электродами; 3 — изоляция; 4 — неподвижный электрод

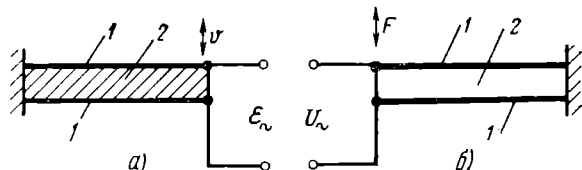
чать переменный ток i_{\sim} , вызванный приложенным к нему переменным напряжением $U_{\sim} \ll U_0$ (рис. 4.6б), то между обкладками конденсатора будет действовать переменная сила (усилие) $\mathcal{F} = U_0 i_{\sim} / i\omega d$.

Следовательно, электрический преобразователь конденсаторного (а также электретного) типа имеет коэффициент электромеханической связи $K_{св} = U_0 / \omega d$.

Если пластинку пьезокристалла, вырезанную соответствующим образом (или пластинку из пьезокерамики), деформировать, например заставить один из ее концов колебаться со скоростью v (рис. 4.7а), то на ее электродах образуется переменная ЭДС $\mathcal{E} = k_0 l^2 v / i\omega h^2$, где l — длина пластинки; h — толщина ее; k_0 — коэффициент пьезоэффекта. Если же на электроды такой пластинки подать переменное напряжение U_{\sim} , вызывающее ток i_{\sim} (рис. 4.7б), то пластинка будет

испытывать переменную силу (усилие) $\mathcal{F} = k_0 l^2 i_{\sim} / \omega h^2$. Поэтому коэффициент связи для электромеханического преобразователя пьезосистем с изгибной деформацией имеет вид $K_{св} = k_0 l^2 / \omega h^2$.

Рис. 4.7. Преобразователь пьезоэлектрического типа: а) механоэлектрический; б) электромеханический; 1 — электроды; 2 — пластинка кристалла (или керамики)



Если мембрану из ферромагнитного материала приближать к полюсным наконечникам постоянного магнита или удалять от них (например, колебать) со скоростью v (рис. 4.8а), т. е. изменять величину магнитного потока, протекающего через сердечники катушек, то в катушках будет индуцироваться переменная

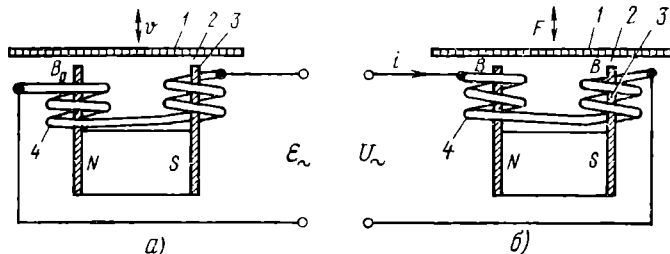


Рис. 4.8. Преобразователь электромагнитного типа: а) механоэлектрический; б) электромеханический; B_0 — постоянная составляющая индукции в магнитной цепи; 1 — мембрана; 2 — зазор в магнитной цепи; 3 — полюсный наконечник, т. е. сердечник катушки; 4 — катушки

ЭДС $\mathcal{E} = B_0 L_K v / n$, где n — число витков катушек; B_0 — индукция в магнитной цепи (в отсутствие колебаний); L_K — индуктивность катушек. С другой стороны, если к катушкам приложить переменное напряжение U , создающее в них ток i_{\sim} (рис. 4.8б), то при условии $B_{\sim} \ll B_0$ (где B_{\sim} — переменная составляющая индукции в магнитной цепи) на мембрану будет действовать переменная сила (усилие) $\mathcal{F} = B_0 L_K i_{\sim} / n$. Ввиду этого электромеханический преобразователь электромагнитного типа имеет коэффициент электромеханической связи $K_{св} = B_0 L_K / n$.

4.5. МЕТОДЫ СОСТАВЛЕНИЯ АНАЛОГОВЫХ СХЕМ

Было разработано несколько методов составления аналоговых схем механических систем. Во всех методах сначала строится механическая система, т. е. каждый механический конструктивный элемент заменяется узлами и цепочками, состоящими из механических элементов: массы, гибкости, активного сопротивления и трансформаторов. Так, например, диафрагма заменяется узлом, состоящим из массы, гибкости и активного сопротивления (см. табл. 4.3а). Акустические элементы заменяют механическими: отверстие или узкую трубку — массой¹, объем — гибкостью (см. табл. 4.4д). Если под диафрагмой находится небольшая камера или тонкий слой воздуха, то это означает, что масса диафрагмы подве-

¹ Следует иметь в виду, что масса считается несжимаемой и поэтому имеет одну точку включения.

шена на двух параллельных пружинах (гибкостях). Если за камерой находится узкая трубка или отверстие, то их масса помещается за соответствующей камере пружиной. Если за отверстием или трубкой находится большой объем, то за массой отверстия должна включаться пружина (гибкость), соответствующая этому объему. Если из камеры есть еще ответвление в виде трубки (или узкой щели), то за пружиной, соответствующей этой камере, надо включить массу щели. Если эта щель соединена с объемом, в которую вело предыдущее отверстие, то масса присоединяется к концу пружины, соответствующей объему, и т. п. Ткань, фильц или тонкая пленка, закрывающая отверстие, заменяется активным механическим сопротивлением, соединенным в узел с массой.

На рис. 4.9а показана конструкция акустико-механической системы. На рис. 4.9б дано построение ее в виде системы, состоящей из масс, гибкостей и активных сопротивлений.

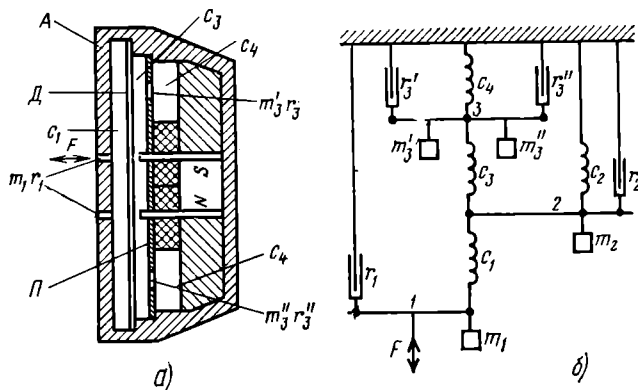


Рис. 4.9. Конструкция механической системы (а) и соответствующая ей механическая система (б); m_1 — масса воздуха в каналах амбушюра А; r_1 — активное сопротивление каналов; c_1 — гибкость объема воздуха над диафрагмой Д; m_2 — масса диафрагмы; c_2 — гибкость ее; r_2 — активное сопротивление (потери в диафрагме); c_3 — гибкость объема воздуха под диафрагмой; m'_3 и m''_3 — массы воздуха в двух отверстиях, в перегородке П под диафрагмой; r'_3 и r''_3 — активные сопротивления, вносимые материей, закрывающей отверстия в перегородке; c_4 — гибкость объема воздуха под перегородкой

Поясним это построение. На входе рассматриваемой системы, являющейся электромагнитным микрофоном, действует сила $F = pS$, где S — общая площадь входных отверстий микрофона, а p — звуковое давление около микрофона. Сила F приложена к массе m_1 , соответствующей массе воздуха в отверстиях амбушюра. В этих же отверстиях находится и активное сопротивление r_1 (трение о стенки отверстия, вязкость воздуха, излучение и т. д.), и поэтому сила приложена и к этому сопротивлению. Масса воздуха в отверстиях практически несжимаема, поэтому сила F полностью воздействует и на объем, находящийся за ними, т. е. на гибкость c_1 объема воздуха над диафрагмой. Имеем узел 1 из m_1 , r_1 и c_1 . Звуковое давление, создающееся в объеме над диафрагмой, действует на диафрагму Д, которая представляет собой узел сопротивлений 2 из m_2 , r_2 и c_2 . Но, кроме того, то же давление должно преодолевать сопротивление объема воздуха c_3 под диафрагмой. Поэтому его упругость $s_2 = 1/c_3$ складывается (см. табл. 4.2б) с упругостью диафрагмы $s_2 = 1/c_2$. Звуковое давление, создающееся в этом объеме, воздействует на массу, находящуюся в отверстиях перегородки П (m'_3 и m''_3). Кроме того, эти отверстия представляют собой активные сопротивления r'_3 и r''_3 , которые входят в узел 3. Через эти отверстия звуковое давление действует на внутренний объем воздуха, имеющий гибкость c_4 . Так как масса воздуха в отверстиях практически несжимаема, то на гибкость c_4 действует то же дав-

ление, что и на массу воздуха в отверстиях, поэтому гибкость c_4 входит в узел 3.

Построим для системы рис. 4.9б аналоговую электрическую схему, для чего воспользуемся методом Белова. По этому методу берется узел 1, к которому приложена сила, и строится контур из всех элементов, входящих в данный узел с включением в него напряжения (силы). Затем строится следующий контур, со-

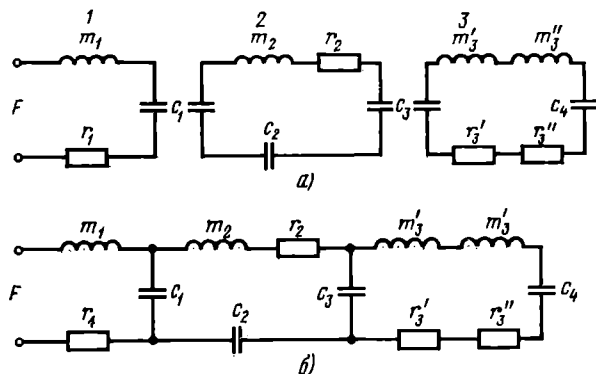


Рис. 4.10. Пример построения аналоговой схемы: а) последовательность построения; б) окончательная аналоговая схема

ответствующий узлу 2, в который входят его элементы (m_2 , r_2 , c_2 , c_3) и общий элемент с первым контуром (c_1) и т. д.

Можно для каждого узла построить контур и затем совмещать их путем совмещения одноименных элементов. Покажем это на примере. На рис. 4.10а показаны такие контуры для каждого из узлов схемы предыдущего примера. На рис. 4.10б показана окончательная аналоговая схема.

4.6. МАТЕРИАЛЫ, ПРИМЕНЯЕМЫЕ В ЭЛЕКТРОАКУСТИЧЕСКОЙ АППАРАТУРЕ И АКУСТИЧЕСКИХ УСТРОЙСТВАХ

В конструкциях электромеханических и электроакустических преобразователей применяется ряд материалов, часть из которых являются чисто конструкционными, как, например, диффузордержатели электродинамических громкоговорителей. Их физико-механические параметры могут меняться в довольно широких пределах, не влияя существенным образом на режим работы преобразователя. Физико-механические же параметры других материалов являются весьма существенными для обеспечения заданного режима работы преобразователя.

К таким материалам относятся металлы и пластмассы (табл. 4.5), из которых изготавливаются диафрагмы преобразователей: пьезоэлектрические, магнитно-твердые и магнитно-мягкие материалы для изготовления магнитных систем преобразователей, проводниковые материалы. Существенное значение имеет такой «материал», который входит в состав любого акустического преобразователя и оказывает большое влияние на его работу, — воздух.

Свойства воздуха таковы, что при 0°C и 760 мм рт. ст. ($1,04 \cdot 10^5$ Па) скорость звука равна 331 м/с, а плотность его $1,29 \cdot 10^3$ кг/м³; при 20°C и 760 мм рт. ст. скорость звука равна 343 м/с и плотность $1,2 \cdot 10^3$ кг/м³.

Постоянные магниты изготавливаются из магнитно-твердых материалов. Применяемыми в советской промышленности материалами для изготовления литых

ТАБЛИЦА 4.5

Твердые материалы и их параметры

Материал	Плотность, кг/м ³ ×10 ³	Модуль Юнга, Н/м ² ×10 ⁹	Скорость звука, м/с×10 ³	Удельное акустическое сопротивление, кг/см ² ×10 ⁸
Алюминий	2,7	70	5,1	13,7
Бериллий	1,85	300	12,6	23,3
Бор	2,3	74	13,5	31
Магний	1,74	45	5,1	8,9
Никель	8,9	204	4,8	42,5
Сталь	7,8	210	5,2	40,5
Титан	4,5	110	4,9	22
Бумага	0,2—0,9	0,3—0,35	1,0—2,5	0,2—2,35
Угльное волокно	1,42	162	10,7	15,2

магнитов являются сплавы железа, никеля, алюминия и кобальта, а также прессованные композиции из феррита бария. Их свойства представлены в табл. 4.6.

ТАБЛИЦА 4.6

Магнитно-твердые материалы и их параметры

Материал	Способ изготовления	Остаточная индукция, Т	Коэрцитивная сила, кА/м	Максимальная удельная энергия магнитного поля, кДж/м ³
ЮН13ДК24	Литой	1,25	40,0	18,0
ЮН14ДК24	Литой	1,2	48,0	18,0
ЮН15ДК24	»	1,15	52,0	18,0
ЮН13ДК25БА	»	1,4	44,0	28,0
ЮН14ДК25БА	»	1,35	52,0	28,0
ЮН15ДК25БА	»	1,25	62,0	28,0
28БА	Прессованный	0,36	215	11,0
3БА1	»	0,37	207	12,0
3,1БА	»	0,38	167	12,3
3,5БА	»	0,39	285	14,0
2БА	»	0,30	184	8,0

В названиях материалов для литых магнитов буквы обозначают: Ю — алюминий; Н — никель; Д — медь; К — кобальт. Последняя цифра обозначает процент кобальта. Для прессованных материалов: Б — бариевый феррит; А — анизотропный. Первая цифра (перед буквами) обозначает удельную магнитную энергию материала в миллионах гаус-эрстед (Гс·э).

В качестве магнитно-мягких материалов для магнитопроводов в подавляющем большинстве случаев используются низкоуглеродистые стали, свойства которых оговорены в ГОСТ 3836—73 (листовая сталь толщиной до 3,9 мм) и ГОСТ 11036—64 (кованая сталь, листовой прокат). По первому из них можно применять любую марку стали, по второму — лучше сталь Э12. Кроме того, широко используются несколько худшие по магнитным свойствам конструкционные стали 08 и 10. Во всяком случае все эти стали могут быть использованы при индукциях через них до 1,4—1,5 Т.

Значительно лучшими магнитными свойствами обладают специальные сплавы железа с кобальтом и небольшой присадкой ванадия (так называемые пермендьюры). Промышленно выпускаются две марки: 49КФ и 49К2Ф (ГОСТ

10994—74). Однако они требуют специальной термической обработки (медленный нагрев до 1100°C в течение 3 ч, выдержка — не менее 5 ч, охлаждение со скоростью $50\text{—}100$ град./ч до 200°C). В силу этого, а также из-за высокой стоимости они применяются только для магнитных систем микрофонов.

В качестве пьезоэлектрических материалов чаще всего в настоящее время применяются так называемые пьезокерамики разных составов на основе бария, кальция, циркония и свинца. Реже используются кварц, дегидрофосфат аммония — АДП, сегнетова соль.

Основные свойства их приведены в табл. 4.7 и 4.8.

ТАБЛИЦА 4.7

Пьезокерамики различных составов и их параметры

Состав	$\text{Ba}^{2+}, \text{Ca}^{2+}, \text{TiO}_3^-$	$\text{Pb}^{2+}, \text{Zr}^{2+}, \text{TiO}_3^-$
Плотность ρ , кг/м ³ Точки Кюри Q_M	5500 120°C 425	7600 300°C 509
Диэлектрические постоянные: ϵ_{33} , T/ϵ_0 ϵ_{33} , S/ϵ_0	1250 950	1300 675
Пьезоэлектрические постоянные: d_{31} (10^{-12} м/В) d_{33} (10^{-12} м/В) g_{31} (10^{-3} В·м/Н) g_{33} (10^{-3} В·м/Н)	—58 150 —5,5 15	—125 270 —11 25,5
Гибкость: $s_{11} E$ (10^{-12} м ² /Н) $s_{33} E$ (10^{-12} м ² /Н)	8,6 9,1	12 15,5
Коэффициент связи k_{21} k_{33}	—0,19 0,46	—0,31 0,66

ТАБЛИЦА 4.8

Пьезокристаллические материалы и их параметры

Материал	Кварц, срез X	АДП, срез 45°	Сегнетова соль, срез 45° X
Плотность ρ , кг/м ³	2650	1800	1700
Диэлектрическая постоянная ϵ , T/ϵ_0	4,5	15,3	350
Коэффициент связи K	0,1	0,29	0,67
Гибкость $s(10^{-12}\text{м}^2/\text{Н})$	12,7	52	58

В качестве проводниковых материалов используются медь и алюминий. Их постоянные: плотность соответственно 8900 и 2700 кг/м³; удельное сопротивление $1,75 \cdot 10^{-8}$ Ом·м и $3,0 \cdot 10^{-8}$ Ом·м.

Раздел 5

МИКРОФОНЫ

5.1. ОПРЕДЕЛЕНИЯ, КЛАССИФИКАЦИЯ, ОСНОВНЫЕ ПАРАМЕТРЫ

Микрофон — прибор для преобразования акустических колебаний воздушной среды в электрические — является первым и одним из наиболее важных звеньев любого электроакустического тракта. Поэтому его свойства и условия использования и эксплуатации оказывают сильнейшее влияние на качество работы этого тракта. В настоящее время существует очень много типов и видов микрофонов.

В зависимости от назначения микрофоны подразделяются на профессиональные и бытовые (любительские). Первые из них используются в аппаратуре связи, радиовещании, телевидении, для звукозаписи, для звукоусиления в помещениях и на открытом воздухе, для акустических измерений. Вторые, в большинстве случаев, для домашней звукозаписи.

В зависимости от способа преобразования колебаний микрофоны подразделяются на угольные, электромагнитные, электродинамические, электростатические и др.; по диапазону воспринимаемых звуковых частот — на узкополосные (речевые) и широкополосные; по направленности — на ненаправленные, двусторонне направленные (восьмерочные), односторонне направленные (кардиоидные, суперкардиоидные, гиперкардиоидные), остронаправленные; по способности выделять полезный сигнал на фоне помех (шумов) — на микрофоны обычного исполнения и шумозащищенные. В качестве шумозащищенных приемников, кроме микрофонов в полном смысле этого слова, применяют электромеханические преобразователи — ларингофоны, служащие обычно для приема речи на фоне высокого уровня помех (шумов).

Стандартом 16123—70 «Микрофоны. Методы электроакустических испытаний и измерений» установлены определения характеристик микрофонов, важнейшие из которых приводятся ниже.

Напряжение холостого хода — напряжение на выходе микрофона при сопротивлении нагрузки, влияние которой пренебрежимо мало.

Номинальное сопротивление нагрузки — сопротивление нагрузки, которое должно быть подключено к выходу микрофона при его работе (оговаривается в технической документации на микрофон).

Номинальный диапазон частот — диапазон частот, в котором определяются параметры микрофона (оговаривается в технической документации на микрофон).

Чувствительность — отношение напряжения холостого хода на выходе микрофона к звуковому давлению, действующему на микрофон. Чувствительность на номинальном сопротивлении нагрузки — отношение напряжения, развиваемого на номинальном сопротивлении нагрузки, к звуковому давлению, действующему на микрофон. Чувствительность по давлению — чувствительность при звуковом давлении, действующем только на поверхность звуковоспринимающего элемента и распределенном по ней равномерно. Чувствительность по свободному полю — чувствительность при воздействии на микрофон звукового давления в свободном поле, причем напряжение на выходе микрофона относят к звуковому давлению в точке поля до помещения в нее микрофона.

Средняя чувствительность — среднеквадратичное значение чувствительности в номинальном диапазоне частот микрофона; усредняют по значениям на частотах, распределенных равномерно в логарифмическом масштабе.

Уровень чувствительности — чувствительность, выраженная в децибелах относительно чувствительности, равной 1 В/Па. Стандартный уровень чувствительности — выраженное в децибелах отношение напряжения, развиваемого на номинальном сопротивлении нагрузки при звуковом давлении 1 Па, к напряжению, соответствующему мощности 1 мВт.

Неравномерность частотной характеристики чувствительности — выраженное в децибелах отношение максимальной чувствительности к минимальной в номинальном диапазоне частот микрофона.

Характеристика направленности — зависимость чувствительности микрофона на частоте f или в полосе частот со средней частотой f в свободном поле от угла между рабочей осью микрофона и направлением на источник звука.

Перепад чувствительности «фронт/тыл» — отношение чувствительности микрофона в направлении рабочей оси к чувствительности микрофона под углом 180° к его рабочей оси. Средний перепад чувствительности «фронт/тыл» — среднеквадратичное значение перепадов «фронт/тыл» в диапазоне частот, оговоренном в технической документации на микрофон; усредняют по значениям на частотах, распределенных равномерно в логарифмическом масштабе.

Коэффициент направленности¹ — отношение квадрата чувствительности микрофона в свободном поле в направлении рабочей оси к среднему по всем направлениям квадрату чувствительности на частоте f или в полосе частот со средней частотой f .

Коэффициент нелинейных искажений — отношение спектральных компонент напряжения на выходе микрофона, отсутствующих в спектре звукового давления, действующего на микрофон, и обусловленных его нелинейностью, к спектральным компонентам напряжения на выходе микрофона, присутствующим в спектре звукового давления.

Динамический диапазон микрофона — диапазон звуковых давлений, воспринимаемых микрофоном, нижний предел которого ограничен уровнем собственного шума микрофона, а верхний предел ограничен нелинейными искажениями, коэффициенты которых превышают допустимую величину (оговаривается в технической документации на микрофон).

Уровень эквивалентного звукового давления — уровень звукового давления относительно давления $2 \cdot 10^{-5}$ Па, вызывающего на выходе микрофона напряжение, равное напряжению, возникающему под воздействием внешних и внутренних помех в случае отсутствия звукового поля.

5.2. ЧУВСТВИТЕЛЬНОСТЬ И СОПРОТИВЛЕНИЕ

Одной из важнейших характеристик микрофона, перечисленных выше, является его чувствительность. В большинстве случаев под ней понимают чувствительность по свободному полю. Раньше ее выражали в милливольтх на бар. (По старой терминологии баром называли давление силой в одну дину на квадратный сантиметр.) Теперь, по системе СИ, — в вольтах (милливольтх) на Паскаль (В/Па, мВ/Па). Применяют также понятия уровня чувствительности и чаще стандартного уровня чувствительности. Последний вычисляется как

$$N = 10 \lg \frac{E^2}{R_n \cdot 10^{-3}}$$

где E — чувствительность микрофона на номинальной нагрузке.

Пример. Пусть на нагрузке 150 Ом чувствительность микрофона 1 мВ/Па

¹ Это отношение, выраженное в децибелах, называют индексом направленности.

(10^{-3} В/Па). Каков стандартный уровень его чувствительности?

$$N = 10 \lg (10^{-6} / 150 \cdot 10^{-3}) = -52 \text{ дБ.}$$

Можно определить стандартный уровень чувствительности и по графику рис. 5.1. Для этого восстанавливаем ординату из точки на оси абсцисс, соответствующей чувствительности на нагрузке 1 мВ/Па, до пересечения с прямой, имеющей отметку 150 Ом, и на оси ординат отсчитываем величину стандартного уровня чувствительности — 52 дБ. При определении чувствительности в мВ/(дин/см²) он был бы — 72 дБ.

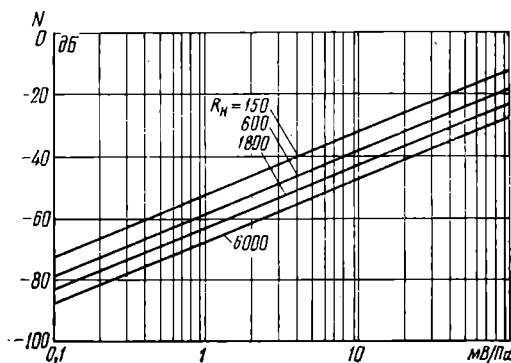


Рис. 5.1. Зависимость стандартного уровня чувствительности от чувствительности. Параметр семейства кривых: R_n — сопротивление нагрузки

Имея в виду, что в настоящее время чувствительность разных типов микрофонов приблизительно одинакова, Международная электротехническая комиссия (МЭК) рекомендует сведенные в табл. 5.1 номинальные значения сопротивлений и напряжений для микрофонных усилителей и микрофонов разных типов (кроме угольных), принцип устройства которых будет изложен ниже.

ТАБЛИЦА 5.1

Рекомендуемые значения выходных сопротивлений и напряжений микрофонов

Микрофоны	Динамические и электретные ¹				Конденсаторные		
Номинальное сопротивление, Ом: микрофона нагрузки	50 150	200 600	600 1800	2000 6000	50 150*	200 600*	600 1800*
Выходное напряжение ² , мВ номинальное минимальное максимальное: для систем звукоусиления ³ для бытовой аппаратуры ⁴	0,1 0,04 0,1 10	0,2 0,08 0,2 20	0,35 0,16 0,35 35	0,6 0,2 0,6 60	0,5 0,2 0,5 —	1,0 0,4 1,0 —	1,7 0,64 1,7 —

* Для систем звукоусиления предпочтительное сопротивление нагрузки микрофона в 6 раз больше номинального сопротивления источника.

¹ Указанное выходное напряжение имеют электретные микрофоны с усилителем, имеющим автономное питание. У электретных микрофонов, усилители которых имеют сетевой блок питания, выходное напряжение принципиально такое же, как у конденсаторных микрофонов.

² Значения даются для звукового давления 0,2 Па (80 дБ). Для микрофонов ближнего действия величины даются для звукового давления 3 Па (104 дБ) и они должны быть соответственно на 24 дБ выше приведенных в таблице.

³ Приведенные величины соответствуют звуковому давлению 100 Па (134 дБ) и рассчитаны на чувствительность, на 6 дБ большую чувствительности микрофона. Требование перегрузки обычно удовлетворяется применением регулируемого аттенуатора, встроенного в предварительный усилитель и предшествующего регулятору усиления.

⁴ Приведенные величины соответствуют звуковому давлению 10 Па (114 дБ) и рассчитаны на чувствительность, на 6 дБ большую чувствительности микрофона.

Примечание. При расчете микрофонных усилителей исходят из следующих соображений. Номинальное сопротивление микрофона является внутренним сопротивлением источника тока на входе усилителя, входное сопротивление усилителя — сопротивлением нагрузки микрофона. ЭДС источника тока — выходное напряжение микрофона на холостом ходу.

5.3. ПРИНЦИПЫ УСТРОЙСТВА МИКРОФОНА

Каждый микрофон принципиально состоит из двух систем: акустико-механической и механоэлектрической.

Свойства акустико-механической системы сильно зависят от того, воздействует ли звуковое давление на одну сторону диафрагмы (микрофон давления) или на обе стороны. А в последнем случае от того, симметрично ли это воздействие (микрофон градиента давления) или на одну из сторон диафрагмы действуют колебания, непосредственно возбуждающие ее, а на вторую — прошедшие через какое-либо механическое или акустическое сопротивление или систему задержки времени (асимметричный микрофон градиента давления).

При действии акустических колебаний только на одну сторону диафрагмы (микрофона давления) результирующая сила, действующая на нее, $F = k p_0 S$, где p_0 — звуковое давление, имевшее место в акустическом поле до внесения в него микрофона; S — поверхность диафрагмы, на которую действует звуковое давление; k — коэффициент дифракции, определяемый как отношение звукового давления p на поверхности диафрагмы к давлению p_0 , имевшему место в поле до внесения в него микрофона. Величина его равна единице на низких частотах, где размеры микрофона малы по сравнению с длиной звуковой волны и повышается к высоким частотам. На зависимость коэффициента k от частоты сильно влияет форма микрофона в целом. Это хорошо иллюстрируется рис. 5.2.

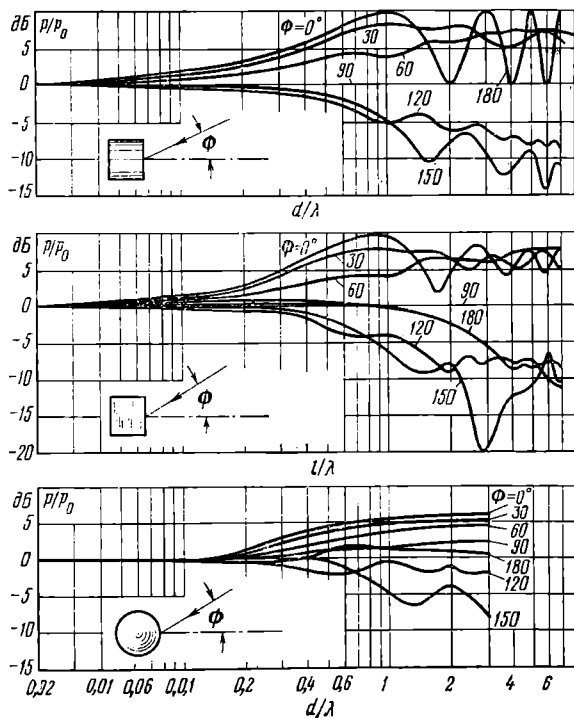


Рис. 5.2. Зависимость p/p_0 — отношения (выраженного в децибелах) звукового давления на поверхности жесткого цилиндра (с высотой, равной его диаметру), куба, сферы к звуковому давлению, имевшему место в поле до их внесения, от отношения d/λ (или l/λ) диаметра цилиндра или сферы (или ребра куба) к длине волны. Параметр семейства кривых — угол Φ между осью цилиндра, куба, сферы и направлением прихода звука

Следует заметить, что, кроме формы микрофона, на величину коэффициента дифракции влияет также акустико-механическое сопротивление микрофона и даже его стенок.

Кривые рис. 5.2 дают приближенное представление о частотной зависимости коэффициента дифракции от внешней формы микрофона. По этим кривым можно определить повышение уровня звукового давления на поверхности жестких тел рассмотренных форм.

Пример. Пусть желательно найти повышение уровня звукового давления у основания цилиндрического кожуха микрофона, у которого $d=h=0,05$ м (5 см) при падении на него звуковой волны частотой 2750 Гц под углом 30° к оси цилиндра. Длина волны λ в воздухе для этой частоты 0,125 м. Отсюда $d/\lambda \approx 0,4$.

Восстанавливая ординату из точки на оси абсцисс, соответствующей этой величине, до пересечения с кривой, имеющей отметку 30° на графике для цилиндра, отсчитываем по оси ординат 6 дБ, что приблизительно и является искомой величиной повышения уровня.

Давление, действующее на диафрагму, изменяется по сравнению с давлением в свободной волне не только из-за дифракции, но и из-за резонирующего действия углубления перед диафрагмой, образующегося у многих типов микрофонов вследствие применения колец для крепления диафрагмы к основной конструкции микрофона. Увеличение давления на диафрагме вследствие действия углубления может быть определено с помощью кривых рис. 5.3.

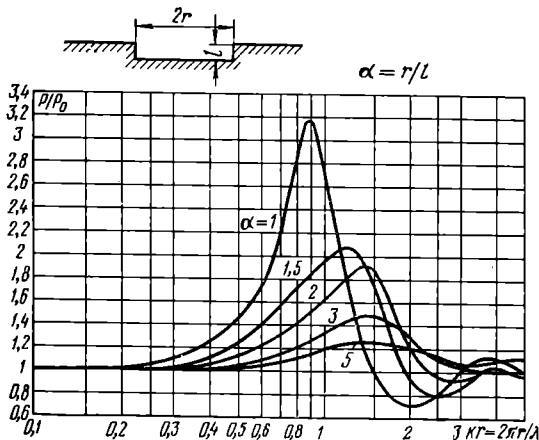


Рис. 5.3. Зависимость p/p_0 — отношения звукового давления на дне цилиндрического углубления к звуковому давлению в свободном поле — от величины kr

Пример. Пусть требуется найти увеличение давления на дне углубления диаметром $2r=0,05$ м (5 см) и глубиной $l=0,0125$ м (1,25 см) на частоте 1530 Гц. Параметр $\alpha=r/l$ будет равен $0,025/0,0125=2$. Длина волны на этой частоте — примерно 0,224 м. Отсюда $2\pi r/\lambda = 2\pi \cdot 0,025/0,224 = 0,7$. Восстанавливая ординату из точки на оси абсцисс, соответствующей 0,7, до пересечения с кривой, имеющей отметку $\alpha=2$, отсчитываем на оси 1,6, т. е. на дне углубления давление будет в 1,6 раза больше (на 4 дБ выше), чем в свободной звуковой волне.

Если звуковое давление p_0 действует симметрично на обе стороны диафрагмы микрофона (микрофон градиента давления), малого по сравнению с длиной

падающей на него плоской волны, то сила F , действующая на диафрагму, выражается как

$$F = 2p_0 S \sin\left(\frac{\omega}{2c} d \cos \theta\right),$$

где c — скорость звука в воздухе (343 м/с при 20° С); d — разность хода звука между обеими сторонами диафрагмы; θ — угол между рабочей осью микрофона и направлением прихода звука (рис. 5.4).

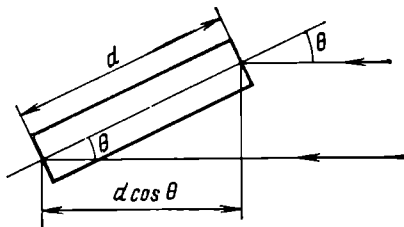


Рис. 5.4. К определению разности хода звуковых волн, действующих на переднюю и заднюю стороны диафрагмы

Для низких частот, где $0,5\omega d/c < \pi/2$, $F = (p_0 S d \omega / c) \cos \theta$ и при осевом падении звука $F = p_0 S d \omega / c$.

Таким образом, сила в микрофонах градиента давления частотнозависима. На низких частотах эта зависимость линейна, на высоких — приблизительно синусоидальна. Кроме того, на высоких, где размеры микрофона становятся сравнимыми с длиной волны, как уже упоминалось выше, начинают сказываться также частотнозависимые явления дифракции.

Приведенные выражения для силы, действующей на открытую воздействию звукового давления с обеих сторон диафрагму, действительны при нахождении ее в поле плоской волны. При нахождении же ее в поле сферической волны, т. е. вблизи источника, последнее выражение для силы приобретает вид

$$F = p_0 S \frac{\omega}{c} d \sqrt{1 + \frac{c^2}{\omega^2 r^2}},$$

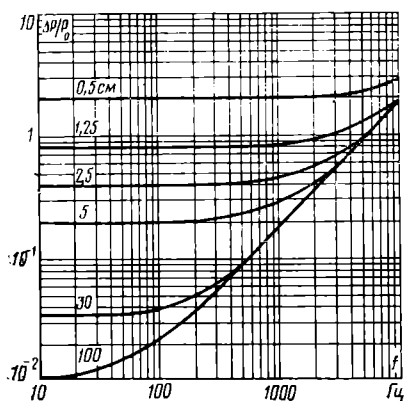
где r — расстояние от источника до плоскости диафрагмы. При $r \gg (c/\omega)$ выражение совпадает с предыдущим. При $r \ll (c/\omega)$ $F = p_0 S d / r$, т. е. сила становится частотнонезависимой. Это явление может дать как отрицательный, так и положительный эффект. Так, если микрофон, на диафрагму которого звуковое давление действует с обеих сторон (например, ленточный), помещается вблизи источника, то, как видно из приведенных формул, на высоких частотах он может находиться еще в поле плоской волны и сила, действующая на него, будет пропорциональна частоте. На низких же частотах эта сила увеличивается по абсолютной величине и может стать даже частотнонезависимой. Поэтому микрофон будет «подчеркивать» низкие частоты, «бубнить».

С другой стороны, если такой микрофон рассчитан на работу вблизи полезного источника, то силы, обусловленные звуковым давлением той же величины от дальних источников (помех), будут меньше и, следовательно, микрофон будет менее чувствительным по отношению к ним, т. е. шумозащищенным, особенно на низких частотах.

Пример. Пусть требуется найти, во сколько раз сила, действующая на диафрагму микрофона градиента давления, разность хода между сторонами которой составляет 0,02 м (2 см), больше силы, действующей на такую же диафрагму микрофона давления на частоте 500 Гц, если источник находится на расстоянии 0,3 м (30 см) от микрофона.

Пользуясь графиком рис. 5.5, восстанавливаем ординату из точки на оси абсцисс, соответствующей 500 Гц, до пересечения с кривой, имеющей отметку

30 см, отсчитываем на оси ординат 0,095. Отсюда отношение сил будет $0,095 \times 2 = 0,19$. Следовательно, сила, действующая на диафрагму микрофона градиента давления, будет составлять 0,19 от величины, силы, действующей на такую же диафрагму микрофона давления.



Конструкции микрофонов, в которых звуковое давление действует несимметрично на обе стороны диафрагмы, позволяют получать разнообразные формы характеристик направленности и добиваться их меньшей зависимости от частоты.

Рис. 5.5. Зависимость от частоты $\Delta p/p_0$ — отношения разности давлений, действующего на обе стороны диафрагмы, к давлению в свободном поле p_0 . Параметр кривых — расстояние от источника до плоскости диафрагмы. График построен для разности хода между обеими сторонами диафрагмы, равной 1 см. Для другой разности хода следует умножить на ее значение величину, полученную из график

Переходя к механоэлектрической части микрофона, следует сказать, что в зависимости от того, какой принцип преобразования колебаний в микрофонах используется, они делятся на угольные, электромагнитные, электродинамические (в двух модификациях — катушечной и ленточной), конденсаторные (в том числе электретные), пьезоэлектрические, полупроводниковые (транзисторные). В микрофонах электромагнитных и электродинамических (в том числе ленточных) выходное электрическое напряжение пропорционально скорости колебаний подвижной системы, а в микрофонах остальных типов — пропорционально колебательному смещению. Микрофоны, построенные на других принципах преобразования, используются чрезвычайно редко.

Первым получил распространение угольный микрофон, который и до сих пор используется в телефонии. Однако в первые годы радиовещания специальные конструкции угольных микрофонов использовались и в этой области. Действие угольного микрофона основывается на изменении сопротивления между зернами угольного порошка при изменении давления на их совокупность.

Принципиально угольный микрофон (рис. 5.6а) работает следующим образом. При воздействии звукового давления на его диафрагму 1 она начинает колебаться. В такт этим колебаниям изменяется и сила сжатия зерен угольного порошка 2 («засыпки»), в связи с чем изменяется сопротивление засыпки между электродами 3,3, а при постоянном, приложенном к последним, электрическом напряжении изменяется и величина тока через микрофон. Если, скажем, включить микрофон на первичную обмотку трансформатора T_p , то на зажимах его вторичной обмотки будет возникать переменное напряжение, форма кривой которого будет более или менее точно отображать форму кривой звукового давления, действующего на диафрагму угольного микрофона.

Величина выходного напряжения микрофона выражается как

$$U = m \frac{U_0 R_n n}{R_i n^2 + R_n} = k_x \frac{U_0 R_n n}{R_i n^2 + R_n} = \frac{\kappa F}{\omega z_m} \frac{U_0 R_n n}{R_i n^2 + R_n}$$

где F — действующая на диафрагму микрофона результирующая сила звукового давления; U_0 — величина приложенного к микрофону постоянного напряжения; m — коэффициент модуляции; R_i — внутреннее сопротивление микрофо-

на; R_H — сопротивление его нагрузки; n — коэффициент трансформации трансформатора; x — смещение диафрагмы микрофона; z_M — механическое сопротивление акустико-механической системы микрофона; k — отношение коэффициента модуляции к величине смещения диафрагмы микрофона.

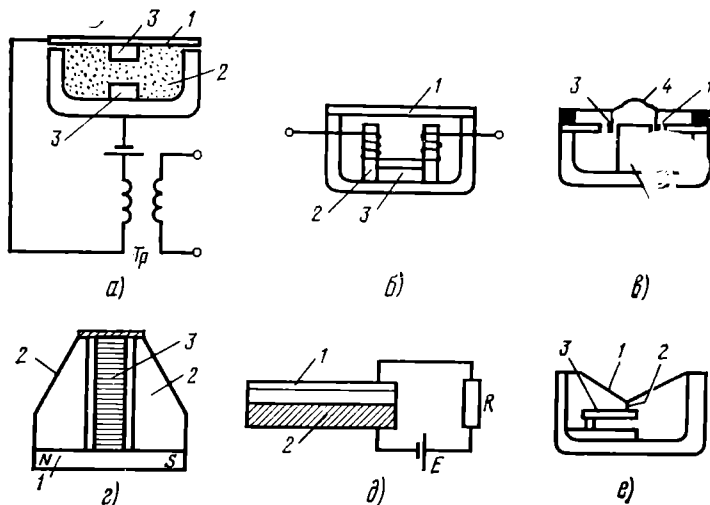


Рис. 5.6. Принципы действия микрофонов:

а) угольного; б) электромагнитного; в) электродинамического; г) ленточного; д) конденсаторного; е) пьезоэлектрического

Основное преимущество угольного микрофона — его высокая чувствительность, позволяющая использование его без усилителей. Недостатки — большая нестабильность работы и шум из-за того, что полезный электрический сигнал вырабатывается при разрыве и восстановлении контактов между отдельными зернами порошка (что само по себе является процессом прерывным), большая неравномерность частотной характеристики и значительные нелинейные искажения. Эти недостатки угольного микрофона привели к тому, что всюду, где требуется высокое качество преобразования, например в радиовещании, при звукозаписи и измерениях, он уже давно не применяется.

После угольного микрофона появился электромагнитный микрофон, который работает следующим образом (рис. 5.6б). Перед полюсами (полюсными наконечниками) 2 магнита 3 располагаются ферромагнитная диафрагма 1 или скрепленный с ней якорь. При колебаниях диафрагмы под воздействием на нее звукового давления меняется магнитное сопротивление магнитной системы, а значит, и магнитный поток через витки обмотки, намотанной на магнито-провод этой системы. Благодаря этому на зажимах этой обмотки возникает переменное напряжение звуковой частоты, являющееся выходным сигналом микрофона, величина которого

$$U = w \frac{\Phi_0}{d} v \frac{R_H}{R_H + Z_i} = w \frac{\Phi_0}{d} \frac{F}{z_M} \frac{R_H}{R_H + Z_i}.$$

Здесь, помимо введенных выше обозначений, Φ_0 — величина магнитного потока, исходящего из полюса магнитной системы; d — величина зазора между полюсом и якорем; v — колебательная скорость диафрагмы (якоря); w — число витков обмотки; Z_i — внутреннее электрическое сопротивление микрофона.

Электромагнитный микрофон стабилен в работе. Однако ему свойственны весьма узкий частотный диапазон, большая неравномерность частотной характеристики и значительные нелинейные искажения. Этим и объясняется то, что область применения электромагнитного микрофона весьма узкая.

Следует отметить, что с целью повышения разборчивости речи в трактах, через которые она передается и где больше всего применяется электромагнитный микрофон, его частотную характеристику стремятся иметь с подъемом к высоким частотам с крутизной 6 дБ/октава. Это делают для компенсации снижения спектра речи на частотах выше 400 Гц.

В противоположность электромагнитному микрофону чрезвычайно широкое распространение для целей озвучения, звукоусиления, а раньше и звукозаписи и радиовещания получил электродинамический микрофон в своих двух модификациях — катушечной и ленточной.

Принцип действия первой состоит в следующем (рис. 5.6а). В кольцевом зазоре 1 магнитной системы, имеющей постоянный магнит 2, находится подвижная катушка 3, скрепленная с диафрагмой 4. При воздействии на последнюю звукового давления она вместе с подвижной катушкой начинает колебаться. В силу этого в витках катушки, перерезывающих магнитные силовые линии, возникает напряжение, являющееся выходным сигналом микрофона. Его величина выражается как

$$U = Blv \frac{R_n}{R_l + R_n} = Bl \frac{F}{z_m} \frac{R_n}{R_l + R_n}$$

Здесь, помимо введенных выше обозначений, B — индукция в зазоре магнитной системы; l — длина проводника обмотки подвижной катушки.

Электродинамический микрофон весьма стабилен, имеет довольно широкий частотный диапазон, сравнительно небольшую неравномерность частотной характеристики.

Устройство ленточной модификации электродинамического микрофона несколько отлично от устройства катушечной модификации (рис. 5.6б). Здесь магнитная система микрофона состоит из постоянного магнита 1 и полюсных наконечников 2, между которыми натянута легкая, обычно алюминиевая, тонкая (порядка 2 мкм) ленточка 3. При воздействии на ее обе стороны звукового давления возникает сила, под действием которой ленточка начинает колебаться, перерезая при этом магнитные силовые линии, вследствие чего на ее концах развивается напряжение.

Так как сопротивление ленточки очень мало, то для уменьшения падения напряжения на соединительных проводниках напряжение, развиваемое на концах ленточки, подается на первичную обмотку повышающего трансформатора, размещаемого в непосредственной близости от ленточки. Напряжение на зажимах вторичной обмотки трансформатора является выходным напряжением микрофона. Выражение для него не отличается от выражения для выходного напряжения катушечного микрофона. Частотный диапазон этого микрофона довольно широк, а неравномерность частотной характеристики невелика.

Для электроакустических трактов высокого качества наибольшее распространение в настоящее время получил конденсаторный (электростатический) микрофон. Принципиально он работает следующим образом (рис. 5.6б).

Жестко натянутая мембрана 1 под воздействием звукового давления может колебаться относительно неподвижного электрода 2, являясь вместе с ним обкладками электрического конденсатора. Этот конденсатор включается в электрическую цепь последовательно с источником постоянного тока E (батарея, выпрямитель) и активным нагрузочным сопротивлением R . При колебаниях мембраны емкость конденсатора меняется с частотой действующего на мембрану звукового давления, в связи с чем в электрической цепи появляется переменный ток той же частоты и возникает падение напряжения этого тока на нагрузочном сопротивлении, являющееся выходным сигналом

микрофона. Выходное напряжение микрофона

$$U = \frac{E}{d} \times \frac{R_n}{Z_i + R_n} = \frac{E}{d} \frac{F}{\omega z_m} \frac{R_n}{Z_i + R_n}.$$

Здесь, помимо введенных выше обозначений, d — зазор между диафрагмой и неподвижным электродом; Z_i — внутреннее электрическое (емкостное) сопротивление микрофона.

Следует отметить, что нагрузочное сопротивление должно иметь большую величину, чтобы падение напряжения на нем не уменьшалось сильно на низких частотах, где емкостное сопротивление конденсатора (мембрана — неподвижный электрод) очень велико и эксплуатация такого микрофона была бы, по существу, невозможна из-за того, что микрофонные линии и нагрузки имеют сравнительно небольшое сопротивление. По этой причине почти у всех современных конденсаторных микрофонов предусмотрены конструктивно связанные с самим микрофоном усилители, имеющие малый коэффициент усиления (порядка единицы) и высокое входное и низкое выходное сопротивления. Величина последнего такова, что позволяет эксплуатировать конденсаторные микрофоны в условиях обычных линий и нагрузок.

Поэтому выходным сопротивлением конденсаторного микрофона считают выходное сопротивление его усилителя. Также и выходным напряжением конденсаторного микрофона считают выходное напряжение его усилителя.

Кроме описанной выше схемы включения конденсаторного микрофона, так называемой низкочастотной, применяется, хотя и гораздо реже, так называемая высокочастотная схема, в которой конденсаторный микрофон включается как емкость в электрический колебательный контур высокой частоты, изменяя его резонансную частоту с периодом звуковых колебаний, воздействующих на микрофон.

Конденсаторные микрофоны в настоящее время имеют высокие качественные показатели: широкий частотный диапазон, малую неравномерность частотной характеристики, низкие нелинейные и переходные искажения, высокую чувствительность и низкий уровень шумов.

Электрические микрофоны, по существу, те же конденсаторные, но постоянное напряжение для них обеспечивается не обычным источником, а электрическим зарядом мембраны или неподвижного электрода, материалы которых отличаются тем, что способны сохранять этот заряд длительное время.

Некоторое распространение в настоящее время получили микрофоны пьезоэлектрические (рис. 5.6е). Их действие основано на том, что звуковое давление воздействует непосредственно или через диафрагму I и скрепленный с ней стержень 2 на пьезоэлектрический элемент (кристалл, пьезокерамику) 3 . При деформации последнего на его обкладках вследствие пьезоэлектрического эффекта возникает напряжение, являющееся выходным сигналом микрофона:

$$U = kx \frac{R_n}{Z_i + R_n} = k \frac{F}{\omega z_m} \frac{R_n}{Z_i + R_n}$$

Здесь, помимо введенных выше обозначений, k — пьезоэлектрический коэффициент.

Перспективы применения пьезоэлектрических микрофонов в последнее время расширились благодаря появлению используемых для диафрагм микрофонов и других преобразователей новых синтетических пленочных материалов, обладающих пьезоэлектрическим эффектом.

Действие полупроводниковых микрофонов (весьма мало распространенных) основывается на том, что под воздействием звукового давления на диафрагму скрепленную с ней острие, являющееся одновременно эмиттером полупроводникового триода, изменяет сопротивление эмиттерного перехода через него. Хотя полупроводниковые микрофоны с диафрагмой достаточно чувствительны, но они недостаточно стабильны и их частотные характеристики даже в сравнительно узком диапазоне частот неравномерны.

Для приема речи в условиях окружающего шума применяются ларингофоны. Эти приборы воспринимают механические колебания гортани, возникающие при речеобразовании. Для этого ларингофоны (обычно пара) прижимаются к шее в области гортани.

По принципу преобразования ранее применялись угольные ларингофоны, а в настоящее время — электромагнитные. Отличием их от соответствующих микрофонов является то, что в них нет диафрагм, на которые воздействует звуковое давление, а подвижный элемент (якорь и т. п.) вследствие инерции перемещается относительно корпуса, колеблющегося в такт с колебанием гортани, к которой он прилегает.

Из вышеприведенных выражений для чувствительности различных типов микрофонов можно определить, каким параметром должна управляться механическая система микрофона, чтобы получить равномерную частотную характеристику по давлению, т. е. без учета влияния дифракции и резонанса углубления перед диафрагмой. Эти требования обобщены в табл. 5.2 для микрофонов давления и в табл. 5.3 для микрофонов градиента давления.

Существенное влияние на частотную характеристику микрофона оказывает включение его в электрическую цепь. Так, при работе микрофона с емкостным внутренним сопротивлением $\frac{1}{\omega C}$ (конденсаторного, электретного, пьезоэлектрического) на активное сопротивление нагрузки R падение напряжения U на пос-

ТАБЛИЦА 5.2

Требования к микрофонам давления

Принцип преобразования	Угольный	Электромагнитный	Динамический, ленточный	Конденсаторный (электретный)	Пьезоэлектрический	Транзисторный
Параметр, поддерживаемый постоянным	Смещение	Скорость		Смещение		
Управляющий параметр	Упругость	Активное сопротивление		Упругость		
Расположение резонансной частоты относительно основного диапазона	Выше	Ниже		Выше		

Для получения частотнезависимой чувствительности в каком-то диапазоне частот не обязательно, чтобы сопротивление было чисто активным. Достаточно, чтобы оно было не зависящим или слабо зависящим от частоты, что достигается, например, если акустико-механическая система построена по принципу механического фильтра нижних частот.

леднем связано с ЭДС e , развиваемой микрофоном, выражением $U = e/\sqrt{1+1/(\omega CR)^2}$, а соответствующий спад частотной характеристики на низких частотах $N = 10 \lg[1+1/(\omega CR)^2]$, который представлен на рис. 5.7 графически.

Пример. Пусть требуется узнать, какова должна быть величина сопротивления нагрузки для конденсаторного микрофона емкостью 200 пФ, чтобы на частоте 35 Гц спад чувствительности по сравнению с высшими частотами не превышал 8 дБ. Восстанавливая абсциссу из точки на оси ординат, соответствующей 8 дБ, до пересечения с кривой, отсчитываем на оси абсцисс, $fCR = 7 \cdot 10^{10}$, откуда $R = \frac{7 \cdot 10^{10}}{35 \cdot 200} = 10^7$ Ом, что и является искомой величиной.

ТАБЛИЦА 5.3

Требования к микрофонам градиента давления

Принцип преобразования	Электро- магнитный	Динамиче- ский	Конден- саторный	Пьезо- электри- ческий	Транзи- сторный
Параметр, поддерживаемый постоянным	Скорость		Смещение		
Управляющий параметр	Масса		Активное сопротивление ¹		
Расположение резонансной частоты по отношению к основному диапазону	Ниже		Ниже ²		

¹ Для получения частотнонезависимой чувствительности в каком-то диапазоне частот не обязательно, чтобы сопротивление было чисто активным. Достаточно, чтобы оно было не зависящим или слабо зависящим от частоты, что достигается, например, если акустико-механическая система построена по принципу механического фильтра нижних частот.

² Резонансная частота должна располагаться ниже основного диапазона частот, если акустико-механическая система построена по принципу механического фильтра нижних частот.

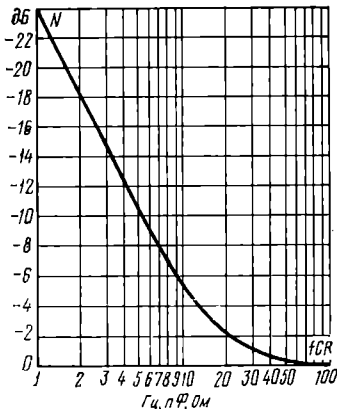


Рис. 5.7. Зависимость снижения N напряжения на нагрузке для микрофона с емкостным внутренним сопротивлением от произведения рассматриваемой частоты f , емкости C микрофона, сопротивления нагрузки R_n , умноженного на 10^{10}

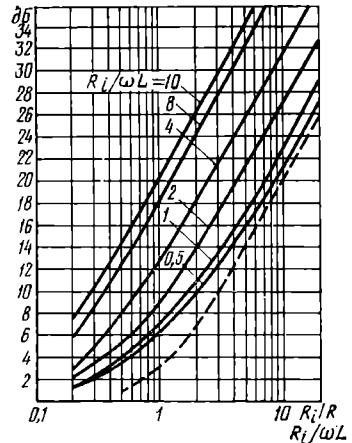


Рис. 5.8. Зависимость спада частотной характеристики на заданной частоте ω от R_i/R — отношения величины внутреннего сопротивления микрофона к величине шунтирующего сопротивления. Параметр семейства кривых — отношение шунтирующего сопротивления R к величине шунтирующего индуктивного сопротивления ωL . Пунктиром представлена зависимость спада от $R_i/\omega L$, когда микрофон шунтируется только индуктивностью

В некоторых случаях (например, при приеме речи) получение такого спада частотной характеристики в области нижних частот желательно. Тогда его осуществляют в конденсаторных микрофонах путем подбора сопротивления нагрузки по приведенным выше формуле и графику. В динамических же микрофонах указанный спад частотной характеристики получают путем шунтирования контуром, образованным параллельным соединением индуктивности

и активного сопротивления. Этот шунт отключается, а следовательно, исчезает и спад частотной характеристики в области нижних частот при переходе на прием музыки.

Величина получающегося спада на частоте ω для микрофона с внутренним сопротивлением R_i при шунтировании индуктивностью L и сопротивлением R

$$N = 10 \lg \left[\left(\frac{R}{\omega L} \right)^2 \left(\frac{R_i}{R} \right)^2 + \left(1 + \frac{R_i}{R} \right)^2 \right].$$

Это соотношение справедливо, когда $R_n > R_i$ и $R_n > R$, что на практике имеет место в большинстве случаев. Оно представлено графически на рис. 5.8.

Для случая, когда микрофон шунтируется только индуктивностью,

$$N = 10 \lg \left[1 + \left(\frac{R_i}{\omega L} \right)^2 \right].$$

Эта зависимость на рис. 5.8 изображена пунктиром.

Пример. Пусть нужно получить спад частотной характеристики в 20 дБ для микрофона с внутренним сопротивлением 250 Ом. Из точки на оси ординат, соответствующей 20 дБ, до пересечения с кривыми отсчитываем на оси абсцисс величины $R_i/R = 0,95; 1,18; 2,5; 4,05; 7; 9$ соответственно для отношений $R/\omega L = 10; 8; 4; 2; 1; 0,5$. Пусть мы остановились на отношении $R/\omega L = 4$. Тогда $R_i/R = 2,5$, откуда $R = R_i/2,5 = 250/2,5 = 100$ Ом, а $\omega L = R/4 = 100/4 \approx 25$ Ом. Отсюда индуктивность составит $L = 25/\omega = 25/(2\pi 50) = 0,08$ Гн. Индуктивность получалась малой, что конструктивно удобно, но величина шунтирующего сопротивления получалась малой по сравнению с внутренним сопротивлением микрофона, что невыгодно, так как это снижает выходное напряжение последнего. Поэтому надо выбирать величины R и L так, чтобы R_i/R было по возможности существенно меньше единицы.

5.4. НАПРАВЛЕННЫЕ СВОЙСТВА МИКРОФОНОВ

Общие принципы

Для суждения о направленных свойствах микрофона, кроме самих характеристик направленности, чаще всего применяют такие параметры, как коэффициент направленности Ω и отношение коэффициента направленности в передней полусфере к коэффициенту направленности в задней полусфере $\Omega_{\phi}/\Omega_{\tau} = \Omega_{\phi/\tau}$. Эти параметры определяются для микрофонов, направленность которых симметрична относительно оси, как

$$\Omega = \frac{1}{\frac{1}{2} \int_0^{\pi} R^2(\theta) \sin \theta d\theta}$$

где $R(\theta)$ — отношение чувствительности микрофона под углом θ к его оси, к осевой чувствительности и

$$\Omega_{\phi/\tau} = \frac{\int_{\pi/2}^{\pi} R^2(\theta) \sin \theta d\theta}{\int_0^{\pi/2} R^2(\theta) \sin \theta d\theta}.$$

Эти параметры весьма полезны для оценки свойства микрофона. Так, дальность действия микрофона с коэффициентом направленности Ω будет в $\sqrt{\Omega}$ раз больше, чем у ненаправленного (при условии равномерного распределения источников равноинтенсивных помех вокруг микрофона). Иными словами, при одном и том же отношении сигнал/помеха на выходе микрофона направленный микрофон может находиться в $\sqrt{\Omega}$ раз дальше от полезного источника по сравнению с ненаправленным.

Параметр $\Omega_{\Phi/\tau}$ полезен для оценки подавления помех от источников, расположенных сзади микрофона (например, в зале), по сравнению с источниками, расположенными перед микрофоном (например, исполнители на эстраде).

Величины Ω и $\Omega_{\Phi/\tau}$ для определенных форм характеристик направленности могут быть найдены численно. Так, для микрофонов давления (ненаправленных), которые имеют ту или иную форму корпуса или могут быть интерпретированы как поршень в экране или без экрана, значения Ω и $\Omega_{\Phi/\tau}$ могут определяться по кривым рис. 5.9 и рис. 5.10 соответственно.

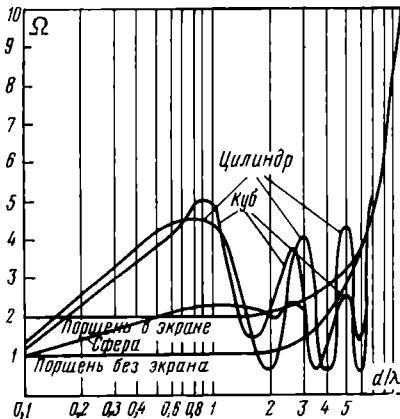


Рис. 5.9. Зависимость параметра Ω от отношения d/λ : диаметра шара, поршня, цилиндра (с высотой, равной диаметру основания), ребра куба d к длине волны λ

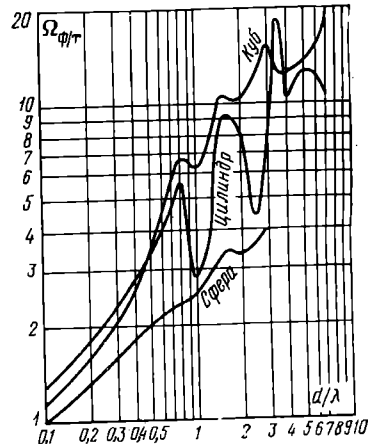


Рис. 5.10. Зависимость параметра $\Omega_{\Phi/\tau}$ от отношения d/λ

Пример. Величины Ω и $\Omega_{\Phi/\tau}$ для динамического микрофона давления в сферическом корпусе диаметром 0,05 м (5 см) на частоте 6900 Гц, для которой длина волны 0,05 м (5 см), находятся следующим образом. Отношение диаметра корпуса к длине волны будет в данном случае равно единице. Восстанавливая ординату из точки на оси абсцисс $d/\lambda=1$ до пересечения с кривыми с отметкой «сфера», отсчитываем соответственно $\Omega=2,3$ (3,5 дБ) и $\Omega_{\Phi/\tau}=2,5$ (4 дБ). Столь же просто могут быть определены параметры Ω и $\Omega_{\Phi/\tau}$ для комбинированных (односторонне направленных) и микрофонов градиента давления (двусторонне направленных). Их характеристика направленности $R(\theta)$ может быть представлена выражением, являющимся в общем случае уравнением улитки Паскаля:

$$R(\theta) = \frac{1}{1+C} (1 + C \cos \theta),$$

где C — параметр, определяющий форму характеристики направленности, являющийся отношением чувствительности приемника градиента давления к чувствительности приемника давления. Форму характеристики направленности од-

носторонние направленных микрофонов можно выразить и через параметр

$$\gamma = \frac{C}{1+C}$$

при $C=0$, $\gamma=0$ (1 на рис. 5.11а) — окружность;

при $C=1$, $\gamma=0,5$ (2 на рис. 5.11а) — кардиоиды;

при $C=1,7$, $\gamma=0,63$ и $C=3$, $\gamma=0,75$ (3 и 4 на рис. 5.11а) — суперкардиоиды и гиперкардиоиды;

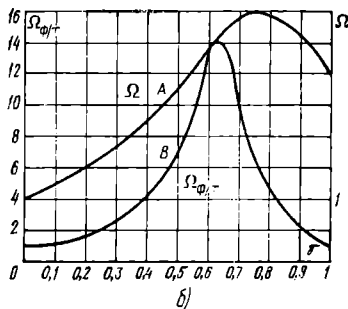
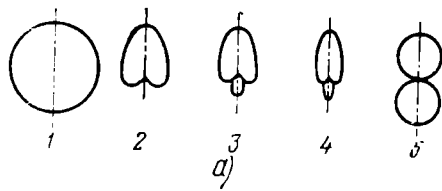


Рис. 5.11. Характеристики направленности комбинированного приемника (микрофона), состоящего из приемника давления и приемника градиента давления для различного соотношения чувствительности последних (а), и зависимости Ω и $\Omega_{\phi/T}$ от γ (б, где $\Omega_{\max}=4$):

1 — только приемник давления (окружность); 2 — чувствительность приемника давления и градиента давления равны (кардиоиды); 3 — чувствительность приемника градиента давления в 1,7 раза больше чувствительности приемника давления (суперкардиоиды); 4 — чувствительность приемника градиента давления в 3 раза больше чувствительности приемника давления (гиперкардиоиды); 5 — только приемник градиента давления («осьмерка»)

при $C \rightarrow \infty$ (5 на рис. 5.11а) получается односторонне направленная направленность (косинусоида — «осьмерка»).

Параметры Ω и $\Omega_{\phi/T}$ для микрофонов с такой направленностью могут быть выражены как:

$$\Omega = \frac{3(1+C)^2}{3+C^2} = \frac{1}{(1-\gamma)^2 + \gamma^2/3}$$

$$\Omega_{\phi/T} = \frac{1+C+C^2/3}{1-C+C^2/3} = \frac{1-\gamma+\gamma^2/3}{1-3\gamma+7\gamma^2/3}$$

Зависимость Ω и $\Omega_{\phi/T}$ от γ представлена на рис. 5.11б соответственно кривыми А и В.

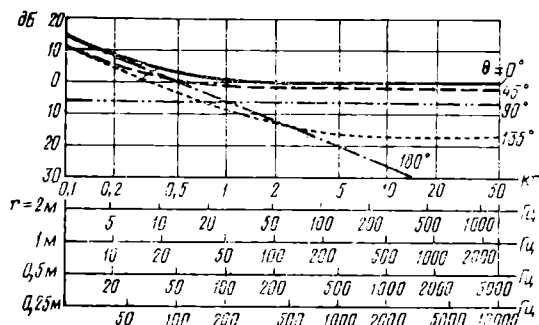
Пример. Чтобы определить эти параметры для гиперкардиоиды ($C=3$, $\gamma=0,75$) восстанавливаем ординату из точки на оси абсцисс $\gamma=0,75$ и отсчитываем на оси ординат $\Omega=4$ (6 дБ) и $\Omega_{\phi/T}=6,8$ (8 дБ). Микрофон с такой характеристикой будет иметь по сравнению с ненаправленным микрофоном при одном и том же соотношении сигнал/помеха на выходе дальность приема в поле равномерно распределенных в пространстве источников помех в $\sqrt{4}=2$ раза большую. В этих же условиях он будет подавлять помехи, приходящие от источников, расположенных в задней полусфере, по сравнению с ненаправленным микрофоном на $10 \lg 6,8 \approx 8$ дБ.

Кроме описанных выше параметров, отображающих направленность микрофона, большим распространением пользуется такой параметр, как выражаемый в децибелах перепад чувствительности «фронт/тыл».

Как уже упоминалось выше, сила, действующая на диафрагму микрофона градиента давления, вблизи от источника, т. е. в поле сферической волны,

не является прямо пропорциональной частоте, как это имеет место при нахождении этого микрофона в поле плоской волны. Но комбинированный (односторонне направленный), в частности кардиоидный, микрофон всегда может быть представлен как сочетание микрофона давления и микрофона градиента, имеющих равные чувствительности. Поэтому и частотная характеристика, и характеристика направленности для кардиоидных микрофонов этого типа меняются с удалением от источника, как это показано на рис. 5.12.

Рис. 5.12. Зависимость отношения чувствительности кардиоидного микрофона при разных углах θ между осью микрофона и направлением прихода звука и разных расстояниях до источника звука к его чувствительности при $\theta=0^\circ$ и $r=\infty$ от величины $kr=2\pi/\lambda$. Параметр семейства кривых — угол θ . Для определения величины kr в зависимости от расстояния и частоты служит нижняя часть графика



Пример. Пусть требуется определить, насколько чувствительность кардиоидного микрофона под углом 135° на расстоянии от источника $0,5$ м на частоте 50 Гц меняется по отношению к его осевой чувствительности. Из графика рис. 5.12 находим, что расстоянию $0,5$ м при частоте 50 Гц соответствует величина $kr=0,5$. На пересечении кривой 135° и ординаты $0,5$ находим величину $-2,8$ дБ. Настолько чувствительность под углом 135° на расстоянии $0,5$ м будет отличаться от осевой чувствительности микрофона при нахождении последнего на бесконечном расстоянии от источника. На расстоянии же, равном $0,5$ м, его осевая чувствительность ($\theta=0$, $kr=0,5$) будет отличаться от чувствительности на бесконечности на $+3,0$ дБ. Таким образом, чувствительность под углом 135° для расстояния $0,5$ м на частоте 50 Гц будет отличаться от чувствительности этого же микрофона на оси ($\theta=0$) на $+3,0-2,8=0,2$ дБ, т. е. чувствительности для этих углов будут практически одинаковы. Для кардиоидного же микрофона на бесконечно большом расстоянии от источника эти чувствительности будут различаться на $16,5$ дБ.

Примечательно, что для угла 90° чувствительность не меняется на любом расстоянии, что объясняется тем, что составляющая силы, обусловленной градиентом давления, будет для этого направления равна нулю.

Если форма характеристики направленности отличается от описанных выше, то коэффициент направленности Ω может быть вычислен и для других форм с помощью сеток, изображенных на рис. 5.13а (для микрофонов с тупыми характеристиками) и б (для остронаправленных микрофонов). Для получения величины Ω для каждого угла, отсчитываемого от оси, откладывают соответствующий ему спад характеристики направленности в децибелах от ее значения при 0° . Далее определяют площадь, ограниченную кривыми, соединяющими эти точки, и осью абсцисс. Отношение общей площади сетки (75 см^2) (половина $37,5$) к этой площади и является коэффициентом направленности.

Пример. Пусть микрофон имеет косинусоидальную характеристику. Поскольку косинусоида является тупой кривой, наносим половину ее на рис. 5.13 (сплошная линия). Для простоты вычисления проводим усредняющую прямую, являющуюся гипотенузой прямоугольного треугольника (пунктир). Абсцисса точки пересечения этой прямой с осью равна $3,2$ см. При высоте графика $7,5$ см общая площадь, ограниченная осями координат и пунктирной прямой, составит $-0,5 \cdot 3,2 \cdot 7,5 = 12$. Отсюда коэффициент направленности будет равен $37,5/12 = 3,125$, что, как мы видели выше, является почти точным его значением.

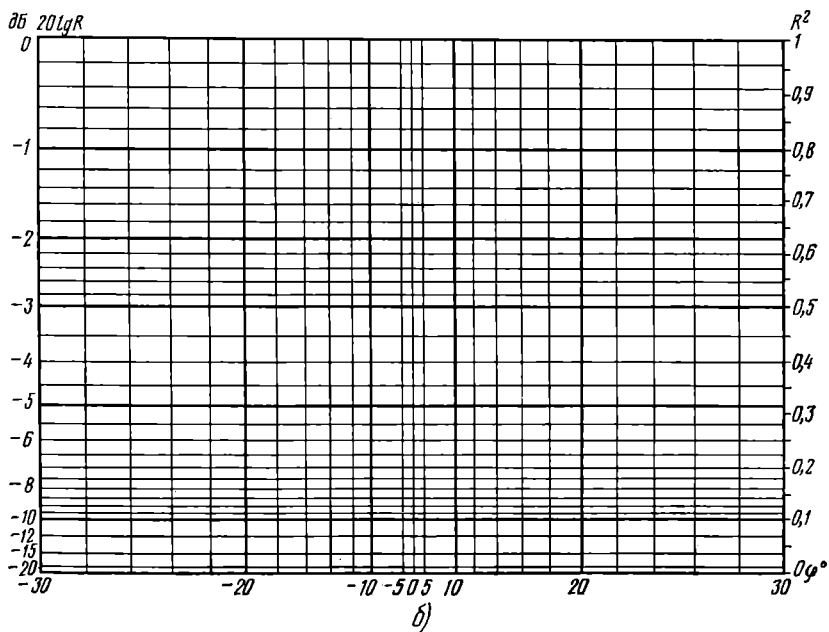
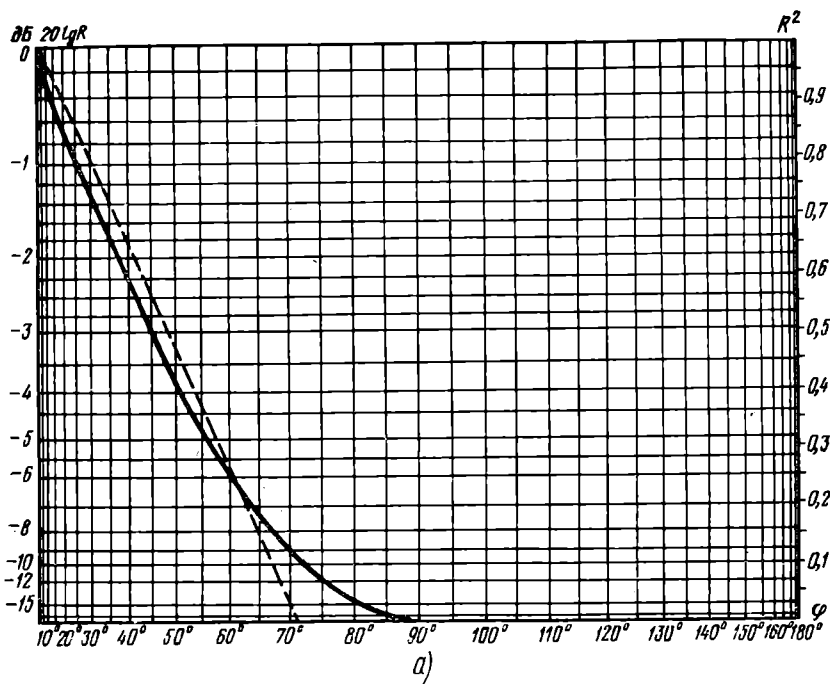
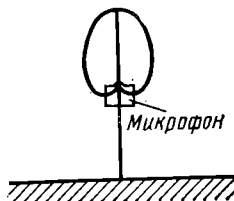


Рис. 5.13. График для определения коэффициента направленности микрофонов тупой (а) и острой (б) направленностью

Конструкции микрофонов, обеспечивающие получение разных форм характеристик направленности

Сферическую характеристику направленности, как было показано выше, имеют микрофоны давления, но только на низких частотах. Для получения круговой характеристики и на высших частотах, хотя бы в горизонтальной плоскости, микрофон иногда располагают так, чтобы его ось была вертикальной (рис. 5.14). Для получения двусторонней («восьмерочной») направленности применяют в основном микрофоны градиента давления (например, ленточный), т. е. такие, где диафрагма микрофона открыта воздействию звукового давле-

Рис. 5.14. Расположение кардиоидного микрофона для получения ненаправленной характеристики в горизонтальной плоскости



ния с обеих сторон. Для получения односторонней направленности раньше пользовались соединенными последовательно микрофоном давления и микрофоном градиента давления, конструктивно заключенными в один корпус. В настоящее время одностороннюю направленность получают в одном микрофоне, принцип действия которого заключается в том, что он имеет два пространственно-разнесенных входа для воздействия звукового давления с расстоянием между ними d и что сдвиг фазы звукового давления внутри микрофона делается равным сдвигу фазы звукового давления на пути от первого входа (у диафрагмы) до второго (см. рис. 5.4). Это может быть пояснено векторной диаграммой рис. 5.15. Здесь p_A — звуковое давление, действующее на диа-

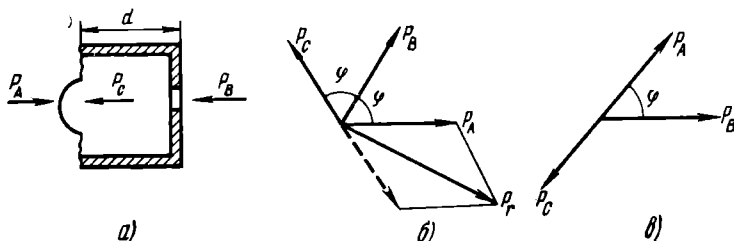


Рис. 5.15. Векторные диаграммы звуковых давлений, действующих на кардиоидный микрофон

фрагму. От его фазы на угол φ отстает фаза звукового давления p_B у второго входа. Внутри микрофона звуковое давление претерпевает такой же сдвиг фазы на угол φ , и на обратную сторону диафрагмы в результате действует звуковое давление p_C . Тогда результирующее давление, приводящее диафрагму в колебания, будет p_r . Если же звук приходит со стороны второго входа, то звуковые давления p_A и p_C будут одинаково сдвинуты по фазе относительно звукового давления p_B и разность p_A и p_C будет равна нулю. Вследствие этого диафрагма останется в покое и выходное напряжение микрофона будет равно нулю. Необходимые сдвиги фаз и соотношения параметров элементов внутренней фазосдвигающей акустико-механической системы микрофона получаются при рассмотрении действия его схемы-анalogии, которая в упрощенном виде изображена на рис. 5.16.

Условие односторонней направленности микрофона, представляемого такой схемой, выполняется, если $z_1/z_3 = i\omega(d/c)$. Это условие обычно бывает трудно соблюсти во всем диапазоне частот. Поэтому в реальных конструкциях делают несколько «вторых» входов, каждый для своей области частот так, чтобы расстояние уменьшалось по мере повышения частоты.

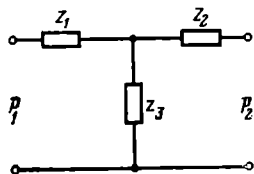


Рис. 5.16. Схемы односторонне направленного микрофона:
а) аналогии: z_1 — механическое сопротивление подвижной системы, z_2 — механическое сопротивление второго входа, z_3 — механическое сопротивление внутренней фазосдвигающей акустико-механической системы микрофона

Для оперативного изменения направленности микрофонов у некоторых их типов возможно дистанционное управление ею путем электрического переключения выходов составляющих микрофонов с различными характеристиками направленности. Так, если имеются два одинаковых кардиоидных микрофона, акустические оси которых направлены противоположно, то их характеристики направленности могут быть представлены как

$$e_1 = \frac{e_0}{2} (1 + \cos \theta) \text{ и } e_2 = \frac{e_0}{2} (1 - \cos \theta).$$

Согласное последовательное электрическое соединение этих микрофонов дает суммарную ЭДС: $e = e_1 + e_2 = e_0$, что соответствует отсутствию направленности (круговая или сферическая характеристики). Встречное последовательное включение дает суммарную ЭДС $e = e_1 - e_2 = e_0 \cos \theta$, т. е. двустороннюю (восьмерочную) характеристику.

Таким образом, с помощью переключателя, находящегося на каком-то расстоянии от такого двоянного микрофона, можно получить следующие характеристики направленности: кардиоида, обращенная в одну сторону; кардиоида, обращенная в другую сторону; круговая; косинусоидальная. Кроме того, применяя потенциометрическое включение микрофонов, т. е. складывая полное напряжение от одного микрофона с долей напряжения от другого микрофона, можно получить еще ряд промежуточных характеристик.

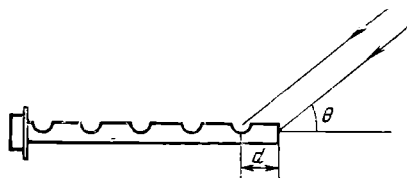


Рис. 5.17. К пояснению действия остро-направленного микрофона

Микрофоны остро-направленные современной конструкции обычно состоят из микрофона, к которому примыкает трубка с отверстиями по длине (рис. 5.17) или со сплошной осевой прорезью. Отверстия или прорезь обычно закрываются тканью.

Если звук приходит по оси, то пути его распространения по трубке и через отверстия одинаковы и составляющие звукового давления от прошедших через трубки колебаний синфазны и, следовательно, сумма их, действующая на диафрагму, максимальна.

Если же звук приходит под углом θ к оси трубки, то разность пути звука по всей трубке и пути от входа в трубку до входа в отверстие, находящееся на расстоянии d от входа в трубку, обусловит сдвиг фаз, определяемый как $d(1 - \cos \theta)(\omega/c)$. В свою очередь, это создает сдвиг фаз различной величины между колебаниями, пришедшими через разные отверстия, что приводит, следовательно, к уменьшению результирующего давления, действующего на диафрагму.

Следует заметить, что чем большую остроту направленности нужно получить, тем больше должна быть длина звукоприемного элемента (трубки), так

как острота направленности увеличивается с увеличением величины D/λ — отношения длины трубки к длине волны принимаемого звука.

Принципиальное значение направленные свойства микрофонов имеют в стереофонических системах. Здесь применяются три способа приема. *Способ АВ*, при котором используются два пространственно-разнесенных микрофона (правый и левый), напряжения от которых подаются в правый и левый каналы стереофонической системы. *Способ ХУ*, при котором микрофоны пространственно совмещены (обычно один над другим) и образуют единую конструкцию. Однако при этом акустические оси микрофонов, как правило кардиондных, развернуты так, что угол между ними составляет примерно 90° . Такое расположение в какой-то степени имитирует прием звука ушами, максимумы характеристик направленности которых также развернуты друг относительно друга. Как и в системе АВ, выходные напряжения микрофонов подаются на входы правого и левого каналов стереофонической системы.

Способ MS, при котором применяются также два микрофона: один — ненаправленный, другой — с косинусоидальной характеристикой направленности, минимум которой направлен на источник звука. Они конструктивно совмещены между собой, как и при способе ХУ. Выходные напряжения этих микрофонов с помощью трансформаторов складываются и вычитаются. Сумма напряжений подается на вход одного из каналов стереофонической системы (скажем, правого), разность этих напряжений — на вход другого канала (скажем, левого). Таким образом, для целей стереофонии применяются микрофоны с известными характеристиками направленности, но имеющие специальную конструкцию расположения и крепления их пары.

В последние годы появился еще один способ применения микрофонов в стереофонии, так называемый способ искусственной головы. В нем малые ненаправленные микрофоны устанавливаются на макете искусственной головы на местах, соответствующих входам в слуховые каналы правого и левого уха. Таким образом, хорошо имитируются условия приема звука двумя ушами и, в частности, направленность последних. Выходные напряжения этих микрофонов подаются на выходы правого и левого каналов стереофонической системы.

Серьезной задачей, решение которой имеет важное практическое значение, является обеспечение шумозащищенности микрофона, что позволяет ему при нахождении в поле помех (шумов) выделять на их фоне полезный сигнал. Шумозащищенность микрофона достигается разными способами. Простейшим из них является размещение микрофона в непосредственной близости от источника полезного сигнала. При этом интенсивность от последнего увеличивается, и таким образом повышается отношение сигнал/помеха, что позволяет лучше выделять полезный сигнал. Если полезный сигнал и помеха имеют различающиеся между собой по ширине амплитудно-частотные спектры, то шумозащищенность может быть достигнута путем ограничения частотного диапазона микрофона границами спектра сигнала или же наиболее важной частью этого спектра. Этот метод не применим, если спектр сигнала шире спектра помехи или равен ему по ширине.

Для далеких от микрофона источников полезного сигнала и пространственно-распределенных источников помех весьма эффективным способом шумозащищенности является применение остронаправленных микрофонов, ориентированных на источник полезного сигнала. В случае же дискретных (единичных) источников помех удовлетворительные результаты получаются при применении двусторонних восьмерочных (косинусоидальных) или односторонне направленных (кардиондных) микрофонов, ориентируемых направлением нулевой чувствительности на источник помех.

Наиболее трудной задачей обычно является обеспечение шумозащищенности микрофонов, работающих в условиях близко расположенных источников помех с широким частотным спектром, создающих у микрофонов высокий уровень шумов. Здесь эффективным является использование микрофонов градиента давления, размещаемых как можно ближе к источнику полезного сигнала (на-

пример, ко рту при приеме речи), так как в поле его сферической волны источники помех будут восприниматься с меньшей чувствительностью, чем полезный сигнал близко расположенного источника.

Величина шумозащищенности Q_3 таких микрофонов в зависимости от произведения kr , где r — расстояние от источника полезного сигнала до средней плоскости микрофона, а k — волновое число, и от разности хода d между передней и задней сторонами подвижной системы выражается как

$$Q_3 = 10 \lg \frac{1 + \left(\frac{r}{r+d} \right)^2 - \frac{2r}{r+d} \cos kd}{2(1 - \cos kd)} + 5.$$

Добавление 5 дБ в приведенной формуле отображает снижение уровня помех благодаря косинусоидальной (восьмерочной) направленности микрофона. Величина Q_3 может быть определена и из графика рис. 5.18.

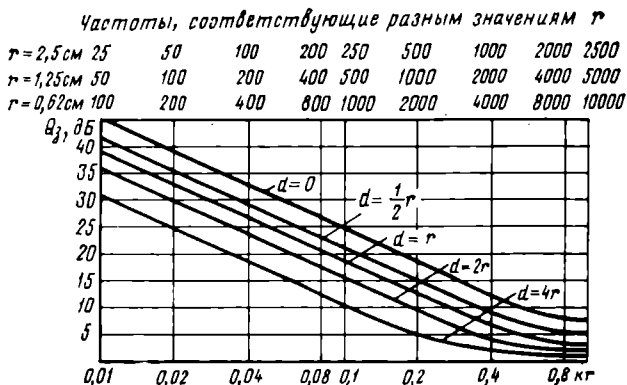


Рис. 5.18. Зависимость шумозащищенности Q_3 от произведения kr . Параметр семейства кривых d

Пример. Пусть требуется найти шумозащищенность на частоте 500 Гц микрофона, в котором разность хода между передней и задней сторонами подвижной системы составляет 2,5 см, расположенного на расстоянии 1,25 см от полезного источника (r та). В данном случае $d=2r$. По таблице, помещенной вверху рисунка, видно, что расстоянию 1,25 см и частоте 500 Гц соответствует $kr=0,1$. Восстанавливая ординату в этой точке оси абсцисс до пересечения с кривой, имеющей отметку $d=2r$, отсчитываем по оси ординат 16 дБ, что приблизительно и является искомой величиной.

5.5. ТЕХНИЧЕСКИЕ ТРЕБОВАНИЯ К МИКРОФОНАМ

Основные требования к микрофонам в СССР нормируются в общесоюзных стандартах и технических условиях.

Требования к угольным микрофонам устанавливаются в ГОСТ 13492—68 «Микрофоны угольные для телефонных аппаратов общего применения». Учитывая, что микрофонный капсюль должен вставляться в микрофонную трубку, стандартизируются его размеры (рис. 5.19). Далее оговариваются

условия питания. Для микрофонов ЦБ устанавливается, что их динамическое сопротивление (при воздействии на них звуком) должно лежать в пределах 100—200 Ом, а ток питания должен быть 40 мА. Для микрофонов МБ — соответственно сопротивление 20—80 Ом и напряжение 2,8 В. Статическое сопротивление микрофонов ЦБ не должно превышать 250 Ом, а микрофонов МБ — 20 Ом. Сопротивление угольного микрофона в положении, когда его диафрагма горизонтальна, не должно превышать больше чем в 2 раза его сопротивление, когда диафрагма вертикальна.

Частотная характеристика микрофона должна быть по форме такой, чтобы укладывалась в допусковую область, изображенную на рис. 5.20а. Амплитудная характеристика угольного микрофона должна быть такой, чтобы его чувствительность при воздействии звукового давления 0,1 и 3 Па не отличалась бы от чувствительности при 1 Па больше чем в 2 раза. Напряжение собственных шумов не должно быть больше 0,3 мВ (псифометрических).

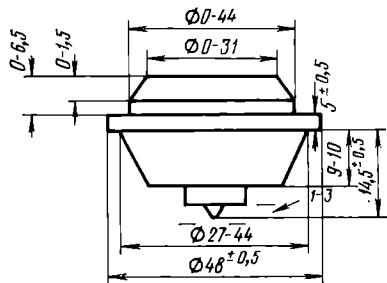


Рис. 5.19. Стандартизованные размеры капсулы угольного микрофона, предназначенного для использования в микрофонных трубках

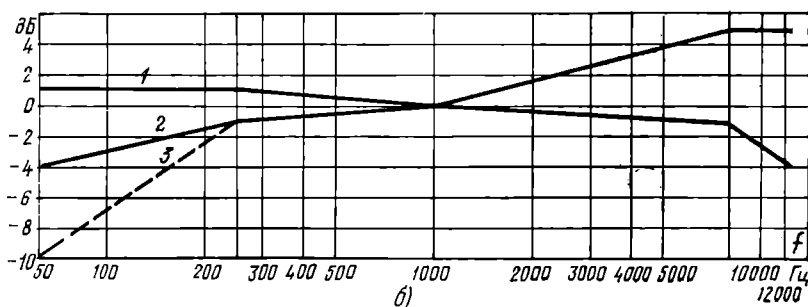
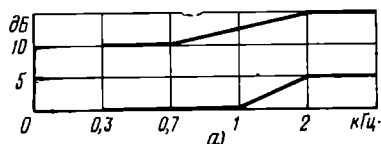


Рис. 5.20. Допусковая частотная характеристика:

а) угольного микрофона для микрофонных трубок; б) микрофона высокого качества (НЧФ)

Требования к динамическим микрофонам нормируются в ГОСТ 6495—73 «Микрофоны динамические катушечные». Он устанавливает четыре класса качества и рекомендует их области применения:

Высший

для профессиональной передачи и записи, а также звукоусиления музыки и художественной речи в студиях, концертных залах и театрах

- | | |
|-----------------------|---|
| I | для передачи и записи (в том числе с бытовой аппаратурой магнитной записи), а также звукоусиления музыки и художественной речи в студиях, залах и театрах |
| II | для передачи и записи (в том числе с бытовой аппаратурой магнитной записи), а также звукоусиления речи в любых помещениях |
| III
(группы А и Б) | для передачи и записи (в том числе с бытовой аппаратурой магнитной записи), звукоусиления речи в любых помещениях и вне помещения, а также для местного радиовещания, диспетчерской и служебной связи |

Основные электроакустические параметры микрофонов, нормируемые этим же ГОСТ, приводятся в табл. 5.4.

Требования к другим типам микрофонов (конденсаторным, электретным и др.) оговариваются в технических условиях на них и, как правило, являются более высокими по сравнению с требованиями на динамические микрофоны.

Следует упомянуть, что в целях международной стандартизации в МЭК (международная электротехническая комиссия) в настоящее время обсуждаются минимальные требования к микрофонам для систем высокого качества (Hi Fi). Этими требованиями нормируется частотный диапазон 50—12 500 Гц. Частотная характеристика микрофона должна укладываться в допусковую область, приведенную на рис. 5.21б (сплошные линии для ненаправленных микрофонов, пунктирная — для направленных). Отклонения частотной характеристики индивидуального микрофона не должны отличаться от типовой в области 50—250 Гц больше чем на ± 3 дБ, в области 250—8000 Гц — больше чем на $\pm 2,5$ дБ и в области 8000—12 500 Гц — больше чем на ± 3 дБ. Крутизна склонов частотной характеристики в любой области диапазона 250—8000 Гц не должна превышать 6 дБ/окт, а ниже 250 дБ и выше 8000 дБ — 9 дБ/окт. Для стереомикрофонов в диапазоне 250—8000 Гц частотные характеристики пары не должны различаться между собой больше чем на 3 дБ.

Для ненаправленных микрофонов чувствительность для всех углов от 0 до 90° не должна отличаться от осевой больше чем на 2 дБ в области частот ниже 1000 Гц, больше чем на 4 дБ в области 1000—5000 Гц и больше 8 дБ в области 5000—8000 Гц. Для направленных микрофонов эта разность чувствительностей не должна превышать ± 4 дБ в области 250—8000 Гц для всех углов, для которых чувствительность отличается от осевой меньше чем на 12 дБ. Предполагается, что разница в чувствительности определяется при совмещении частотных характеристик, снятых под разными углами на частоте 1000 Гц. Индекс направленности для направленных микрофонов должен быть не менее 3 дБ в диапазоне 250—8000 Гц. Нелинейные искажения не должны превышать 1% при уровне звукового давления до 114 дБ. Эквивалентный внутренним шумам микрофона уровень звукового давления не должен превышать 26 дБ по кривой А (см. § 2.3).

Микрофоны, используемые в трактах связи, обычно устанавливаются в местах расположения входных устройств трактов (например, микрофоны микротелефонных трубок) и работают в условиях, в которых работают эти устройства. Такие условия предусматривают по ГОСТ 13492—68 «Микрофоны угольные для телефонных аппаратов общего применения» для категории «Н» (нормальные) рабочий диапазон температур $-10 \div +45^\circ\text{C}$ и относительную влажность до $90 \pm 3\%$, а для категории «У» (устойчивые) рабочий диапазон температур $-50 \div +50^\circ\text{C}$ и относительную влажность до $95 \pm 3\%$.

Для микрофонов, предназначенных для других целей, как-то: для радиовещания, телевидения, звукозаписи, звукоусиления, акустических измерений — оговорены специальные условия хранения и нормальных условий работы. Так, ГОСТ 6495—73 оговаривает, что микрофоны должны храниться в сухих проветриваемых помещениях, в условиях, исключающих возможность их механического повреждения (лучше всего в специальных шкафах), при относительной

влажности воздуха до 85% и при отсутствии в нем примесей, вредно влияющих на микрофоны. Нормальными климатическими условиями работы тот же стандарт считает температуру окружающего воздуха $+25 \pm 10^\circ\text{C}$, влажность $65 \pm 15\%$ и атмосферное давление 650—800 мм рт. ст.

Механическая прочность микрофонов должна быть такова, чтобы в соответствующей упаковке они переносили перевозку любым видом транспорта.

ТАБЛИЦА 5.4

Нормы на параметры динамических микрофонов

Параметр ¹	Норма по классам				
	Высший	I	II	III	
				группа А	группа Б
Характеристика направленности	Круг ² , улитка Паскаля (кардиоида, суперкардиоида, гиперкардиоида)				
Номинальный диапазон частот, Гц	31,5— —16 000	50— —14 000	80— —10 000	100—8 000	
Чувствительность холостого хода микрофона с модулем полного электрического сопротивления 250 ± ±50 Ом на частоте 1000 Гц, мВ/Па, не менее	1,2	1,5	2,0		
Неравномерность типовой частотной характеристики чувствительности, дБ, не более ³	в номинальном диапазоне частот	5	8	12	20
	в диапазоне частот 100—10 000 Гц	3	4	—	—
Отклонение частотной характеристики чувствительности от типовой характеристики, дБ	±2,0		±2,5		
Перепад чувствительности «фронт/тыл», дБ, не менее	на любой частоте, начиная с частоты 100 Гц и выше	12	8	6	
	средняя величина	15	12		

¹ Электроакустические параметры, указанные в таблице, относятся к микрофонам без противоветровых экранов. Изменения электроакустических параметров, обусловленные противоветровыми экранами, должны оговариваться в технической документации.

² Правильнее — окружность.

³ Типовая частотная характеристика чувствительности — это средняя частотная характеристика чувствительности, определенная по значениям чувствительности холостого хода 100 микрофонов, причем каждый из них должен удовлетворять нормам данной таблицы.

Однако микрофоны динамические должны выдерживать более суровые условия. Так, по тому же ГОСТ 6495—73 микрофоны должны сохранять работоспособность при перечисленных в табл. 5.5 климатических и механических воздействиях и соответствовать всем требованиям этого стандарта после прекращения указанных воздействий.

ТАБЛИЦА 5.5

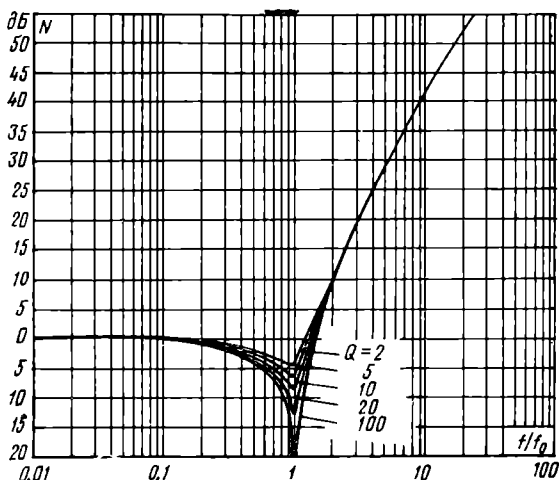
Нормы на параметры испытаний динамических микрофонов

Вид испытаний	Параметр	Норма по классам		
		высшего I, II и III (группа А)	III (группа Б)	
Ударная прочность	Ускорение	15	10	120
	Длительность ударного импульса, мс	5—10	5—10	1—3
	Частота ударов, уд./мин	40—80	40—80	40—80
	Количество ударов	5 000	20 000	4 000
Вибропрочность	Ускорение	3	2—6	
	Частота, Гц	10—80	10—80	
	Продолжительность, ч	2	0,5	
Теплоустойчивость	Рабочая температура, °C	50±2	50±2	
	Продолжительность, ч	4	4	
Теплопрочность	Предельная температура, °C	60±2	65±3	
	Продолжительность, ч	2	2	
	Выдержка в нормальных климатических условиях, ч	6	6	
Влагоустойчивость	Относительная влажность воздуха, %	85±2	—	
	Температура, °C	20±2	—	
	Продолжительность, ч	48	—	
Влагопрочность	Предельная относительная влажность воздуха, %	93±2	95—98	
	Температура, °C	30±2	40	
	Продолжительность, ч	48	240	
	Выдержка в нормальных климатических условиях, ч	12	6	
Холодоустойчивость	Рабочая температура, °C	-20±2	-50±3	
	Продолжительность, ч	4	4	
Холодопрочность	Предельная температура, °C	-40±2	-55±3	
	Продолжительность, ч	2	2	
	Выдержка в нормальных климатических условиях, ч	6	4	
Циклическое изменение температуры	Температура, °C	—	(-55), 65	
	Продолжительность, ч	—	1	
	Количество циклов	—	3	
	Выдержка в нормальных климатических условиях, ч	—	6	

Существенное влияние на качество работы микрофона имеет степень его подверженности не только вибрационным, но и индукционным и ветровым помехам. Для того чтобы микрофон хорошо противостоял тряске и вибрациям, он должен быть хорошо амортизирован. Это достигается амортизацией стойки, на которой он укреплен, амортизацией самого микрофона на стойке и т. д. Следует помнить, что любая амортизация тем эффективнее, чем ниже резонансная частота системы упругость амортизатора — амортизируемая масса.

Степень уровня ослабления вибрации, передаваемой последней, можно легко определить из рис. 5.21, на котором она представлена, в зависимости от отношения частоты передаваемых колебаний к резонансной частоте системы амортизатор — масса при разных величинах добротности этой системы. Отрицательные величины уровня ослабления означают увеличение силы, передаваемой массе, благодаря явлению резонанса.

Рис. 5.21. Уровень ослабления вибраций амортизируемой массы в зависимости от отношения частоты вибрации к резонансной частоте колебательной системы (амортизируемая масса — упругость амортизатора). Параметр семейства кривых — Q — добротность колебательной системы



Пример. Пусть требуется найти резонансную частоту системы, состоящей из микрофона, подвешенного на амортизирующих пружинах, если желательно ослабить воздействия вибраций на частоте 100 Гц на 25 дБ. Восстанавливая абсциссу из точки на оси ординат, соответствующей 25 дБ, до пересечения с кривой, отсчитываем на оси абсцисс отношение частот, равное 4. Отсюда резонансная частота системы будет $100/4 = 25$ Гц, что приблизительно и является искомой величиной.

Что касается экспериментального определения резонансной частоты, то это может быть сделано по величине статического прогиба или провисания амортизируемой массы на упругой прокладке, подвесе и т. п. по формуле $f_0 = 0,5 / \sqrt{x}$, где x — величина прогиба или провисания.

Пример. Пусть микрофон при подвешивании на пружине провис на 0,005 м (0,5 см). Тогда резонансная частота системы масса микрофона — упругость пружины $f_0 = 0,5 / \sqrt{0,005} = 7$ Гц. Но таким путем можно определить лишь низкие резонансные частоты. Определение более высоких затруднительно из-за малости соответствующего прогиба или провисания.

Индуктированное напряжение, развиваемое под воздействием переменного магнитного поля напряженностью 5 А/м, не должно создавать уровень эквивалентного звукового давления более 50 дБ относительно $2 \cdot 10^{-5}$ Па. Наиболее эффективным способом борьбы с индукционными помехами в наиболее подверженных им динамических микрофонах является применение так называемых антифонных катушек. Последние размещаются вблизи основной катушки и включаются последовательно с ней, но противофазно. Число витков антифонной катушки подбирается так, чтобы индуктированная в ней ЭДС помех была бы равна ЭДС, индуктируемой ими в основной катушке. Следует заметить, что, поскольку на сопротивлении антифонной катушки падает полезное напряжение микрофона, применение ее понижает его результирующую чувствительность.

Борьба с ветровыми помехами ведется с помощью противоветровых экранов, изготовляемых большей частью из поропласта и надеваемых на микрофон, если предполагают использовать его на открытом воздухе. Сродни ветровым помехам помехи от импульсов выдыхания при произнесении взрывных согласных при близком расположении микрофона ко рту говорящего. Эти импульсы заметно ухудшают качество звучания при воспроизведении речи, если не принимаются никаких мер. Последние заключаются, например, в том, что какие-то элементы акустического сопротивления помещаются между ртом и подвижной системой микрофона. Пример такой конструкции описан в § 5.6. Импульсы выдыхания и от взрывных звуков практически не воспринимаются, если микрофон располагается на 1—2 см в сторону от оси рта.

ГОСТ 6495—73, помимо рода требований, оговаривает также следующим образом комплектацию микрофонов:

- микрофон с трансформатором или без него;
- экранированный соединительный кабель со штыревой частью соединителя на конце (кабель может подключаться непосредственно к микрофону или через штепсельный соединитель, одна часть которого вмонтирована в корпус микрофона; длину кабеля и его марку указывают в технической документации, утвержденной в установленном порядке);

- гнездовая часть соединителя;

- микрофонная стойка (настольная);

- шарнир (если конструкцией не предусмотрено постоянство угла наклона микрофона или шарнир не является неотъемлемой частью микрофона), обеспечивающий закрепление микрофона под любым углом в секторе 45° от горизонтали;

- непромокаемый чехол;

- футляр (для микрофонов высшего и I классов).

Выше излагались нормы и требования, перечисленные в стандартах на угольные и динамические микрофоны. Однако и микрофоны других типов являются достаточно стойкими к климатическим и механическим воздействиям, что нормируется соответствующими документами, равно как и электроакустические параметры. Кроме параметров, оговариваемых для динамических микрофонов, в указанных документах указываются и некоторые другие. Так, для конденсаторных — условия питания для встроенного усилителя и поляризации, а также уровень эквивалентного шума и максимальный уровень сигнала, выше которого микрофон перегружается.

Ниже описывается устройство нескольких наиболее характерных отечественных и зарубежных микрофонов, их эквивалентные электрические схемы и параметры.

5.6. ОПИСАНИЕ НЕКОТОРЫХ ТИПОВ МИКРОФОНОВ

Угольный микрофон

Наиболее распространенными в СССР типами угольных микрофонов, применяемых в телефонии, переговорных устройствах, радиопередатчиках и т. п., являются капсули МК-10 и МК-16. Конструкция капсуля МК-10 представлена на рис. 5.22а, а его аналоговая электрическая схема — на рис. 5.22б. Капсюлю МК-10 выпускается в трех модификациях, различающихся между собой электрическим сопротивлением и условиями питания.

Модификация НО имеет сопротивление 50 Ом, напряжение ее питания в схемах МБ 1,5 или 3 В. Сопротивление модификации СО 100 Ом. Сопротивление модификации ВО 200 Ом, ток ее питания в схемах ЦБ 10—40 мА. Средняя чувствительность микрофона МК-10 200 мВ/Па.

Капсюль МК-16, предназначенный в основном для аппаратов ЦБ-АТС, имеет некоторые конструктивные отличия от капсюля МК-10 (рис. 5.23а). Важнейшее из них — форма палладированных электродов камеры с угольным порошком, которая обеспечивает большую стабильность работы микрофона при его угловых перемещениях, так как при любом из них контакт между электро-

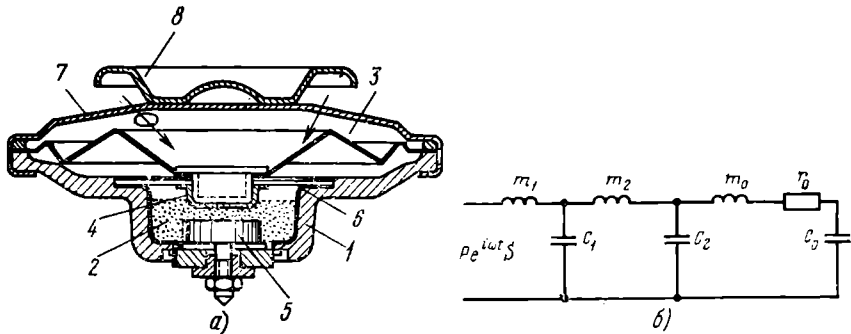


Рис. 5.22 Капсюль МК-10:

а) конструкция: 1 — корпус; 2 — угольный порошок внутри покрытого изолирующим лаком углубления корпуса; 3 — латунная диафрагма; 4 — позолоченный подвижный электрод; 5 — неподвижный электрод; 6 — кольцо-прокладка, ограничивающая камеру с угольным порошком; 7 — крышка с тремя звукоприемными отверстиями общей площадью S ; 8 — антиморозная тарелочка, защищающая эти отверстия на морозе от оседания на них паров, выходящих изо рта говорящего; б) аналоговая электрическая схема: $p_e i \omega t S$ — звуковое давление, действующее на вход микрофонной трубки; m_1 — масса воздуха в отверстиях трубки; c_1 — гибкость воздуха в объеме между отверстиями и диафрагмой микрофона; m_2 — масса воздуха в звукоприемных отверстиях; c_2 — гибкость воздуха в объеме между звукоприемными отверстиями и диафрагмой; m_0 , r_0 , c_0 — масса, активное сопротивление и гибкость диафрагмы

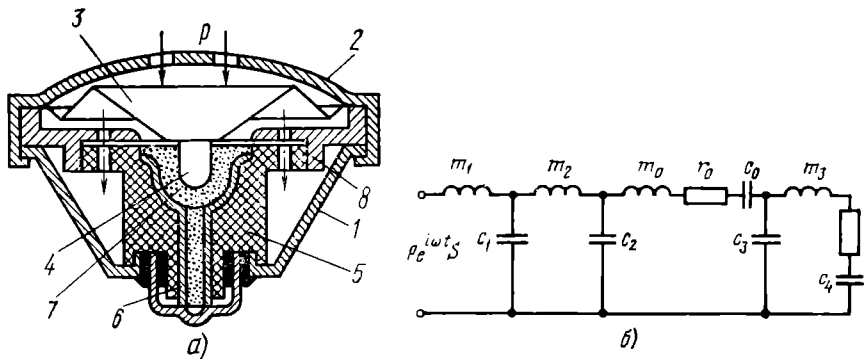


Рис. 5.23. Микрофон МК-16:

а) конструкция: 1 — корпус; 2 — крышка с звукоприемными отверстиями общей площадью S ; 3 — диафрагма; 4 — подвижный электрод; 5 — держатель неподвижного электрода; 6 — камера для угольного порошка; 7 — кольцо с отверстиями, затянутое шелком, разделяющее объем под ним и объем под диафрагмой; б) аналоговая электрическая схема: $p_e i \omega t S$ — звуковое давление, действующее на вход микрофонной трубки; m_1 — масса воздуха в ее отверстиях; c_1 — гибкость воздуха в объеме между отверстиями и капсюлем микрофона; m_2 — масса воздуха в звукоприемных отверстиях; c_2 — гибкость воздуха в объеме между звукоприемными отверстиями и диафрагмой капсюля микрофона; r_0 , m_0 , c_0 — активное сопротивление, масса и гибкость диафрагмы; c_3 — гибкость воздуха в объеме под диафрагмой; r_3 и m_3 — активное сопротивление и масса воздуха в отверстиях в кольце, затянутом шелком; c_4 — гибкость воздуха в объеме под кольцом с отверстиями

дами через порошок не разрывается. Воздух под диафрагмой делится на две части, соединяющиеся между собой через алюминиевое кольцо с отверстиями, затянутыми шелком, вносящим акустическое сопротивление. Это, как видно из аналоговой электрической схемы (рис. 5.23б), усложняет ее. Акустическое же сопротивление сглаживает резонансные пики. В результате становится более

равномерной частотная характеристика, повышается чувствительность, среднее значение которой составляет 400 мВ/Па. Капсюль выпускается в двух модификациях: сопротивлением 70 (СО) и 200 Ом (ВО) при токах питания соответственно 100 и 50 мА.

На рис. 5.24 представлены частотные характеристики чувствительности микрофонов МК-10 и МК-16.

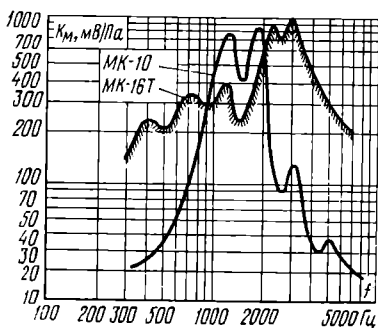


Рис. 5.24. Частотные характеристики микрофонов МК-10 и МК-16

Электромагнитный микрофон

Из электромагнитных микрофонов наибольшее распространение в СССР имеет микрофон ДЭМШ. Его устройство изображено на рис. 5.25а.

Звуковое давление через отверстия в магнитопроводах 2, прилегающих к кольцеобразным магнитам 1, воздействует с двух сторон на диафрагму 3. Последняя приходит в колебания, приближаясь попеременно то к одному, то к другому магнитопроводу. Это соответственно вызывает то увеличение магнитного потока Φ_1 , то увеличение потока Φ_2 . Благодаря этому в обмотках возникают ЭДС одинаковой величины, но разного направления. Однако вследствие того что эти обмотки намотаны в противоположных направлениях, ЭДС складываются. Аналоговая схема микрофона ДЭМШ изображена на рис. 5.25б. На ней видно, что силы, действующие на диафрагму с двух сторон, сдвинуты по фазе друг относительно друга, поскольку микрофон располагается так, что полезный источник звука находится ближе к одному звукоприемному отверстию, чем к другому. В результате микрофон работает как приемник градиента давления, т. е. является шумозащищенным. Действительно, применение микрофона в условиях шума является весьма эффективным. Частотный диапазон микрофона простирается от 300 до 3000 Гц. Его частотная характеристика изображена на рис. 5.25в, а характеристика направленности — на рис. 5.25е. Чувствительность микрофона на частоте 1000 Гц — не менее 7,7 мВ/Па, а средняя по диапазону — 3,3 мВ/Па. Чувствительность микрофона на номинальной нагрузке 600 Ом на частоте 1000 Гц — не менее 0,44 мВ/Па, а средняя по диапазону — 0,22 мВ/Па. Модуль полного электрического сопротивления на частоте 1000 Гц 400—1000 Ом. Габариты микрофона $\varnothing 23 \times 11$ мм. Масса 14 г.

Кроме микрофона ДЭМШ, довольно широко применяется в аппаратуре связи микрофон МЭМ-60. Его частотный диапазон простирается от 250 до 3000 Гц, а чувствительность на номинальной нагрузке 60 Ом на частоте 1000 Гц 2—10 мВ/Па. Модуль полного электрического сопротивления на этой же частоте $300 \text{ Ом} \pm 20\%$. Микрофон снабжен резиновым рупорком и четырехпроводным шнуром длиной 1,25 м с жилами, облуженными на концах. Габариты микрофона $176 \times 60 \times 80$ мм. Масса 400 г.

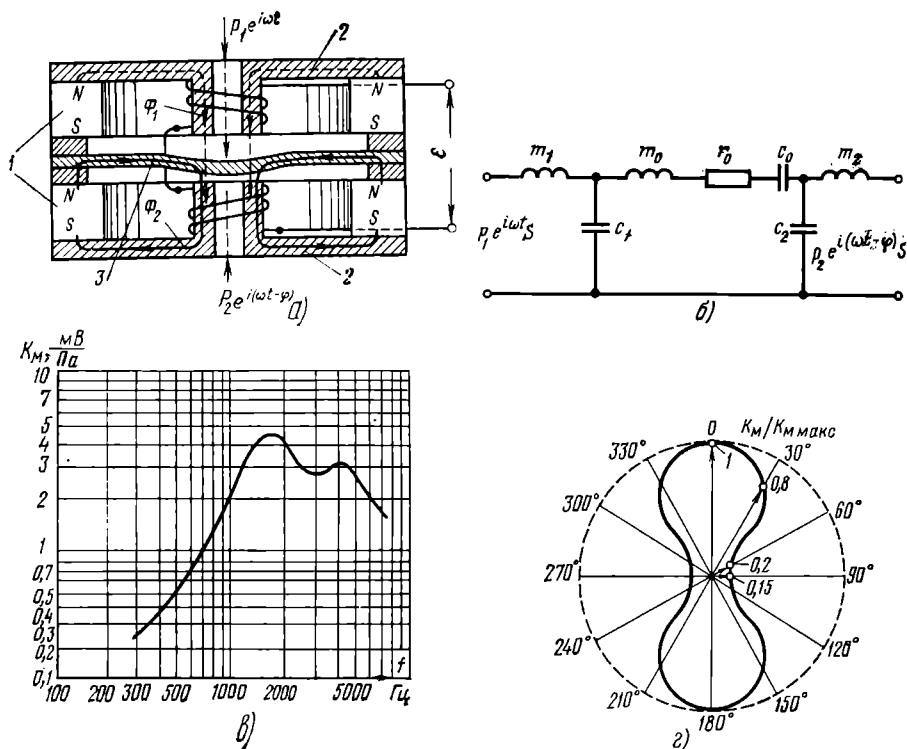


Рис. 5.25. Электромагнитный микрофон ДЭМШ:

а) устройство; б) аналоговая электрическая схема: $P_1 e^{i\omega t}$; $P_2 e^{i(\omega t - \varphi)}$ — звуковые давления, действующие на отверстия в магнитопроводах площадью S ; m_1 , m_2 — масса воздуха в отверстиях магнитопровода; c_1 , c_2 — гибкость воздуха в объеме между отверстиями и диафрагмой; m_0 , r_0 , c_0 — масса, активное сопротивление и гибкость диафрагмы; в) частотная характеристика; г) характеристика направленности микрофона ДЭМШ

Динамический микрофон

Динамические микрофоны, в принципе, могут быть выполнены ненаправленными, двусторонне направленными (восьмерочные), односторонне направленными и остронаправленными. Однако практически не выпускаются динамические микрофоны с косинусоидальной (восьмерочной) характеристикой. Так, в СССР ненаправленных микрофонов выпускают лишь несколько типов: для измерений (МД-71), петличные для ораторов (МД-63), для комплектации радиомикрофонов (МД-63р), дешевые для домашней записи звука (МД-201). Сравнительно мало распространены также остронаправленные динамические микрофоны. Больше всего и в Советском Союзе, и за рубежом выпускаются односторонне ненаправленные микрофоны. В качестве примера устройства ненаправленного микрофона опишем микрофон МД-63, внешний вид которого приведен на рис. 5.26а. Внутри корпуса, передняя сторона которого имеет решетку с отверстиями для прохода звука, находится капсуль. Зазор капсуля снизу закрыт кольцом с отверстиями, заклеенными шелком для создания акустического сопротивления. Сверху диафрагмы, расположена накладка, повторяющая по профилю форму центральной части диафрагмы и служащая для повышения

чувствительности на высших частотах. Объем воздуха внутри магнитной системы капсюля соединен посредством отверстий, также заклеенных шелком, с объемом воздуха внутри кожуха. Такую же в основном конструкцию имеют и другие динамические микрофоны. Поэтому в дальнейшем мы на этих деталях конструкции останавливаться не будем.

На рис. 5.26б приведена также аналоговая электрическая схема микрофона. Параметры микрофона приведены в табл. 5.6.

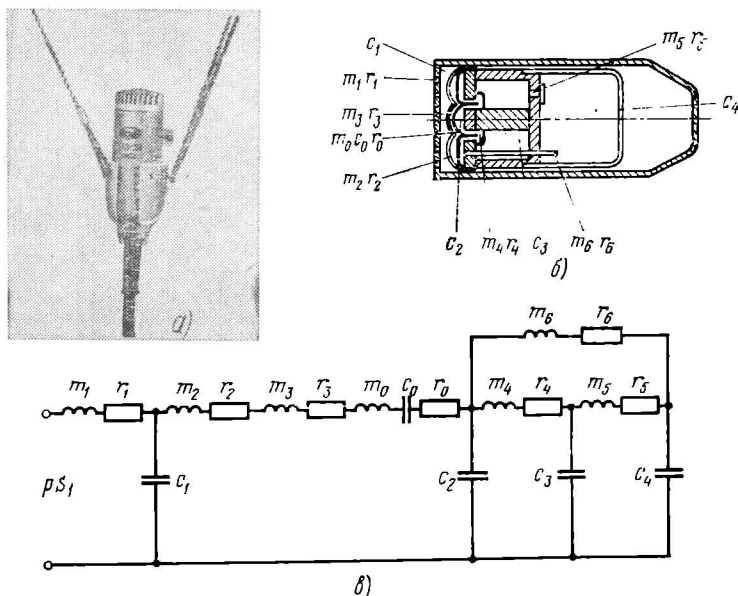


Рис. 5.26. Микрофон МД-63:

а) внешний вид; б) устройство; в) аналоговая электрическая схема микрофона МД-63: m_1 и r_1 , m_2 и r_2 , m_3 и r_3 , m_4 и r_4 , m_5 и r_5 , m_6 и r_6 — массы и активные сопротивления воздуха соответственно в отверстиях решетки, в отверстиях в накладке, в слое между накладкой и диафрагмой, зазоре между катушкой и полюсным наконечником, а также в отверстиях в центрирующем кольце, элементе акустического сопротивления (шелк), в отверстиях в магнитопроводе, в трубке, предназначенной для повышения чувствительности на низких частотах; m_0 , C_0 , r_0 — масса, гибкость закрепления и активное сопротивление подвижной системы; C_1 , C_2 , C_3 и C_4 — гибкости объемов воздуха соответственно между решеткой и накладкой, под диафрагмой, внутри магнитной системы, внутри корпуса; S_1 — площадь отверстий в решетке

Более подробно остановимся на односторонне направленных микрофонах. Большое распространение имеет советский динамический односторонне направленный микрофон МД-52А для профессионального применения. Его внешний вид (а), конструкция (б) и аналоговая электрическая схема (в) изображены на рис. 5.27.

Микрофон имеет те же основные элементы, что и вышеописанный микрофон. Отличием же его является наличие второго входа в виде отверстия в корпусе, находящегося на расстоянии d от первого входа, т. е. от центра диафрагмы. На этом расстоянии получается сдвиг фазы звукового давления, равный $\frac{\omega}{c} d \cos \theta$, где θ — угол между осью микрофона и направлением прихода звука. Масса и активное сопротивление воздуха в этом отверстии вместе с параметрами всех элементов конструкции микрофона от отверстия второго

входа до задней стороны диафрагмы образуют внутреннего фазосдвигающую систему, обеспечивающую получение кардиоидной характеристики направленности. Параметры микрофона приведены в табл. 5.6.

Принципиально такую же конструкцию, как и микрофон МД-52А, имеет микрофон МД-52Б. Отличием лишь является применение для корпуса пластмассы вместо дюралюминия и перенос разъема, расположенного у микрофона МД-52А на корпусе, на конец кабеля, заделываемого в корпусе

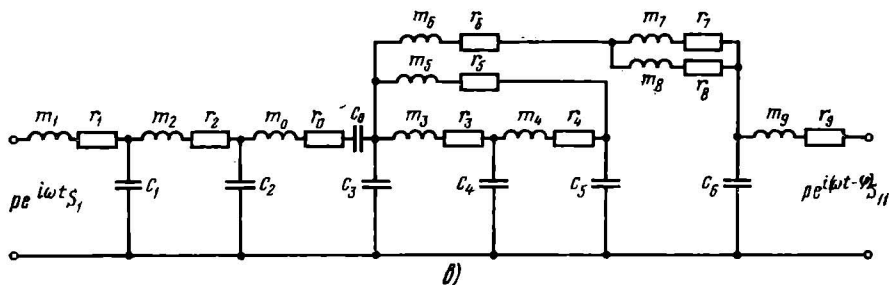
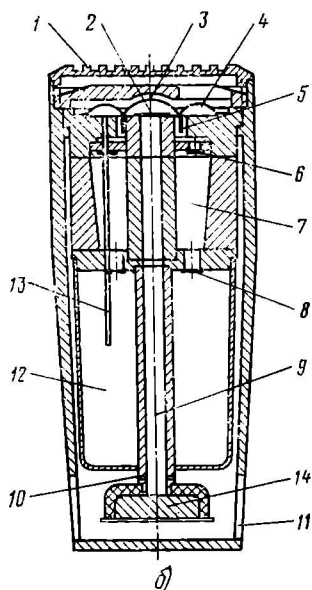
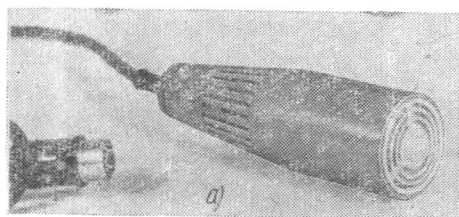


Рис. 5.27. Микрофон МД-52А:

а) внешний вид; б) устройство; в) аналоговая электрическая схема: m_1 и r_1 , m_2 и r_2 , m_3 и r_3 , m_4 и r_4 , m_5 и r_5 , m_6 и r_6 , m_7 и r_7 , m_8 и r_8 , m_9 и r_9 — массы и активные сопротивления воздуха соответственно в решетке 1, слое воздуха между накладкой и диафрагмой 3, в элементе акустического сопротивления (шелке) 6, в элементе акустического сопротивления 8, в элементе акустического сопротивления 14, в отверстиях в трубке 9, в элементе акустического сопротивления 14, в отверстии в корпусе 11; C_1 , C_2 , C_3 , C_4 , C_5 , C_6 — гибкости воздуха соответственно в объеме между решеткой и накладкой, между накладкой и диафрагмой, под диафрагмой, внутри магнитной цепи 7, во внутреннем корпусе 12, между внешним и внутренним корпусами; m_0 , C_0 и r_0 — масса, гибкость закрепления и активное сопротивление подвижной системы; S_1 и S_{11} — площади отверстий соответственно в решетке и в корпусе

микрофона МД-52Б. И то, и другое имеют целью удешевление микрофона.

Для стереофонического приема по системе АВ или ХУ используется микрофон МД-52Б-СН, представляющий собой единую конструкцию из двух микрофонов МД-52Б (рис. 5.28), которая позволяет устанавливать их на расстоянии 0,4 м друг от друга либо совмещать с возможностью разворота осей на угол от 0 до 180°

Аналогичные, но более простые конструкции и соответственно аналоговые электрические схемы имеют микрофон для любительской звукозаписи МД-200 и речевой микрофон МД-66. Их внешние виды, конструкции и электрические

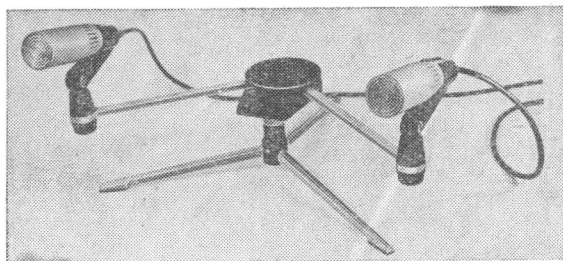


Рис. 5.28. Стереофонический микрофон МД-52Б-СН

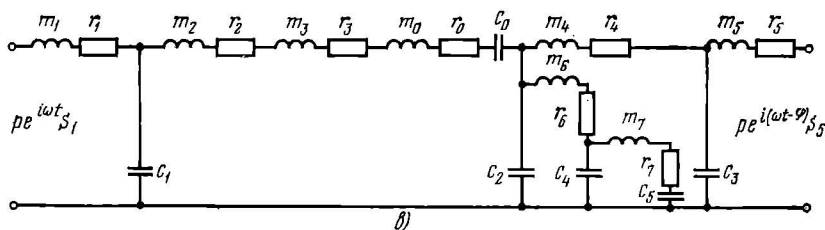
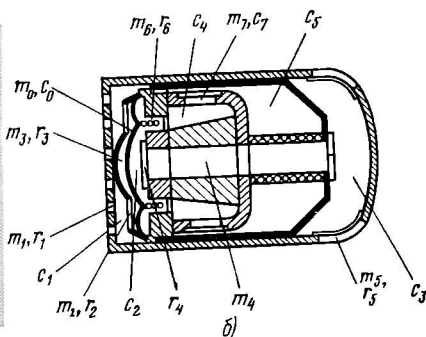
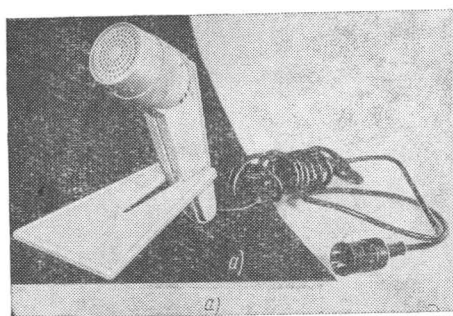


Рис. 5.29. Микрофон МД-200:

а) внешний вид; б) устройство; в) электрическая эквивалентная схема

схемы изображены соответственно на рис. 5.29 и 5.30, а параметры их приведены в табл. 5.6.

Для репортажей и в качестве ручного микрофона используют односторонне направленный микрофон МД-78. Он отличается от вышеописанных односторонне направленных микрофонов тем, что имеет не один второй вход, а два, соответственно находящихся на расстояниях d_1 и d_2 от первого входа, т. е. от центра диафрагмы (рис. 5.31).

На низких частотах разность фаз звуковых давлений, действующих на первый вход и на один из вторых (через отверстие площадью S_2 в корпусе с параметрами m_7 и r_7) определяется сравнительно большим расстоянием d_1 .

На высоких частотах инерционное сопротивление ωm_7 становится очень большим и первый вход «запирается». При этом эффективным становится второй вход, удаленный от первого на сравнительно небольшое расстояние d_2 .

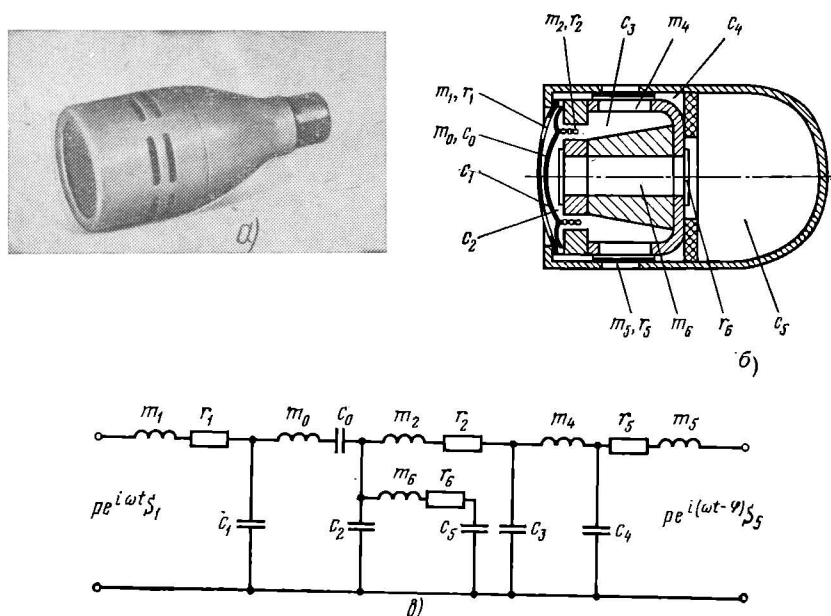


Рис. 5.30. Микрофон МД-66:

а) внешний вид; б) устройство; в) электрическая эквивалентная схема

Второй вход осуществляется через звукопроницаемые стенки, имеющие массу m_8 и активное сопротивление воздуха r_8 , объем воздуха между ними и капсюлем с гибкостью c_4 и отверстие в магнитной системе капсюля с массой и активным сопротивлением m_3 и r_3 .

Разная величина путей d_1 и d_2 для низкочастотных и высокочастотных колебаний и соответственно различные сдвиги фаз для них, получающиеся внутри микрофона, приводят к тому, что для каждого диапазона частот лучше удовлетворяются условия односторонней направленности. Однако, строго говоря, нельзя говорить, что входы d_1 и d_2 действуют каждый только в своем диапазоне частот. Естественно, что практически высокочастотный вход d_2 будет в какой-то степени шунтировать низкочастотный вход d_1 на низких частотах. Это приведет к некоторому спаду частотной характеристики в области низких частот, что не слишком ухудшит режим работы микрофона из-за его близкого расположения от источника звука (ручной, вблизи рта). В результате форма характеристики направленности изменяется с частотой от гиперкардиоиды на низких частотах к кардиоиде на высших. Вместе с тем осевая частотная характеристика этого микрофона сильно зависит от расстояния, на котором микрофон находится от источника.

На рис. 5.31г представлены частотные характеристики микрофона МД-78 для расстояний 10 см от источника (верхняя) и 1 м (нижняя). Пунктирными кривыми ограничена допусковая область.

На рис. 5.31д приведена электрическая схема включения микрофона МД-78, в которой предусмотрены неподвижная антифонная катушка АК, включенная противофазно основной звуковой катушке ЗК, для подавления индуктивных помех и параллельный контур из индуктивности 75 мГн и сопротивления 1,2 кОм, служащий для снижения чувствительности на низких частотах. Включение такого контура бывает полезным при приеме речи, так как устраняется

так называемое «бубнение», повышается разборчивость речи и уменьшается опасность возникновения обратной акустической связи при звукоусилении в помещениях. Микрофон имеет ветрозащиту, а его капсуль виброзащищен.

Основные параметры этого микрофона приведены в табл. 5.6.

Микрофон D-202 фирмы АКГ (Австрия) (рис. 5.32) внешне напоминает микрофон МД-78, однако его принципиальным отличием является применение двух микрофонных капсулей (низкочастотного и высокочастотного), включае-

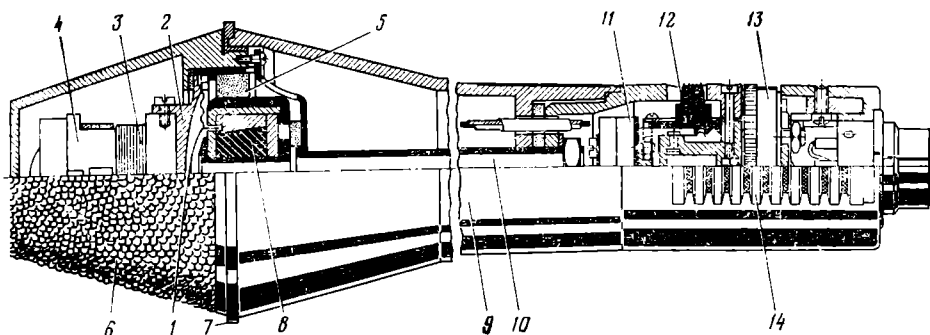


Рис. 5.32. Устройство микрофона Д-202:

1 — диафрагма и катушка низкочастотного капсуля; 2 — защитная крышка и установочная плата высокочастотного капсуля; 3 — антифонная катушка; 4 — высокочастотный капсуль; 5 — амортизация; 6 — крышка из сплавов шариков; 7 — держатель крышки; 8 — низкочастотный капсуль; 9 — корпус; 10 — инерционная трубка; 11 — разделительный фильтр; 12 — выключатель; 13 — корректор низких частот; 14 — задний звуковой вход с противоветровым экраном

мых через электрический разделительный фильтр с частотой раздела 500 Гц. На диафрагмы каждого из капсулей в своей области частот воздействует звуковое давление, падающее на переднюю сторону непосредственно и на заднюю — через отверстия в магнитной цепи. В результате микрофон имеет чрезвычайно протяженную частотную характеристику (30—15 000 Гц), почти совершенно равномерную в диапазоне 50—10 000 Гц, и мало меняющуюся с частотой, по крайней мере до 8000 Гц, направленность.

К особенностям этого микрофона следует отнести применение антифонной катушки, переключателя «включено-выключено», переключателя для получения спада низких частот при приеме речи, фильтра для уменьшения помех ветра. Параметры микрофона приведены в табл. 5.7.

Решение, при котором для расширения частотного диапазона применяются два капсуля — низкочастотный и высокочастотный, хотя и достигает своей цели, как в микрофоне D-202, но имеет и свои недостатки. Они заключаются в том, что звуковое давление воздействует несинфазно на подвижные системы обоих капсулей, вследствие того что последние разнесены пространственно, что существенно влияет на характеристику направленности.

Фирма Зенихайзер предлагает другое решение, применив его в конструкции микрофона МД-441 (рис. 5.33). Как показано на рис. 5.33б, к центральной части куполообразной диафрагмы примыкает с некоторым зазором 2, достаточным для того, чтобы подвижная система могла свободно колебаться, рупор. Последний рассчитан так, чтобы усиливать звуковое давление 1, действующее на купол на частотах, начиная с 7 кГц, и таким образом компенсировать спад частотной характеристики, имеющий место в этой области частот, если не применять рупора. На низких частотах характеристика также достаточно равномерна, поскольку резонанс подвижной системы располагают на частоте ниже 100 Гц. Равномерность характеристики в области средних частот обеспечивает-

ся тщательным взаимным подбором элементов акустико-механической системы, отображенной аналоговой электрической схемой (рис. 5.33а).

Описанная конструкция позволяет получить по данным фирмы неравномерность частотной характеристики, не превышающую 6 дБ в диапазоне 30—

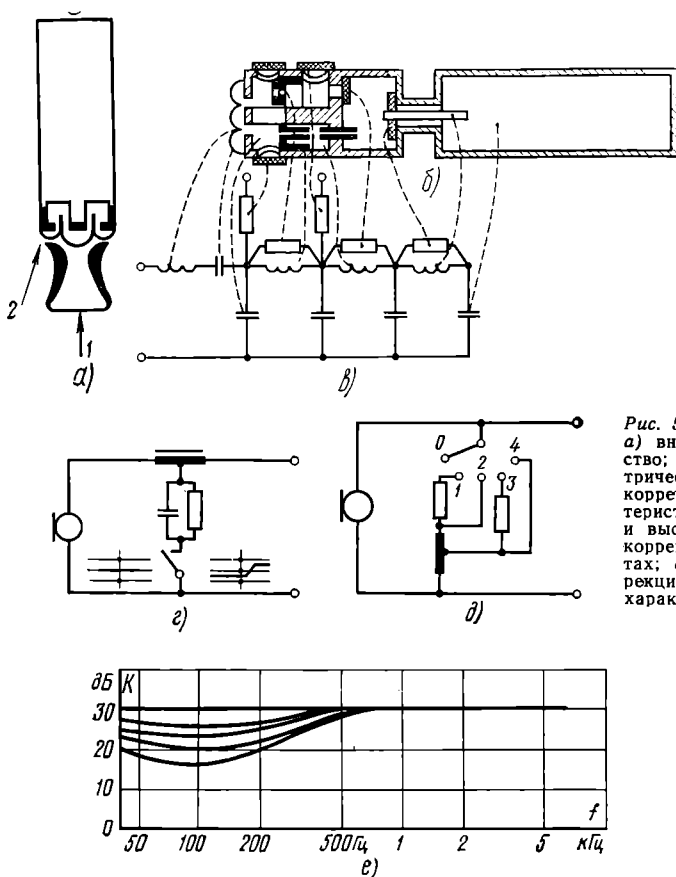


Рис. 5.33. Микрофон МД-441: а) внешний вид; б) устройство; в) аналоговая электрическая схема; г) схема коррекции частотной характеристики в области средних и высоких частот; д) схема коррекции на низких частотах; е) влияние схемы коррекции НЧ на частотную характеристику

20 000 Гц. Фактически неравномерность в диапазоне 50 Гц — 10 кГц достигает 15 дБ. Характеристика направленности имеет в широком диапазоне частот примерно форму гиперкардиоиды.

Из других специфических особенностей микрофона МД-441 имеет смысл отметить, прежде всего, устройства коррекции частотной характеристики в области высоких и низких частот. Задачей коррекции в области высоких частот является подъем частотной характеристики в области выше 5 кГц на 5 дБ, что придает звучанию «блеск» и «прозрачность». Это достигается включением контура по схеме рис. 5.33г. Задачей коррекции в области низких частот является снижение чувствительности с помощью схемы рис. 5.33д. Действие ее при разных положениях переключателя показано на рис. 5.33е. Специальные меры предприняты для предотвращения помех от ветра и дыхания и от вибраций. Первое достигается с помощью нескольких дисков из материала с малым акустическим сопротивлением, размещаемых параллельно друг другу пе-

ред диафрагмой. Защита от вибраций достигается путем всесторонней упругой подвески микрофона.

Параметры микрофона приведены в табл. 5.7.

Примером ленточного односторонне направленного микрофона является микрофон МЛ-19 (рис. 5.34). Даже при тщательном подборе всех параметров аналоговой схемы (рис. 5.34б) микрофона чувствительность его из-за умень-

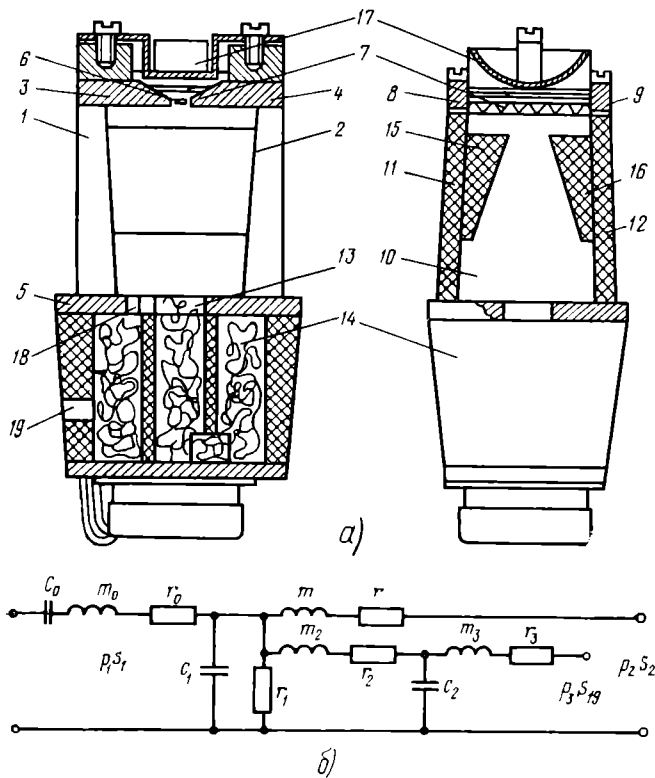


Рис. 5.34. Микрофон МЛ-19:

а) устройство: 1, 2 — постоянные магниты; 3, 4 — полюсные наконечники; 5 — фланец; 6 — гофрированная алюминиевая ленточка длиной 25 мм и толщиной 2 мкм; 7 — экран; 8, 9 — контакты ленточки; 10 — объем воздуха между магнитами; 11, 12 — пластины из звукопроницаемого материала (пенопласт), образующие второй вход площадью S_2 для звукового давления; 13 — отверстие во фланце 5; 14 — лабиринт, заполненный звукопоглощающим материалом; 15, 16 — накладки; 17 — скоба, корректирующая частотную характеристику; 18 — отверстие во фланце, соединяющее объем 10 с 19 — отверстием в корпусе площадью S_3 через объем между ними; б) аналоговая электрическая схема; C_0 , m_0 и r_0 — гибкость, масса и активное сопротивление ленточки; m , r — масса и активное сопротивление второго входа; C_1 , r_1 — гибкость и активное сопротивление воздуха в лабиринте; m_2 , r_2 — масса и активное сопротивление отверстия 18; C_2 — гибкость воздуха в отсеке лабиринта; m_3 , r_3 — масса и активное сопротивление отверстия 19

шения эффективной площади ленточки спадает к высоким частотам. Для компенсации этого перед ленточкой устанавливается дугообразная корректирующая скоба. Здесь на высоких частотах устанавливаются стоячие волны, длина которых меняется в соответствии с изменением расстояния между ленточкой и разными частями скобы.

Параметры микрофонов МЛ-19 приведены в табл. 5.6.

Конденсаторный микрофон

Конденсаторные микрофоны, в частности односторонне направленные, в настоящее время получили особо большое распространение, ненаправленные используются в основном для акустических измерений.

Устройство капсюля советского измерительного микрофона МК-16 представлено на рис. 5.35а. Капсюль конструктивно объединен с микрофонным усилителем, схема которого изображена на рис. 5.35б. Усилитель выполнен в

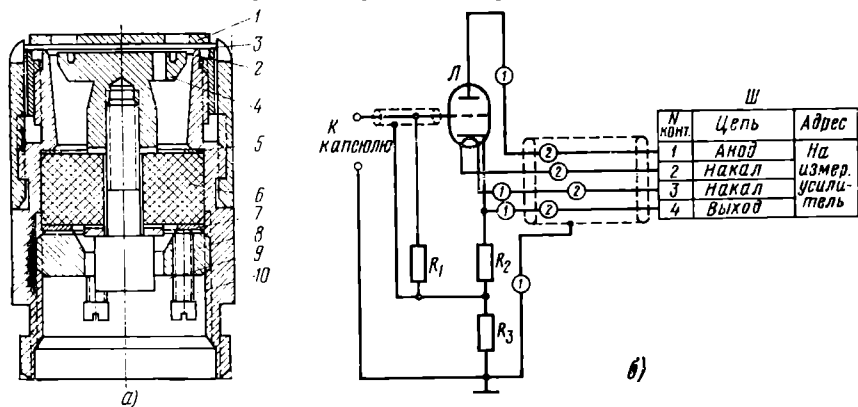


Рис. 5.35. Микрофон МК-16:

а) устройство капсюля: 1 — крышка; 2 — регулятор натяжения мембраны; 3 — никелевая мембрана толщиной 3 мкм; 4 — неподвижный электрод, имеющий ряд сквозных и глухих отверстий; 5 — прокладка; 6 — кварцевый изолятор; 7 — прокладка; 8 — гайка; 9 — винт для перемещения неподвижного электрода; 10 — крепежный винт; б) схема устройства к микрофону: лампа—типа 6С34А; R_1 , R_2 , R_3 — сопротивления 510 кОм, 1,2 кОм и 100 кОм

виде цилиндра, заканчивающегося с одной стороны разъемом для подсоединения к кабелю, идущему к блоку питания, а с другой — штырем для соединения с капсюлем. Для обеспечения напряжений анода (200 ± 10 В при токе $1,5 \pm 0,3$ мА) и накала ($6 \pm 0,3$ В при токе 127 ± 13 мА) предварительного усилителя в комплект микрофона МК-16 входит блок питания. Основные параметры микрофона приведены в табл. 5.6.

Что касается дополнительных параметров, существенных для измерительных целей, то они имеют следующие величины. Суммарный коэффициент гармонических искажений на частоте 400 Гц при уровне звукового давления 154 дБ — не более 6%. Уровень эквивалентного звукового давления, вызываемого собственным шумом электрического происхождения в любой активной полосе частотного диапазона, — не выше 46 дБ. Частота, при которой характеристика направленности в пределах угла $\pm 90^\circ$ от оси, отличается от круговой не более чем на 1 дБ — 3150 Гц. Нестабильность уровней чувствительности при нормальных условиях — не более $\pm 0,5$ дБ. Температурная поправка — не более 0,05 дБ/°С. Изменение уровня чувствительности при изменении атмосферного давления — не более ± 1 дБ/ 10^4 Па. Изменение уровня чувствительности при изменении относительной влажности от наименьшей до наибольшей — не более 0,5 дБ. Изменение уровня чувствительности при изменении напряжения питания на $\pm 10\%$ — не более $\pm 0,3$ дБ. Эквивалентный объем капсюля микрофона при атмосферном давлении 10^5 Па — не более $2 \cdot 10^{-6}$ м³.

Большое число типов измерительных микрофонов выпускает датская фирма «Брюэль и Кьер». Из них наиболее употребительны типы 4145 (диаметр 23,77 мм, диапазон 2,6—18 500 Гц) и 4133 (диаметр 12,7 мм, диапазон 3,9—40 000 Гц). Неравномерность их частотной характеристики в номинальном диа-

пазоне не превышает ± 2 дБ. Микрофоны обладают высокой степенью стабильности. Устройство обоих типов аналогично и изображено на рис. 5.36. Мембрана микрофона изготовлена из чистого никеля, а остальные детали — из сплава

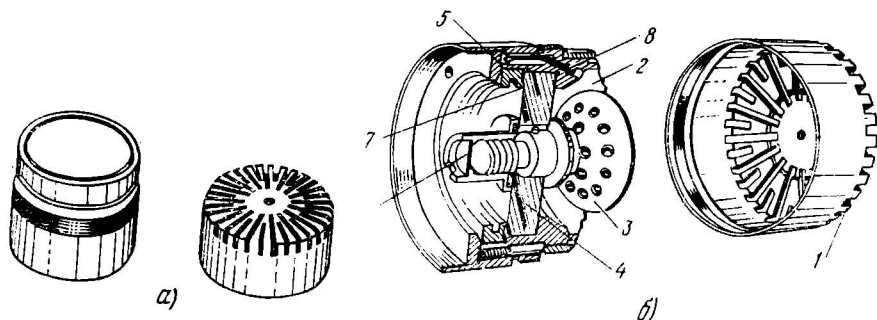


Рис. 5.36. Измерительный микрофон фирмы Брюэль и Кьер:

а) внешний вид; б) устройство: 1 — защитная решетка; 2 — мембрана; 3 — неподвижный электрод; 4 — кварцевый изолятор; 5 — капиллярная трубка для выравнивания давления; 6 — золоченый выходной зажим; 7 — пружина; 8 — серебряная проволока устройства выравнивания

с высоким содержанием никеля. Это обеспечивает высокую температурную стабильность микрофона.

Примером односторонне направленных микрофонов профессионального применения является отечественный микрофон МК-13М (рис. 5.37). Схематический поперечный разрез двухмембранного капсюля этого микрофона представлен на рис. 5.37б.

От этого микрофона, как уже объяснялось в § 5.4, можно получить большой набор характеристик направленности путем дистанционного электрическо-

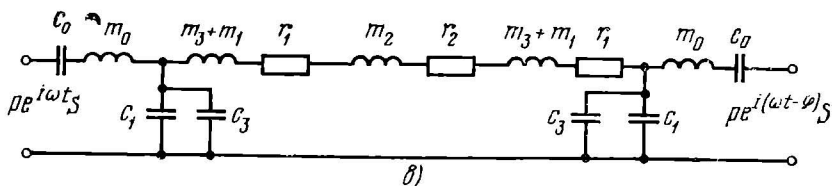
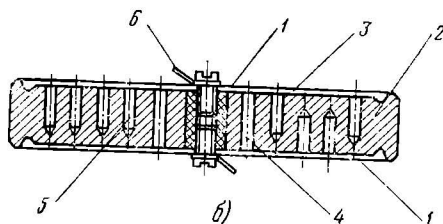
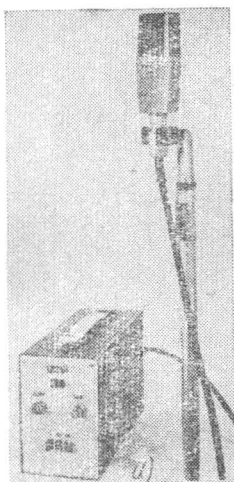


Рис. 5.37. Микрофон МК-13М:

а) внешний вид; б) устройство его капсюля: 1 — мембраны диаметром 30 мм, прижатые к изоляционной втулке в неподвижном электроде 2, имеющем сквозные 4 и глухие 5 отверстия; 3 — зазор между мембраной и неподвижным электродом; 6 — контактный лепесток; в) аналоговая электрическая схема: c_0 , m_0 — гибкость и масса каждой из мембран; m_1 , c_1 и r_1 — масса, гибкость и активное сопротивление воздуха в зазорах 3; m_2 , r_2 — масса и активное сопротивление в сквозных отверстиях 4; m_3 , c_3 — масса и гибкость воздуха в глухих отверстиях 5; S — действующая площадь мембран

го включения какой-либо одной мембраны или их обеих синфазно или противофазно.

Аналоговая электрическая схема капсюля представлена на рис. 5.37а. В ней сила $F = pS$ создается звуковым давлением p , действующим на поверхность диафрагмы с эффективной площадью S .

Микрофон МК-13М обладает равномерной частотной характеристикой и путем упомянутого выше переключения напряжения поляризации может оперативно иметь одну из следующих характеристик направленности: окружность, восьмерка (косинусоида), кардиоида, обращенная в одну сторону, и кардиоида, обращенная в противоположную сторону. Параметры микрофона приведены в табл. 5.6.

Наряду с обычными конденсаторными микрофонами в последние годы стали довольно широко выпускаться электретные микрофоны, имеющие то преимущество, что они работают без напряжения поляризации, а электрическое поле между электродами образуется у них из-за стабильного электрического заряда на одном из электродов, являющегося таким образом электретом. К числу таких микрофонов относится односторонне направленный микрофон МКЭ-2, выпускаемый советской промышленностью. Разрез капсюля этого микрофона представлен на рис. 5.38а. У него звуковое давление p может воздей-

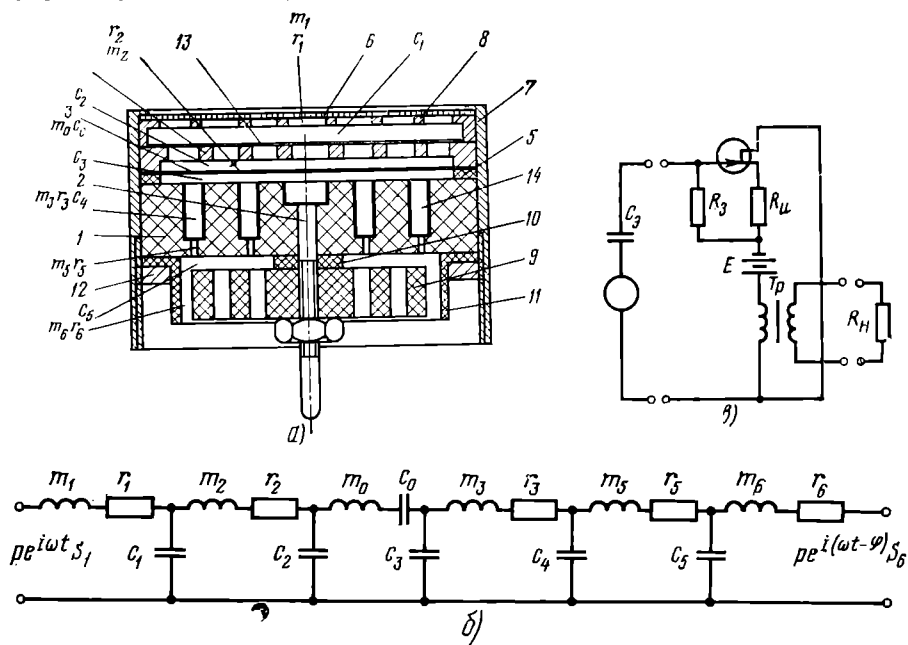


Рис. 5.38. Капсюль микрофона МКЭ-2:

а) устройство: 1 — неподвижный электрод из пластмассы с сеткой из взаимно перпендикулярных прорезей; 2 — неподвижный электрод из пластмассы с сеткой из взаимно перпендикулярных прорезей; 3 — мембрана из электретной пленки ФТ-14 толщиной 10 мкм, приклеенная клеем к торцам контактной решетки; 4 — прокладка толщиной 30 мкм, фиксирующая зазор; 5 — защитная сетка; 6 — контактный штырь; 7 — корпус; 8 — решетка; 9 — вкладка; 10 — прокладка; 11 — втулка; 12 — кольцо; 13 — акустическое сопротивление; 14 — каналы в неподвижном электроде; б) аналоговая электрическая схема; в) схема усилителя к микрофону

ствовать как на переднюю сторону мембраны через решетку, так и на заднюю — через щель площадью S_6 между вкладкой 9 и втулкой 11 и отверстия 14 в неподвижном электроде.

Выводами капсуля являются корпус, соединенный с мембраной, и неподвижный электрод через контактный штырь.

На рис. 5.38б представлена аналоговая электрическая схема капсуля. На рис. 5.38а приведена схема предварительного усилителя, размещающегося в одном корпусе с капсулем микрофона. Основные параметры микрофона приведены в табл. 5.6.

Из других типов микрофонов следует упомянуть о пьезоэлектрических. В СССР такие микрофоны выпускаются только для комплектации слуховых аппаратов: прямоугольной формы — для аппаратов «Слух» и «Кристалл» ($22,5 \times 16 \times 6$ мм) и круглые — для аппарата «Звук» ($\varnothing 35 \times 6$ мм). Масса их — около 10—12 г.

Принцип устройства этих микрофонов заключается в том, что тонкая дюралюминиевая диафрагма соединена механически с биморфным пьезоэлементом. При колебаниях диафрагмы на обкладках пьезоэлемента возбуждается ЭДС. Емкость пьезоэлемента составляет 500—1500 пФ. Чувствительность этих микрофонов довольно большая — от 50 до 100 мВ/Па, а частотный диапазон узкий — 100—5000 Гц.

Однако пьезомикрофоны имеют большой разброс от экземпляра к экземпляру и недостаточно удовлетворительную эксплуатационную надежность (хрупки, подвержены действию влажности и температуры, которая не должна превышать 45°C).

Остронаправленный микрофон

Отечественный остронаправленный микрофон МД-74 состоит из собственно микрофона динамического типа и примыкающей к нему трубки длиной 0,8 м (рис. 5.39а). Вдоль трубки (см. рис. 5.39б) в ее стенке проделан через равные промежутки ряд отверстий. Для компенсации падения чувствительности микро-

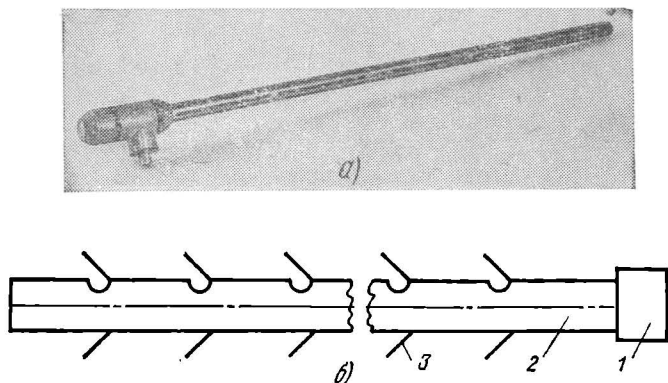


Рис. 5.39. Микрофон МД-74:
а) внешний вид; б) устройство: 1 — собственно микрофон; 2 — трубка; 3 — концентратор-рупор

фона на высших частотах из-за большого поглощения их в трубке вокруг каждого из отверстий устанавливаются концентраторы — рупорки. Размеры их подобраны так, чтобы обеспечить подъем частотной характеристики на высших частотах диапазона до 10—12 дБ.

Основные параметры микрофона приведены в табл. 5.6.

Остронаправленный микрофон МКЕ 802N фирмы Зеннхайзер (ФРГ) состоит из электретного односторонне направленного микрофона и примыкающей

к ней трубы. Эта труба имеет отверстия, по своей длине закрытые звукопоглощающим материалом, поглощение которого мало в начале, у входа трубы, и нарастает к ее концу, примыкающему к микрофону. На низких частотах, где длина трубы мала по сравнению с длиной волны, она почти не действует. Но микрофон рассчитан так, что именно в этой области частот его чувствительность наибольшая. На тех же частотах, где длина трубы сравнима с длиной волны, действие трубы проявляется в том, что увеличивается чувствительность и обостряется направленность микрофона.

Характеристики направленности микрофона на разных частотах представлены на рис. 5.40. Его остальные параметры приведены в табл. 5.7.

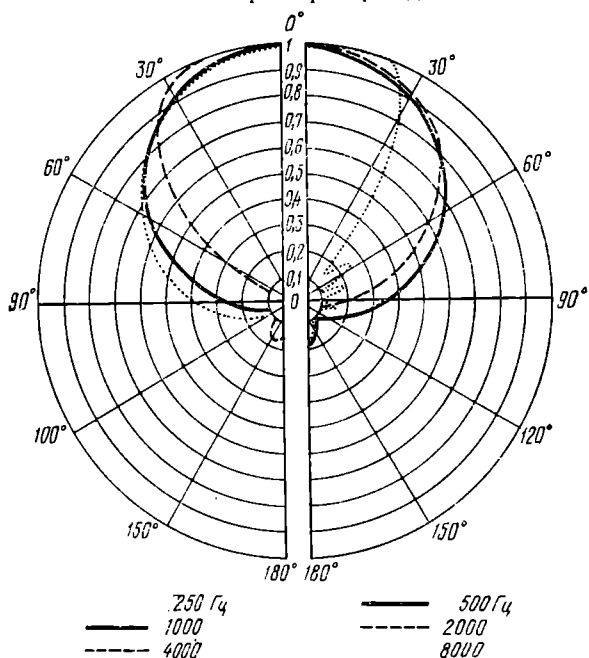


Рис. 5.40. Характеристика направленности микрофона МКЕ 802

Обращают на себя внимание довольно высокая чувствительность и малая неравномерность частотной характеристики.

Следует отметить еще, что благодаря наличию поглощающего материала микрофон сравнительно малочувствителен к помехам ветра и дыхания.

Радиомикрофон

В практике звукоусиления довольно большое распространение получили радиомикрофоны. Их преимущество перед обычными микрофонами в том, что при работе с ними исполнитель (оратор, певец и т. п.) не связан при своем перемещении по эстраде или сцене микрофонным кабелем. Применяя радиомикрофон, исполнитель может свободно перемещаться, так как микрофон, который исполнитель держит в руке или прикрепляет к одежде, снабжен миниатюрным радиопередатчиком, работающим на находящийся поблизости (например, в помещении аппаратной) радиоприемник, выходное напряжение которого уже используется обычным образом.

Т А Б Л И Ц А 5.6

Параметры основных типов отечественных микрофонов

Тип микрофона	Номинальный диапазон частот, Гц	Неравномерность частотной характеристики, дБ	Внутреннее сопротивление, Ом	Чувствительность на частоте 1000 Гц, мВ/Па	Средняя (минимальная) чувствительность, дБ	Направленные свойства	Внешние размеры	Масса, кг	Основное назначение
1	2	3	4	5	6	7	8	9	10
Электродинамические									
МД-52А	50—16 000	12	250	1,2	12 (6)	Односторонне направленный	$\varnothing 32 \times 120$	0,20 с (кабелем)	Универсальный
МД-52Б	50—15 000	12	250	1,2	12 (6)	То же	$\varnothing 32 \times 114$	0,170	Для любительской звукозаписи
МД-52Б-СН	50—15 000	12	250	1,2	12 (6)	— » —	$325 \times 270 \times 190$	0,170	Стереофонический
МД-63	60—15 000	20	250	1,1	—	Ненаправленный	$\varnothing 22 \times 68$	0,125	Нагрузочный или личный
МД-63Р	60—15 000	20	250	1,1	—	— » —	$\varnothing 22 \times 68$	0,050	Для радиомикрофонов
МД-66	100—10 000	20	250	2,0	12 (6)	Односторонне направленный	$\varnothing 37 \times 92$	0,150	Речевой для звукоусиления и диспетчерской связи
МД-71	50—15 000	8	250	1,5	—	Ненаправленный	$\varnothing 33 \times 116$	0,170	Акустические измерения

Параметры угловых и электромагнитных микрофонов приведены в тексте.

Окончание табл. 5.6

1	2	3	4	5	6	7	8	9	10
МД-78	50—15 000	20 (на 1м); 8 (на 0,1 м)	150	2,0	12 (6)	Односторонне направ- ленный	Ø52×180	0,320	Для солистов эстра- ды, ручной с аморти- зированным капсюлем
МД-200	100—10 000	12	250	1,5	12 (6)	То же	Ø35×115	0,150	Для любителей зву- козаписи
МД-201	100—10 000	12	250	1,5	—	Ненаправленный	55×31,5×41	0,100	То же
82А-5ММ	50—10 000	10	250	4,0	18 (9)	Односторонне направ- ленный	Ø44×135	0,350	Универсальный для тональте, в киносту- диях и на натуре для приема на фоне шу- мов
МД-74	50—10 000 10—10 000	20 8	250	1,2		Остроуправленный (индекс направленно- сти выше 125 Гц — не менее 6 дБ)	Ø71×810	0,500	Для приема на фоне шумов, репортажа
Ленточные									
МЛ-19	50—16 000	14	250	2	15	Односторонне направ- ленный	140×46×41	0,55	Универсальный сту- дийный
МЛ-51	40—16 000	10	250	1,6	—	Двусторонне направ- ленный (косинусоида)	Ø52×180	0,60	Универсальный сту- дийный с усилителем, напряжение питания которого 1,2 В
Конденсаторные и электретные									
МК-6	20—40 000	5	250	1,1	—	Ненаправленный	Ø55×95	0,050 без ка- бели и питаю- щего устрой- ства	Акустические измере- ния

Продолжение табл. 5.6

1	2	3	4	5	6	7	8	9	10
МК-16	20—40 000	5	250	2,0	—	— → —	Ø13×129	0,140	То же
МК-12	50—15 000	9	600	11 (на нагрузке)	20 (10)	Односторонне направленный	Ø22×142	0,115	Для передачи и записи музыки и речи
МК-13М	30—18 000	6 (в режиме кардиоида в диапазоне 50—15 000 Гц)	600	5,5 (на нагрузке 600 Ом)	12 (10)	Односторонне направленный, двусторонне направленный, ненаправленный	46×22×98	0,160	С дистанционным выбором характеристики направленности. Для передачи и записи музыки и речи
МК-15	50—15 000	12	600	5,5 (на нагрузке 600 Ом)	10 (фронт-90°)	Односторонне направленный в вертикальной плоскости, ненаправленный в горизонтальной	58×58×70	0,210	Для передачи и записи музыки и речи
МКЭ-2 (электретный)	50—15 000	15	200	1,5	15	Односторонне направленный	Ø21×146	0,120	Для комплектации микрофонов: переносных I кл. и стационарных II кл.
МКЭ-3 (электретный)	50—15 000	10	2000	3,5	—	Ненаправленный	Ø14×22	0,008	Для встраивания микрофонов
МКЭ-6	50—16 000	18	250	3,5	18	Односторонне направленный	Ø48×195	0,140	Для солистов эстрады ручной с амортизированным корпусом
19 А 31	20—20 000	8	80	20	—	Ненаправленный	44×25×190	0,300	Для использования в кинематографии

Окончание табл. 3.6

1	2	3	4	5	6	7	8	9	10
19 А 31	20—20 000	8	80	22	—	Односторонне направ- ленный	44×25×190	0,300	Для использования в кинематографии
19 А 31	20—20 000	8	80	25	—	Двусторонне направ- ленный	44×25×190	0,300	—> —
КМС-19-01 (малогаба- ритный)	20—20 000	8	80	16,0	—	Односторонне направ- ленный	Ø21×158	0,110	—> —
КМС-19-02	20—20 000	8	80	20,0	—	То же	Ø39×188	0,200	—> —
КМС-19-03 (всплощаци- онный)	20—20 000	8	80	20,0	—	—> —	Ø57×198	0,240	—> —
КМС-19-04 «музыкаль- ный»	20—20 000	8	80	20,0	—	—> —	Ø47×190	—	—
КМС-19-05	20—20 000	8	80	45,0	—	Остронаправленный	Ø24×850	0,280	—> —
КМС-19-07	20—20 000	8	80	9,0	—	Ненаправленный	Ø21×158	0,110	—> —
КМС-19-08	20—20 000	8	80	10,0	—	Двусторонне направ- ленный	Ø24×203	0,190	—> —
КМС-19-09	20—20 000	8	30	30,0	—	Односторонне направ- ленный (угол рас- крытия 115° при спа- де на 6 дБ)	—	—	—
КМХЭ-1 (электропный)	20—20 000	8	80	17,0	—	Односторонне направ- ленный	Ø32/23×194	0,250	—> —

Т А Б Л И Ц А 5.7
Основные параметры некоторых типов зарубежных микрофонов

Тип микрофона	Фирма и страна	Номинальный диапазон частот, Гц	Неравномерность частотной характеристики, дБ	Внутреннее сопротивление, Ом	Чувствительность на частоте 1000 Гц при холостом ходе, мВ/Па	Сопротивление на г-ружки, Ом	Разность чувствительностей между фронтальным и минимальным		Направленные свойства	Внешние размеры, мм	Масса, кг	Основное назначение и особенности
							средняя	минимальная				
1	2	3	4	5	6	7	8	9	10	11	12	13
Электродинамические микрофоны												
Д-17	АКГ (Австрия)	15—14 000	20	200	2,0	1 000	18	8	Односторонне направленный	Ø43,5×106	0,300	Студийный, речевой
Д-19		30—16 000	18±3,5	60/200	1,0/1,8	150/400	15	10	То же	Ø38×152	0,160	То же
Д-20 В		30—18 000	14±2,5	60/200	0,9/1,6	300/1000	18	14	— »	190×74×54	0,630	Универсальный
Д-25 В		30—18 000	11±2,5	60/200	0,9/1,6	300/1000	18	14	— »	202×155×75	0,850	Для трансляции, с амортизированным подвесом
Д-24		30—20 000	18±2,5	60/200	1,0/1,8	150/500	20	10	— »	Ø40×156	0,180	Студийный
Д-30		30—16 000	12	75/150	1,2	—	20	—	— »	260×87×63	1,000	Универсальный
									Неправленный, двусторонне направленный	Неправленный		

Продолжение табл. 5.7

1	2	3	4	5	6	7	8	9	10	11	12	13
Д-36		30—16 000	12	75;150; 500	1,2	—	20	—	Универсальный	212×87×63	0,950	То же, но регулировка направленности и НЧ корректор вынесены в отдельный блок, имеется восемь различных характеристик направленности
Д-45		30—16 000	12	75;150; 500	1,2	—	20	—	—	200×150×88	1,200	Для трансляций, с амортизированным подвесом
Д-200		30—17 000	8±2,5	250	1,4	500	—	10	Односторонне направленный	Ø40×185	0,300	Универсальный (двухполюсный)
Д-202		20—18 000	7±2,5	200	1,8	500	20	—	То же	Ø51×210	0,300	То же
Д-224		20—20 000	5±2	250	1,3	500	—	14	—	Ø25×195	0,280	То же, но с корректором низших частот
Д-501	АКС (Ав- стрия)	50—15 000	22±3,5	200	2,2	400	—	6	—	Ø55×175	0,340	Репортажный, с выключателем на корпусе
Д-503		50—15 000	22±3,5	200	2,2	400	—	6	Односторонне направленный	Ø55×115	0,440	Репортажный, с гибким креплением типа «гусиная шея»
Д-505		50—15 000	30±3,5	200	2	300	—	12	То же	Ø55×175	0,340	То же, специальный для работы с близкого расстояния от источника звука
Д-507		50—15 000	30±3,5	200	2	300	—	12	—	Ø55×115	0,440	То же, что и Д-505, но с гибким креплением типа «гусиная шея»
Д-66		50—15 000	22±4	200	2,2	400	—	10	—	45×75×120	0,290	Для стереофонической записи по системам MS и XY
Д-77 А		80—13 000	15±3,5	200	2,2	—	13	5	—	Ø58×138	0,410	Для работы по системе АВ (капсюли могут разъединяться)

Продолжение табл. 5.7

1	2	3	4	5	6	7	8	9	10	11	12	13
МД-7	ЕАС (Венг- рия)	100—10 000	—	300	1,5	—	—	—	—	38×53×77	0,220	Для любительских магнито- фонов, с выходным транс- форматором
МД-14		100—15 000	—	200	1,5	—	13,5	—	—	Ø49×60	0,110	Репортажный, речевой
МД-21		80—15 000	—	200	1,5	—	15	—	—	Ø47×200	0,150	Универсальный
МД-44	Зенит- кайзер (ФРГ)	30—20 000	8 ± 1,5	200	2,0	—	—	—	—	257×33×36	0,450	Студийный

Конденсаторные микрофоны

С-12 А	АКГ (Ав- стрия)	10—20 000		200/50	4	500/150	25	10	Три основных и шесть промежу- точных	40×40×195	0,190	То же, переключатель ха- рактеристик направленности находится на блоке питания
С-28 С		30—18 000	7 ± 2,5	200/50	13	500/150	20	10	Односторонне направленный	Ø26×174	0,220	Для трансляций, капсюль можно заменить ненаправ- ленным (НН), при этом чув- ствительность равна 10 мВ/Па
С-29 С		30—18 000	7 ± 2,5	200/50	12	500/150	20	10	Односторонне направленный	Ø26×174	—	То же, что и С-28С, но кап- сюль с удлиненной трубкой 33 или 100 см
С-30 С		30—18 000	7 ± 2,5	200/50	10	500/150	20	10	То же	Ø26×174	—	
С-60		30—18 000	7 ± 2,5	200/50	8	500/150	20	10	—	Ø18×100	0,065	Студийный, также может применяться ненаправлен- ный капсюль (НН)

Продолжение табл. 5.7

1	2	3	4	5	6	7	8	9	10	11	12	13
М-269С		30—16 000	7	200/50	10/15,5	1000/250	20	8	Односторонне ненаправленный, двусторонне на- правленный	Ø21×152	0,125	То же, переключатель на- правленности находится на корпусе
КМ-63(64)		40—18 000	—	200/50	9	—	—	—	Односторонне ненаправленный	Ø21×124	0,120	То же, есть переключатель для понижения чувствитель- ности на 10 дБ
КМ-66	Ной- ман (ФРГ)	40—18 000	—	200/50	10	—	—	—	Односторонне и двусторонне направленный	Ø48×175	0,210	То же, переключатель на- правленности находится на корпусе
У-47		35—15 000	8	200/50	25 14	—	—	—	Односторонне ненаправленный	Ø63×240	0,700	Студийный
У-48		35—15 000	8	200/50	20	—	—	—	Односторонне и двусторонне направленный	Ø63×240	0,700	—> —
У-64		40—18 000	—	200/50	11	—	—	—	Односторонне направленный	Ø21×124	0,120	Студийный, есть переключа- тель для понижения чувст- вительности на 10 дБ
У-67		30—16 000	5 8	200/50	22 13	—	—	10 —	То же Ненаправленный	Ø56×201	0,540	Студийный
МКЕ-802	Зени- хайзер (ФРГ)	50—15 000 7±1,5	12	200	13 5	— >300	—	—	Двусторонне направленный, суперкардиоида	Ø22×292	0,185	Любительская запись звука
4145	Брю- эль и Кьер (Да- ния)	3—18 000	4	—	50	—	—	—	Ненаправленный	Ø24×19		Измерительный калсоль
4133		4,5—40 000	4	—	12,5	—	—	—	—> —	Ø13×13		То же
4135		4,5—100 000	4	—	4	—	—	—	—> —	Ø7×10,5		—> —

Окончание табл. 5.7

1	2	3	4	5	6	7	8	9	10	11	12	13
Конденсаторные стереофонические микрофоны												
SM-21C	Ной- ман (ФРГ)	40—15 000	—	200/50	10	—	—	—	Односторонне и двусторонне направленный, ненаправленный	Ø28x200	0,500	
SM-69		40—15 000	—	200/50	15	—	—	—	Односторонне и двусторонне направленный, ненаправленный	Ø28x200	0,500	Студийные, переключатель характеристик направленности находится на блоке пита- ния. Верхний корпус по- ворачивается относительно нижнего на 270°. Переход- ное затухание 45 дБ; SM-23C может работать с питанием от батарей
SM-69		30—20 000	—	200/50	15	—	—	—	Односторонне и двусторонне направленный, ненаправленный	Ø48x254	0,450	
C-24		30—20 000	15±2,5	200/50	10	—	20	10	Односторонне и двусторонне направленный, ненаправленный	Ø43x255	0,650	

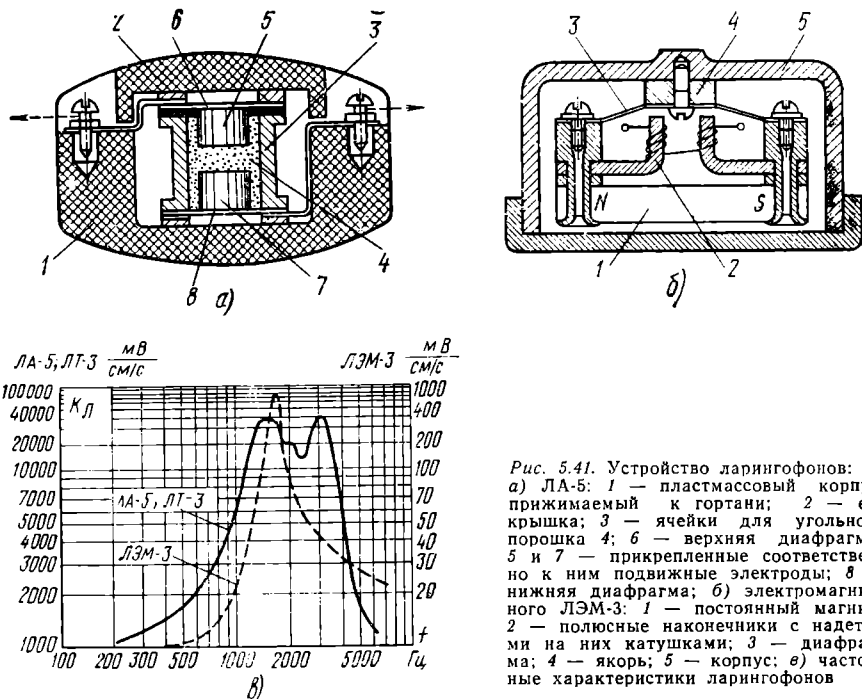
Опишем для примера выпускаемый промышленностью радиомикрофон РМ-7. В его комплект входит носимый передатчик размером $130 \times 99 \times 28$ мм³, массой 330 г с микрофоном МД63Р или МКЭ-2. Микрофоны МД-63Р имеют приспособление для крепления к одежде исполнителя. Антенной передатчика является гибкий провод длиной 1 м. Питание передатчика осуществляется от батареи аккумуляторов 7Д-0,1. Потребление тока — не более 28 мА. Время непрерывной работы — не менее 4 ч. Выходная мощность передатчика — не менее 10 мВт, что обеспечивает дальность действия в свободном пространстве не менее 50 м при отношении сигнал/шум на выходе приемника не менее 40 дБ. Рабочая частота передатчика и приемника 58 или 59 МГц. Приемник имеет габариты $103 \times 275 \times 212$ мм³ и массу 3,2 кг. Он может питаться от сети переменного тока через специальный блок питания или от батареи элементов типа 343 с напряжением 12,8 В. Время непрерывной работы от этой батареи — не менее 18 ч. Выходное напряжение приемника на нагрузке 240 Ом при девиации частоты ± 50 кГц не менее 10 мВ.

В комплект приемника входит контрольный телефон ТА-56М.

Ларингофоны

Угольный ларингофон ЛА-5 представлен на рис. 5.41а.

При разговоре колебания от мышц гортани передаются корпусу ларингофона. Вследствие инерции электродов они начинают перемещаться относительно



но корпуса. Причем из-за различной массы электродов и различной упругости диафрагм эти перемещения несинфазны. В результате порошок между электродами деформируется и на контактах ларингофона возникает напряжение звуковой частоты. Применение электродов с различными массами и диафрагм с

различными упругостями приводит к тому, что каждая из этих колебательных систем имеет различные значения резонансной частоты, что расширяет диапазон передаваемых частот и улучшает равномерность частотной характеристики чувствительности. Под последней в данном случае понимается отношение развиваемого напряжения к колебательной скорости корпуса (мВ/см/с или В/м/с).

Ларингофон ЛА-5 имеет сопротивление 165 Ом и работает при напряжении питания 3 В.

Электромагнитный ларингофон представлен на рис. 5.41б.

При разговоре колебания от мышц гортани передаются корпусу. Благодаря инерции магнитной системы она начинает перемещаться при этом относительно якоря, что изменяет магнитный поток проникающей катушки, вследствие чего на зажимах последних развивается напряжение звуковой частоты. Частотные характеристики ларингофонов приведены на рис. 5.41а.

Практически все ларингофоны используются попарно, будучи прижаты к горлу с двух сторон его. Электрически при этом они соединяются последовательно.

5.7. ЭКСПЛУАТАЦИЯ МИКРОФОНОВ

Хранение, проверка и подготовка к работе

В хорошо организованных хозяйствах на каждый микрофон ведется карточка учета (см. приложение 1) и эксплуатационный паспорт (приложение 2), в который вносятся результаты периодических испытаний, замеченные неисправности, меры, предпринятые к их устранению, и их результаты. Периодические испытания микрофонов заключаются в том, что раз в год (лучше раз в полгода) определяются характеристики микрофона (их бланки вкладываются в паспорт) и сравниваются с указанными в его паспорте. В случае существенного расхождения (больше 2—3 дБ) микрофон должен быть снят с эксплуатации и отправлен в ремонт.

Как правило, основной причиной ухудшения работы микрофона или вообще выхода его из строя является нарушение электрических контактов, большей частью в разъеме или во встроенных усилителях конденсаторных и электретных микрофонов. Ремонт, связанный с этими причинами, возможен лишь при наличии квалифицированного персонала, имеющего опыт работы с радиоэлектронными схемами. Устранение же механических повреждений подвижной системы силами эксплуатирующих организаций производить не рекомендуется, так как полноценно это может быть выполнено лишь в заводских условиях. Общая надежность микрофонов характеризуется величиной наработки на отказ, которая нормируется в технических условиях данного типа. Она составляет, например, для динамических микрофонов не менее 5000 ч средней наработки на отказ.

Если в данной организации практикуется во всех или в некоторых записях или передачах одновременное использование нескольких микрофонов в одном электрическом тракте, то необходимы предварительное определение и обозначение их полярности. Это требуется во избежание возможности их включения в противофазе, что приводит к полной или частичной компенсации выходных напряжений микрофонов.

Полярность микрофонов проще всего определяют следующим образом. Какой-то микрофон выбирается за опорный. Желательно, чтобы его чувствительность была средней по отношению к чувствительности всех других микрофонов. Этот микрофон включают на вход звукоусилительного тракта, на выходе которого включен какой-либо индикатор (стрелочный, осциллограф и т. п.). Далее последовательно, один за другим, устанавливают как можно ближе к опорному все остальные микрофоны парка и включают также один за другим на другой микрофонный вход тракта. Следует следить за одинаковым включением их разъемов. Затем при каком-либо звуке перед парой микрофонов (на-

Подготовка микрофона к работе начинается с того, что его вынимают из футляра и с него снимают чехол. Далее проверяют его разъем. В профессиональных микрофонах используются разъемы ШРМБ 3 и 5, изображенные на рис. 5.42. Для любительских микрофонов разъемы стандартизованы ГОСТ 12368—66. Микрофонный кабель кончается трехконтактной (СШЗ) или пяти-

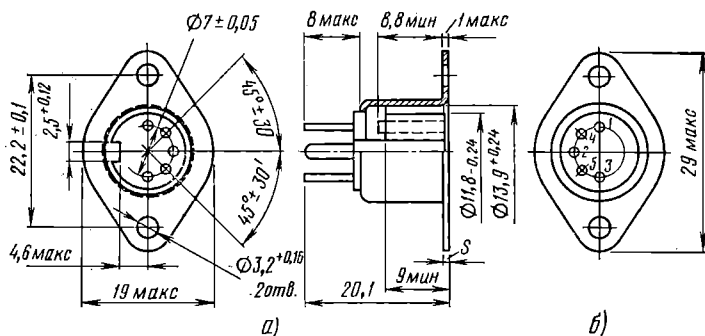


Рис. 5.44. Трех- и пятиконтактные розетки СГЗ и СГ5. В трехконтактной розетке в отверстия не закладываются. (Размер S : 1,5—0,3 — для металла; 3,4—0,3 — для пластмассы)

контактной (СШ5) вилкой (рис. 5.43). На рис. 5.44 изображены виды на соответствующие розетки СГЗ (а) и СГ5 (б), а на рис. 5.45 приведена разметка для их крепления.

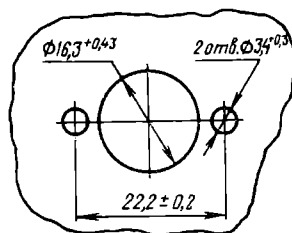


Рис. 5.45. Разметка для крепления розеток на стенку

На рис. 5.46а приведена схема подключения розеток радиоприемника, радиолы, магнитолы, магниторадиолы, телевизора, усилителя низкой частоты, а на рис. 5.46б — магнитофона, на которые работает микрофон. В случае применения микрофонов производства зарубежных фирм полезно иметь в виду, что международная электротехническая комиссия рекомендует подключение разъема, показанное на рис. 5.47, а стандарт ФРГ DIN45594 — показанное на рис. 5.48.

Контакты разъема должны быть чистыми, неокисленными во избежание плохого контакта. Резьба должна быть не сорванной и не забытой для того, чтобы разъем мог хорошо и легко затягиваться опять-таки для обеспечения хорошего контакта. Если микрофон должен работать на открытом воздухе, то на него надевается ветрозащитное устройство, входящее в его комплект. После этого микрофон устанавливают на стойку, которая имеет оговоренную ГОСТ 9908—75 «Микрофоны. Требования к механическому креплению» резьбу $M16 \times 1-7H$ с длиной свинчивания 10^{+1} мм на высоту, необходимую для предстоящего сеанса, и включают в ответную часть кабельного разъема. Необходимо следить, чтобы микрофонный кабель не был при этом натянут. Лучше, если он лежит свободно, образуя два-три кольца вокруг стойки.

Назначение розетки (со стороны вставки)	Для микрофона					
	Симметричного		Несимметричного			
	Низкоомного		Высокоомного		Низкоомного	
	Моно	Стерео	Моно	Стерео	Моно	Стерео
	Вх. тр.	Вх. тр. прав. / Вх. тр. лев.	Вх.	Вх. прав. / Вх. лев.	Вх. тр.	Вх. тр. прав. / Вх. тр. лев.

а)

Назначение розетки (со стороны вставки)	Для подключения микрофона	
	Моно	Стерео
	Запись	Прав. / Лев.

б)

Рис. 5.46. Схема подключения розеток:
а) радиоаппаратуры; б) магнитофона

Наконец, микрофон проверяют на работоспособность, опять-таки производя хлопок перед ним и наблюдая показания индикатора на выходе тракта. Если это показание имеет обычно наблюдаемую величину, то микрофон подготовлен

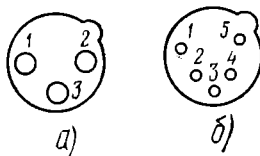


Рис. 5.47. Микрофонные разъемы, рекомендованные международной электротехнической комиссией (вид со стороны штырей):

а) для одноканальных трактов: 1 — при симметричном включении — экран, при симметричном с фантомным питанием — экран и минус питания, при несимметричном включении — экран и обратный провод; 2 — при симметричном и несимметричном включении без питания — звуковая частота (микрофон), при включении питания — звуковая частота и плюс питания; 3 — при симметричном включении без питания — звуковая частота (микрофон), при фантомном питании — звуковая частота и плюс питания, при прямом питании — звуковая частота и минус питания; б) для двухканальных трактов: 1 — то же, что и в одноканальных; 2 — при включении без питания — звуковая частота левого канала (микрофон), при фантомном питании — звуковая частота левого канала (микрофон) и плюс питания; 3 — при включении без питания — звуковая частота левого канала (микрофон), при фантомном питании — звуковая частота левого канала (микрофон) и минус питания; 4 — при включении без питания — звуковая частота правого канала (микрофон), при включении с питанием — звуковая частота правого канала и плюс питания; 5 — при включении без питания — звуковая частота правого канала (микрофон), при фантомном питании — звуковая частота (микрофон) и плюс питания, при прямом питании — звуковая частота (микрофон) и минус питания. При включении замыкание сперва происходит через штырь 1. Штырь 2 соединяется с выводом микрофона, имеющим по рекомендации МЭК цветную точку. При включении на несимметричный усилитель симметричного микрофона контакт 3 (или 3 и б) розетки усилителя следует присоединять к контакту 1

к работе. Некоторые микрофоны имеют органы включения и управления, действие которых также должно быть проверено перед началом работы. К ним относятся кнопки включения (микрофон МД-64м), для дистанционного управ-

ления формой характеристики направленности (микрофон МК-13М), коррекции частотной характеристики на низких частотах (микрофон МД-78). По окончании работы микрофон отключают, снимают со стойки, надевают на него чехол, укладывают в футляр, кладут на свое место в шкаф.

Расстановка микрофонов

В большинстве случаев, за исключением таких, как использование микрофонов на трибуне, в президиуме, перед диктором, в руке и т. п., расстановка их является частью творческого процесса звукорежиссера, при помощи которого он добивается задуманного им качества звучания.

Тем не менее и инженер, отвечающий за эксплуатацию микрофонного и усилительного оборудования, должен быть знаком хотя бы с основами правильной расстановки. Последняя заключается в выборе оптимальной угловой ориентации микрофона относительно воспринимаемого источника звука и расстояния микрофона от него.

Угловая ориентация микрофона определяется углом, составленным его рабочей осью, и направлением на источник звука. Для большинства типов микрофонов при увеличении этого угла падают как общая чувствительность микрофона, так и в особенности его чувствительность на высоких частотах. Лишь у некоторых типов микрофонов, например двусторонне направленных (восьмерочных) и в меньшей сте-

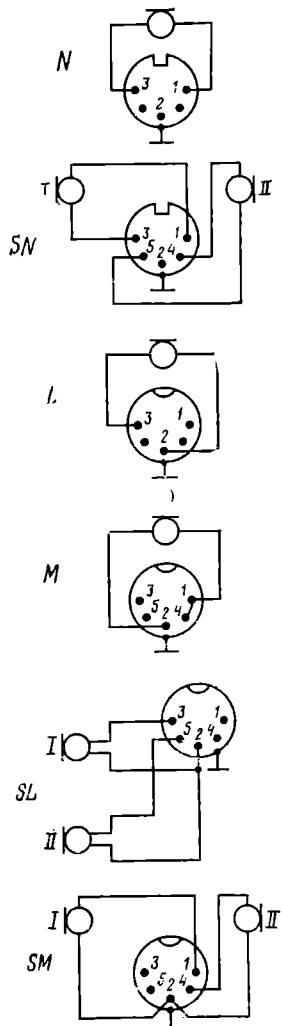


Рис. 5.48. Подключения со стороны подпайки к вилке: *N* — низкоомные (от 50 до 300 Ом) микрофоны, симметричные с чувствительностью холостого хода от 0,5 до 5 мВ/Па; *SN* — стереомикрофоны, симметричные, низкоомные (от 50 до 300 Ом на систему) с чувствительностью холостого хода системы от 0,5 до 5 мВ/Па; *L* — низкоомный (от 50 до 500 Ом) асимметричный с чувствительностью холостого хода от 0,5 до 5 мВ/Па; *M* — среднеомные (от 500 Ом до 5 кОм) микрофоны с чувствительностью холостого хода от 1 до 10 мВ/Па; *SL* — стереомикрофоны, низкоомные (от 50 Ом до 500 Ом) с чувствительностью холостого хода от 0,5 до 5 мВ/Па; *SM* — стереомикрофоны среднеомные (от 500 до 5 кОм на систему) с чувствительностью холостого хода от 1 до 10 мВ/Па

пени односторонне направленных, чувствительность на высоких частотах изменяется при повороте рабочей оси от направления на источник так же, как и чувствительность на низких частотах. Поэтому микрофоны направляются своей рабочей осью не на источник только в тех случаях, когда при передаче надо сделать этот источник менее громким на фоне звучания других источников или же звучание его надо сделать более мягким и менее четким.

Что касается выбора расстояния от источника, то величина его в основном определяется свойствами помещения, в котором находятся микрофоны и источник звука, и свойствами последнего.

Как указывается в разд. 7, акустические процессы в каждой точке помещения довольно хорошо определяются величиной акустического отношения. Восприятие же источника в нем зависит от того, в каком соотношении пахотятся расстояние от источника до микрофона и радиус гулкости помещения

(см. § 7.1). Если расстояние от источника до микрофона меньше радиуса гулкости, то при воспроизведении кажущиеся размеры источника звука больше фактических, а размеры окружающего пространства меньше фактических. При этом создается общее впечатление близости и интимности звучания. При расстоянии микрофона от источника, большем радиуса гулкости, наоборот, размеры источника кажутся меньше фактических, а окружающего пространства — больше фактических. Общее впечатление от звучания — объемность, «воздушность», мощность. При расположении микрофона от источника звука на расстоянии, равном радиусу гулкости, звучание при воспроизведении является промежуточным по сравнению с описанными выше.

Для численного определения надлежащего расстояния (микрофона от источника звука) рекомендуется пользоваться эмпирической формулой

$$l = \frac{1}{T} \sqrt{\frac{\kappa V}{300}},$$

где T — время стандартной реверберации помещения, с; V — его объем, м³; κ — коэффициент объемности звука, составляющий 10—25 для симфонического оркестра, 3—12 для малого оркестра, 4—15 для рояля соло, 1,2—6 для скрипки и виолончели, 0,5—2,4 для певца солиста и 0,2—0,8 для речи. Меньшие значения κ соответствуют крупному плану (расстояния меньше радиуса гулкости).

Пример. Для работы с малым оркестром в относительно небольшом помещении объемом 450 м³ и временем реверберации 1,1 с для получения крупного плана выбираем $\kappa=3$. Тогда

$$l = \frac{1}{1,1} \sqrt{\frac{3 \cdot 450}{300}} = 2 \text{ м.}$$

При расстановке микрофонов дополнительно следует учитывать специфические особенности различных источников звука. При одном исполнителе (певец) следует преимущественно применять односторонне направленный микрофон на расстоянии 50—70 см. Если применяется двусторонне направленный (например, ленточный) микрофон, то его надо располагать на расстоянии не менее 80—100 см, учитывая, что на более близком расстоянии он будет «бубнить».

Для обслуживания ораторов и дикторов лучше применять односторонне направленный микрофон с большим перепадом «фронт/тыл», направляемый рабочей осью на оратора, тылом к залу. Для приема диалога лучше всего подходит двусторонне направленный микрофон или односторонне направленный.

В последнем случае собеседники располагаются симметрично по обе стороны рабочей оси микрофона.

Для приема сцены «за круглым столом» лучше всего подходит односторонне направленный микрофон, помещаемый в центре с вертикальным расположением рабочей оси, с направлением нулевой чувствительности вниз.

Расположение микрофона для приема звука музыкальных инструментов — разное для разных групп инструментов. Так, для приема рояля микрофон предпочтительно располагать со стороны криволинейной части деки. При приеме хора одним микрофоном его следует устанавливать так, чтобы хор располагался относительно него в соответствии с характеристической направленности, т. е. каждый хорист должен располагаться на расстоянии, обратно пропорциональном чувствительности микрофона, под тем углом, под которым

он находится (рис. 5.49). Так же располагают микрофон при приеме малых ансамблей и оркестров. Естественно, что одновременное использование нескольких

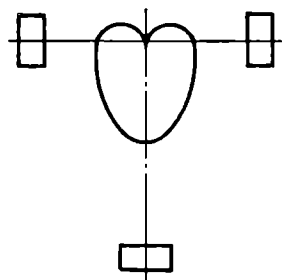


Рис. 5.49. Расположение хора вокруг микрофона

микрофонов позволяет подчеркивать звучание тех или иных вокальных или оркестровых групп и таким образом дает в руки звукоорежиссеру инструмент для формирования разнообразных звучаний. Но это уже является сферой действия звукоорежиссера.

Раздел 6

ГРОМКОГОВОРИТЕЛИ И ТЕЛЕФОНЫ

6.1. ОПРЕДЕЛЕНИЯ, КЛАССИФИКАЦИЯ, ОСНОВНЫЕ ПАРАМЕТРЫ

Громкоговоритель (телефон) — прибор для преобразования электрических колебаний в акустические колебания воздушной среды — является последним и одним из наиболее важных звеньев любого электроакустического тракта, так как его свойства оказывают чрезвычайно большое влияние на качество работы этого тракта в целом. Существующие в настоящее время виды и типы громкоговорителей подразделяются на профессиональные и бытовые (любительские). Первые из них используют для озвучения, звукоусиления и громкоговорящей связи, вторые — входят в состав многочисленных видов бытовой радиоэлектронной аппаратуры — радиоприемников, телевизоров, магнитофонов, проигрывателей и т. п.

Телефоны применяются как в аппаратуре связи (например, в микротелефонных трубках), так и в бытовой. Преимущество телефонов бытовой радиоэлектронной аппаратуры — возможность прослушивания с их помощью без помехи окружающим. Необходимо отметить и развившееся в последние годы применение телефонов в стереофонических и квадрафонических воспроизводящих установках. Стереофонические телефоны дают возможность полного разделения правого и левого каналов микрофон—усилитель—телефон—ухо. Это не может быть достигнуто при использовании громкоговорителей, когда сигнал от правого громкоговорителя воспринимается не только правым, но и левым ухом, а сигнал от левого — не только левым, но и правым ухом.

По способу преобразования колебаний громкоговорители и телефоны разделяются на электродинамические катушечные (подавляющее число типов громкоговорителей), электромагнитные (подавляющее числом типов телефонов), электростатические, пьезоэлектрические и некоторые другие; по виду излучения — на громкоговорители непосредственного излучения (диффузорные) и рупорные; по воспроизводимому диапазону — на широкополосные, низкочастотные, среднечастотные, высокочастотные. Наконец, громкоговорители различают по потребляемой электрической мощности (мощные, маломощные) и по чувствительности.

Следует отметить, что диффузорные громкоговорители без оформления (так называемые головки) по причинам, излагаемым ниже, нуждаются во внешних оформлениях¹, совместно с которыми, а также с такими пассивными элементами, как трансформаторы, разделительные фильтры, регуляторы громкости и тембра, образуют акустические излучающие системы. Последние обычно называются громкоговорителями или акустическими системами, или, как частный случай — применяемые для озвучения и звукоусиления звуковые колонки. Стандартом ГОСТ 16122—70 «Громкоговорители. Методы электроакустических испытаний и измерений» установлены определения характеристик громкоговорителей и терминов, к ним относящимся, наиболее употребительные из которых мы приведем ниже.

¹ Без оформления головки диффузорных громкоговорителей применяются чрезвычайно редко.

Рабочий центр — точка, от которой ведется отсчет расстояния от громкоговорителя (оговаривается в технической документации на громкоговоритель). Если рабочий центр не оговорен в технической документации, то за рабочий центр принимают:

- а) для одиночных головок громкоговорителей геометрический центр симметрии их излучающих отверстий;
- б) для совмещенной системы, состоящей из нескольких однотипных головок громкоговорителей, геометрический центр симметрии излучающих отверстий или проекций этих отверстий на плоскость, в которой лежит большинство излучающих отверстий;
- в) для системы, состоящей из нескольких разнотипных излучающих головок громкоговорителей, геометрический центр симметрии излучающих отверстий высокочастотных головок громкоговорителей;
- г) для рупорных громкоговорителей геометрический центр симметрии излучающего отверстия рупора.

Рабочая ось — прямая, проходящая через рабочий центр громкоговорителя в направлении преимущественного использования (оговаривается в технической документации на громкоговоритель). Если рабочая ось не оговорена в технической документации, то за рабочую ось принимают прямую, проходящую через рабочий центр громкоговорителя и перпендикулярную к плоскости излучающего отверстия.

Номинальное электрическое сопротивление — активное сопротивление, которым замещают громкоговоритель при измерении электрической мощности, потребляемой от источника (оговаривается в технической документации на громкоговоритель). Номинальное электрическое сопротивление определяется минимальным модулем полного электрического сопротивления громкоговорителя в диапазоне частот выше частоты основного резонанса. Измеренное минимальное значение модуля полного электрического сопротивления громкоговорителя не должно быть меньше номинального более чем на 20%.

Частота основного резонанса — частота, при которой модуль полного электрического сопротивления громкоговорителя имеет первый основной максимум. Для систем, содержащих более одной головки громкоговорителя, понятие частоты основного резонанса имеет смысл, если используемые головки громкоговорителей однотипны или частота основного резонанса одной из головок или нескольких однотипных головок значительно ниже, чем остальных головок.

Электрическая мощность — мощность, рассеиваемая на сопротивлении, равном по величине номинальному электрическому сопротивлению громкоговорителя, при напряжении, равном напряжению на зажимах громкоговорителя.

Номинальная мощность — электрическая мощность, ограниченная тепловой и механической прочностью громкоговорителя и возникновением нелинейных искажений, превышающих заданную величину (оговаривается в технической документации на громкоговоритель).

Паспортная мощность — электрическая мощность, указанная в паспорте громкоговорителя. За паспортную мощность принимают наибольшую неискаженную мощность усилителя, от которого громкоговоритель может длительное время удовлетворительно работать на реальном звуковом сигнале. Паспортная мощность не может быть менее номинальной мощности.

Номинальный диапазон частот — диапазон частот, в котором определяются параметры громкоговорителя (оговаривается в технической документации на громкоговоритель).

Эффективно-воспроизводимый диапазон частот — диапазон частот, в пределах которого частотная характеристика громкоговорителя, измеренная на рабочей оси, понижается по отношению к уровню, усредненному в октавной полосе частот в области максимальной чувствительности, на величину, не превышающую оговоренную в технической документации на громкоговоритель (обычно 10 дБ). Пики и провалы частотной характеристики уже 1/8 октавы не учитываются.

Частотная характеристика по звуковому давлению (частотная характеристика громкоговорителя) — зависимость звукового давления, развиваемого громкоговорителем в точке свободного поля, находящейся на определенном расстоянии от рабочего центра (см. § 12.4) от частоты при постоянном напряжении на зажимах громкоговорителя.

Неравномерность частотной характеристики звукового давления — отношение максимального звукового давления к минимальному в номинальном диапазоне частот, выраженное в децибелах. Пики и провалы частотной характеристики уже 1/8 октавы не учитываются.

Среднее звуковое давление — среднеквадратичное значение звукового давления, развиваемого громкоговорителем в определенном диапазоне частот в заданной точке свободного поля; усредняют значения звукового давления на частотах, распределенных равномерно в логарифмическом масштабе.

Характеристическая чувствительность — отношение среднего звукового давления, развиваемого громкоговорителем в номинальном диапазоне частот на рабочей оси на расстоянии 1 м от рабочего центра, к корню квадратному из подводимой электрической мощности.

Среднее стандартное звуковое давление — среднее звуковое давление, развиваемое громкоговорителем в номинальном диапазоне частот на рабочей оси на расстоянии 1 м от рабочего центра при подведении к нему напряжения, соответствующего электрической мощности, равной 0,1 Вт. Среднее стандартное звуковое давление громкоговорителя численно равно характеристической чувствительности, умноженной на корень квадратный из 0,1 Вт.

Характеристика направленности — зависимость звукового давления, развиваемого громкоговорителем на частоте f (или в полосе частот со средней частотой f) в точке свободного поля, находящейся на определенном расстоянии от рабочего центра, от угла между рабочей осью громкоговорителя и направлением на указанную точку.

Коэффициент осевой концентрации — отношение квадрата звукового давления, определяемого на рабочей оси на измерительном расстоянии (см. § 12.4) от рабочего центра громкоговорителя в условиях свободного поля для частоты f (или в полосе частот со средней частотой f), к среднему из квадратов звукового давления, определяемого на всех радиальных направлениях, исходящих из рабочего центра громкоговорителя, при прочих тех же условиях. Количество радиальных направлений берут исходя из остроты характеристики направленности.

Индекс направленности — коэффициент осевой концентрации, выраженный в децибелах.

Акустическая мощность — средняя по времени мощность излучаемого громкоговорителем сигнала на частоте f (или в полосе частот со средней частотой f). Средняя акустическая мощность — среднее значение акустической мощности, излучаемой громкоговорителем в определенном диапазоне частот; усредняют значения акустической мощности на частотах, распределенных равномерно в логарифмическом масштабе.

Коэффициент гармонических искажений n -го порядка ($n=2, 3, \dots$) — отношение звукового давления, развиваемого громкоговорителем на частоте, n -кратной частоте входного синусоидального электрического сигнала, к звуковому давлению, развиваемому громкоговорителем на частоте сигнала. Суммарный коэффициент гармонических искажений — корень квадратный из суммы квадратов коэффициентов гармонических искажений всех порядков.

Дребезг — спектральные компоненты излучаемого громкоговорителем сигнала, вызываемые механическими дефектами громкоговорителя или головки громкоговорителя и слышимые как помеха при его работе в номинальном и эффективно воспроизводимом диапазонах частот.

Призвук — спектральные компоненты излучаемого громкоговорителем сигнала, слышимые как помеха при подведении к нему гармонического сигнала.

Кроме перечисленных выше стандартизованных характеристик громкогово-

рителей и относящихся к ним терминов, приведем определения некоторых важных дополнительных характеристик.

Добротность громкоговорителя, являющаяся добротностью его подвижной системы, — мера затухания свободных колебаний подвижной системы громкоговорителя. Величина ее определяется как параметрами самой системы, так и сопротивлением, вносимым в механическую систему из электрической цепи.

Эквивалентный объем — возбуждаемый головкой громкоговорителя закрытый объем воздуха, имеющий гибкость, равновеликую гибкости подвижной системы головки.

Чувствительность телефона — отношение звукового давления, развиваемого им в камере искусственного уха, к подводимому напряжению.

Отдача телефона — звуковое давление, развиваемое им в камере искусственного уха при мощности, равной 1 мВт, подводимой ко входу последовательного соединения телефона и активного сопротивления. Последнее должно быть равно модулю сопротивления телефона на частоте 1000 Гц.

6.2. ОСНОВНЫЕ ХАРАКТЕРИСТИКИ ТЕЛЕФОНОВ И ГРОМКОГОВОРИТЕЛЕЙ

Чувствительность и коэффициент полезного действия

Первыми стали применять телефоны и громкоговорители *электромагнитные*.

Для электромагнитного способа преобразования коэффициент электромеханической связи $K = B_0 Q \omega / \delta$, где B_0 — постоянная индукция в зазоре между полюсными наконечниками (2) и якорем 1 (диафрагмой); δ — толщина этого зазора; Q — его сечение; ω — число витков катушки, надетой на магнитопровод (см. рис. 5.6б, § 4.4 и 5.3). Частотная характеристика чувствительности¹ электромагнитного громкоговорителя, под которой понимают отношение развиваемого им на расстоянии 1 м по его оси звукового давления к подводимому к нему напряжению, может быть выражено как

$$\frac{p}{U} = \frac{\rho}{\sqrt{8}} \frac{K \omega S}{\pi Z_0 z_m}.$$

Здесь ρ — плотность воздуха; S — площадь диффузора; Z_0 — электрическое сопротивление громкоговорителя; z_m — механическое сопротивление его подвижной системы (якорь с диффузором). Приведенное выражение справедливо только для поршневого диапазона, верхняя граница которого $f_{гр} = c / \sqrt{2\pi S}$. Предполагается далее, что громкоговоритель колеблется в бесконечной стене и излучение его ненаправленно.

Если нижней граничной частотой, воспроизводимой этим громкоговорителем, считать его резонансную частоту, то $z_m = \omega m$, где m — масса подвижной системы. Электрическое сопротивление этого громкоговорителя имеет индуктивный характер, откуда $Z_0 \approx \omega L$, где L — индуктивность громкоговорителя. При сделанных допущениях

$$\frac{p}{U} = \frac{\rho K}{\sqrt{8} \pi} \frac{\omega S}{\omega L \omega m} = \frac{\rho K}{\sqrt{8} \pi} \frac{S}{\omega L m}.$$

Как видно, даже в пределах поршневого диапазона чувствительность падает с частотой. Эта тенденция в известной степени компенсируется тем, что с повышением частоты направленность обостряется и, таким

¹ Для электромагнитного (и электростатического) громкоговорителя нельзя пользоваться понятием характеристической чувствительности, поскольку при постоянном подводимом сопротивлении мощность меняется с частотой из-за того, что сопротивление громкоговорителя реактивно.

образом, излучение концентрируется на оси. Чувствительность громкоговорителя еще больше падает ниже частоты резонанса механической системы из-за того, что механическое сопротивление, имея упругий характер, увеличивается с понижением частоты, а выше поршневого диапазона из-за того, что при повышении частоты диффузор перестает колебаться как целое. Кроме того, электромагнитной системе свойственны большие, в том числе специфические для нее, нелинейные искажения по второй гармонике, обусловленные тем, что сила притяжения якоря (диафрагмы) пропорциональна не индукции, а ее квадрату. С этим борются наложением постоянного потока на переменный магнитный и применением дифференциальной конструкции.

Неблагоприятен и тот факт, что электрическое сопротивление громкоговорителя сильно зависит от частоты ($Z_a = \omega L$).

Таким образом, качественные показатели электромагнитного громкоговорителя являются неудовлетворительными. Этим объясняется то, что громкоговорители этого вида в настоящее время повсеместно вышли из употребления. Электромагнитные же телефоны остались довольно широко распространенными из-за своих простоты и прочности. Частотные искажения в них меньше, чем в громкоговорителях, так как диафрагма колеблется как поршень. А так как они применяются только для передачи речи, то и требования к ним менее жесткие, чем для передачи художественных программ.

В диапазоне низких частот, где параметры механической системы телефона, а также параметры механического сопротивления, которое ухо оказывает приложенному к нему телефону, можно считать сосредоточенными, чувствительность последнего выражается в виде

$$\frac{p}{U} = \frac{K}{i \omega c_B Z_a \left(z_T + \frac{1}{i \omega c_B} \right) S},$$

где, помимо введенных выше обозначений, Z_a — электрическое сопротивление телефона; z_T — механическое сопротивление его подвижной системы; c_B — гибкость воздуха в объеме под диафрагмой с площадью S телефона, приложенного к уху.

Как видно, чувствительность телефона будет частотнонезависимой, если его механическое сопротивление чисто упругое, а электрическое — активное. Если первое достижимо путем расположения резонанса диафрагмы выше воспроизводимого диапазона, то второе условие обеспечить нельзя, поскольку электрическое сопротивление телефона индуктивно. Таким образом, чувствительность телефона по напряжению частотнозависима, а по отдаче она мало зависит от частоты, если внутреннее сопротивление выходного каскада усилителя или линии активное и равно модулю сопротивления телефона на частоте 1000 Гц.

Подавляющее число типов громкоговорителей и многие типы телефонов построены на основе использования магнитоэлектрического принципа преобразования, получившего в электроакустике наименование *электродинамического*.

Исходя из формулы для электродинамической системы коэффициент электромеханической связи $K = Bl$, где B — индукция постоянного потока в воздушном зазоре 1 магнитной цепи; l — длина проводника катушки 3 (см. рис. 5.6а, § 4.4 и 5.3).

Коэффициент полезного действия η и стандартное звуковое давление $p_{ст}$ (давление на расстоянии 1 м от громкоговорителя по направлению его рабочей оси при подведении мощности 0,1 Вт) для громкоговорителя, диффузор которого колеблется в бесконечной стене, могут быть выражены соответственно:

$$\eta = \frac{K^2 \rho S^2}{2\pi c R m^2} = \frac{\rho}{2\pi c \rho_a} \frac{B^2 V S^2}{m^2};$$

$$p_{ст} = \frac{K \rho}{2\pi m} \sqrt{\frac{0,1}{R}} = \frac{\rho}{2\pi m} \frac{0,1 B^2 V}{\rho_a}$$

Здесь, помимо введенных выше обозначений, R — электрическое активное сопротивление громкоговорителя; m — масса подвижной системы громкоговорителя; V — объем проводника звуковой катушки; ρ_a — удельное электрическое сопротивление проводника звуковой катушки.

Эти выражения справедливы в диапазоне частот, нижней границей которого является резонансная частота, а верхней — нижняя граница поршневого диапазона, равная, как уже упоминалось, $f_{гр} = c / \sqrt{2\pi S}$. Ниже резонансной частоты звуковое давление и КПД очень сильно убывают. Выше $f_{гр}$ диффузор перестает колебаться как целое и части его колеблются с разными фазой и амплитудой. Поэтому звуковое давление от него то увеличивается на тех частотах, где вся или большая часть поверхности диффузора и подвеса колеблется синфазно, то уменьшается, когда части поверхности диффузора и подвеса колеблются противофазно. Поэтому частотная характеристика диффузорного громкоговорителя по звуковому давлению имеет обычно нерегулярную, испещренную пиками и провалами форму. По этим причинам в громкоговорителях, предназначенных для воспроизведения широкого диапазона частот, приходится идти на усложнение их конструкции. Так, для понижения резонансной частоты применяют особо гибкие подвесы, например из латекса. Для улучшения воспроизведения высших частот применяют специальные рупорки, скрепленные с подвижной системой громкоговорителя. Вместо катушек из медного провода делают их из алюминиевого, что уменьшает массу подвижной системы и, следовательно, увеличивает КПД и стандартное звуковое давление. Самым же эффективным способом расширения диапазона воспроизводимых частот является разделение его на части с тем, чтобы каждая из этих частей воспроизводилась отдельным громкоговорителем, большим по размерам для низкочастотной области и меньшим для высокочастотной. Включаются эти громкоговорители через так называемые разделительные фильтры, обеспечивающие попадание на данный громкоговоритель напряжения только тех частот, на воспроизведение которых он предназначен.

Что касается нелинейных искажений, то основными причинами их являются: во-первых, нелинейная зависимость деформации (сжатия и растяжения) подвеса диффузора и центрирующей шайбы от приложенной силы, во-вторых, неоднородность магнитного поля в воздушном зазоре, так как магнитная индукция больше в середине зазора и меньше у краев. А это, в свою очередь, приводит к тому, что при одной и той же величине тока в звуковой катушке сила, действующая на нее, различна в зависимости от того, вся ли катушка или часть ее находится внутри зазора. В первом случае витки катушки пронизываются полным магнитным потоком зазора, во втором — лишь частью его.

Телефоны, построенные на электродинамическом способе преобразования, распространены меньше электромагнитных. Их основное назначение — прослушивание стереофонических передач и контроль при киносъемках и звукозаписи. По конструкции они разделяются на диффузорные и капсюльные. В первых основой конструкции является небольшой диффузорный громкоговоритель, заключенный в корпус; во вторых — небольшая магнитная система с подвижной системой и куполообразной диафрагмой. Как следует из выражения для чувствительности телефона, приведенного выше, для получения равномерной частотной характеристики электродинамического телефона механическое сопротивление его подвижной системы также должно быть упругим, поскольку электрическое сопротивление активное.

Качественные показатели электродинамических телефонов значительно лучше, чем у электромагнитных. Они имеют более равномерную частотную характеристику и меньшие нелинейные искажения.

Из-за незначительного сопротивления излучения диффузора (вследствие малости его размеров по сравнению с длиной излучаемой волны) КПД диффузорного громкоговорителя невелик. Применение рупора, сопротивление излучения у которого значительно больше, позволяет существенно увеличить КПД.

Коэффициент полезного действия рупорного громкоговорителя с акустической камерой может быть выражен как

$$\eta = \frac{1}{1 + \frac{\rho_a}{B^2 V} \frac{\omega^2 m^2 + \rho^2 c^2 (S_d^2 / S_0)^2}{\rho c (S_d^2 / S_0)}}$$

где S_d — поверхность диафрагмы; S_0 — входное отверстие рупора. Однако эта формула справедлива для диапазона частот, более узкого по сравнению с диапазоном диффузорного громкоговорителя. Дело в том, что резонансная частота подвижной системы у рупорного громкоговорителя существенно выше, так как для стабильности его работы приходится делать подвес более жестким. На высоких частотах начинают заметно влиять гибкость воздуха в акустической камере, как бы шунтирующая сопротивление излучения, и интерференция колебаний от различных частей диафрагмы, достигающих горла рупора с разными фазами вследствие различной длины путем их прохождения. Правда, с этим борются, вставляя в камеру так называемый противointерференционный вкладыш, в значительной степени выравнивающий эти пути.

По всем этим причинам воспроизводимый рупорным громкоговорителем частотный диапазон довольно узок. Но и внутри его частотная характеристика неравномерна.

Существенный недостаток рупорного громкоговорителя в том, что его характеристика направленности сильно зависит от частоты. Являясь тупой на низких частотах, она обостряется к высоким. Поэтому в любом направлении, отличном от осевого, наблюдается дополнительный спад высоких частот, что отрицательно сказывается, например, на артикуляции при воспроизведении речи.

Что касается нелинейных искажений, то ко всем причинам, указанным для диффузорных громкоговорителей, прибавляются еще специфические для рупорных. Они заключаются в том, что поскольку в акустической камере имеет место очень большое звуковое давление, то тут начинается сказываться нелинейность самого воздуха, находящегося в ней. А это проявляется в виде дополнительных искажений.

Таким образом, рупорный громкоговоритель обладает рядом существенных недостатков. Достоинством же его является сравнительно большой КПД, что делает целесообразным его применение там, где необходимы высокий уровень громкости воспроизведения или работа на большие расстояния.

Характерной и имеющей важное значение для работы электродинамических громкоговорителей и телефонов является частотная зависимость их электрического сопротивления (рис. 6.1). На низких частотах это, по существу,

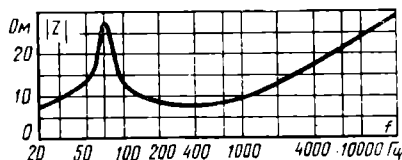


Рис. 6.1. Пример зависимости модуля полного электрического сопротивления электродинамического громкоговорителя от частоты

активное сопротивление катушки. На частоте резонанса подвижной системы сопротивление громкоговорителя (на 70 Гц на рис. 6.1) или телефона сильно возрастает ввиду увеличения вносимого сопротивления $B^2 l^2 / Z_m$ (механическое сопротивление сильно уменьшается). Далее оно падает из-за того, что наступает электромеханический резонанс индуктивного сопротивления катушки с емкостным сопротивлением вносимого сопротивления $\frac{B^2 l^2}{i \omega m}$, и, наконец, к высо-

ким частотам доминирующим начинает становиться упомянутое уже индуктивное сопротивление катушки.

Следует назвать еще один принцип преобразования, используемый в конструкциях телефонов и громкоговорителей, — *электростатический* (рис. 6.2). Принцип действия их в дифференциальном варианте заключается в том, что между двумя перфорированными пластинами 2, являющимися неподвижными электродами, располагается подвижный электрод 1 обычно в виде металлизи-

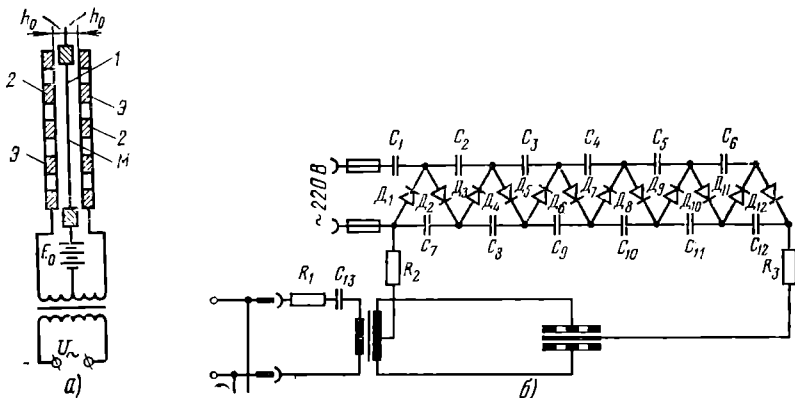


Рис. 6.2. Электростатический громкоговоритель:

а) конструкция: 1 — диафрагма М; 2 — неподвижные электроды Э; E_0 — источник поляризующего напряжения; h_0 — расстояние между диафрагмой М и неподвижным электродом Э; б) пример схемы устройства его питания и поляризации: $C_1 = C_2 = C_{12} = 33$ пФ; $C_{13} = 100$ мкФ; $R_1 = 1$ МОм; $R_2 = 470$ кОм; $R_3 = 10$ МОм

рованной пленки. На подвижный электрод подаются переменное напряжение от источника токов звуковой частоты и постоянное напряжение, в несколько раз большее переменного, что необходимо как для повышения чувствительности (см. ниже формулу для нее), так и для уменьшения специфических для электростатического способа преобразования нелинейных искажений по второй гармонике. В зависимости от мгновенной полярности по переменному напряжению подвижный электрод притягивается то к одному, то к другому неподвижному электроду. Получаемые таким образом колебания через перфорации неподвижных электродов возбуждают окружающую воздушную среду.

Электростатический способ преобразования применяется также и в телефонах. Электростатические громкоговорители большей частью выполняются как системы, непосредственно излучающие в среду. Значительно реже применяются электростатические рупорные громкоговорители.

Применение электростатических телефонов ограничивается сложностью их конструкции и высокой ценой.

Для электростатических преобразований коэффициент электромеханической связи $K = U_0(i\omega d)^{-1}$, где U_0 — напряжение поляризации; d — ширина зазора между подвижным и неподвижными электродами.

Чувствительность громкоговорителя, если он работает в режиме постоянного напряжения, выражается как

$$\frac{p}{U_0} = \rho c \frac{U_0 C}{z_m d} \sqrt{\frac{S r_s}{2\pi}}.$$

Здесь z_m — механическое сопротивление подвижной системы (подвижного электрода); S — ее поверхность; C — электрическая емкость громкоговорителя; ρc — удельное сопротивление среды (воздуха); r_s — удельное (на единицу поверхности) сопротивление излучения подвижного электрода.

Из приведенного выражения видно, что звуковое давление может быть частотнонезависимым, если:

а) сопротивление излучения и механическое сопротивление подвижного электрода также частотнонезависимы, что имеет место при геометрических размерах подвижного электрода, больших по сравнению с длиной волны излучаемого звука на низшей частоте воспроизводимого диапазона, а механическое сопротивление в основном активно;

б) геометрические размеры подвижного электрода малы по сравнению с длиной волны излучаемого звука на высшей частоте воспроизводимого диапазона, а механическое сопротивление инерционно, т. е. пропорционально частоте, что имеет место при расположении резонансной частоты ниже воспроизводимого диапазона. Однако построенный таким образом громкоговоритель будет иметь низкую чувствительность из-за малой поверхности подвижного электрода при малых размерах последнего. Для излучения достаточной акустической мощности необходимо, чтобы амплитуда колебаний подвижного электрода, особенно на низких частотах, была достаточно большой. Но для этого необходимо, чтобы был достаточно велик и зазор между подвижным и неподвижным электродами. Отсюда следует, что электростатический громкоговоритель малых размеров годится только для воспроизведения высоких частот. Для перекрытия широкого диапазона частот целесообразно применять многополюсные громкоговорители, т. е. совокупность громкоговорителей, каждый из которых воспроизводит только часть диапазона частот, в границах которой удовлетворяется условие б). Поэтому для воспроизведения низких частот и всего диапазона в целом электростатические громкоговорители должны иметь большие площади, хотя толщина конструкции может быть сравнительно небольшой.

Что касается электростатических телефонов, то из выражений для чувствительности телефона и для коэффициента электромеханической связи следует, что

$$\frac{p}{U_{\sim}} = \frac{U_0}{\omega^2 d c_B Z_3 \left(z_T + \frac{1}{i \omega c_B} \right)},$$

а это при $Z_3 = 1/i \omega C$ приводит к тому, что чувствительность телефона будет частотнонезависимой только при условии, что механическое сопротивление телефона будет упругим, т. е. если резонансная частота телефона выше воспроизводимого диапазона частот.

Преимущества электростатических громкоговорителей и телефонов в том, что они возбуждаются по всей поверхности подвижного электрода, благодаря чему все его точки колеблются синфазно, т. е. поршнеобразно, и он излучает всей поверхностью, что особенно важно при излучении высоких частот. Поэтому частотная характеристика электростатических громкоговорителя и телефона является весьма протяженной в сторону высоких частот по сравнению с характеристиками громкоговорителей и телефонов, построенных на других видах преобразования. Недостатками электростатических громкоговорителей и телефонов являются прежде всего, как уже упоминалось, специфические для них виды нелинейных искажений по второй гармонике, возникающие из-за того, что сила электростатического притяжения пропорциональна не приложенному к электродам напряжению, а квадрату его. Эти искажения могут быть сильно уменьшены путем применения напряжения поляризации и так называемой дифференциальной конструкции (см. рис. 6.2а). Но последняя дает необходимый эффект только при высокой степени симметрии расположения подвижного электрода между неподвижными. Само собой разумеется, что должна соблюдаться и электрическая симметрия, т. е. равенство подаваемых на оба неподвижных электрода напряжений.

Не всегда удобно и то, что электростатический громкоговоритель для воспроизведения широкого частотного диапазона должен иметь большую излучающую поверхность. Это, кроме конструктивных неудобств, приводит к тому, что

характеристика направленности такого громкоговорителя зависит от частоты, сильно обостряясь с повышением ее. Правда, с этим борются, составляя громкоговоритель из отдельных сравнительно узких панелей, располагаемых в горизонтальной плоскости (например, по дуге окружности).

Существенный недостаток электростатических громкоговорителей и телефонов также в том, что они являются для питающих их усилителей емкостной нагрузкой, сопротивление которой $1/\omega C$ падает с частотой.

Наконец, довольно неудобна во многих случаях необходимость в дополнительном источнике постоянного напряжения. Все это усложняет построение усилителя и требует применения специальных схем. Пример такой схемы питания электростатического громкоговорителя напряжениями поляризации и звуковой частоты представлен на рис. 6.2б.

Все эти обстоятельства приводят к тому, что электростатические громкоговорители в настоящее время распространены сравнительно мало, хотя их выпуск в зарубежных странах и растет. Наибольшее же распространение электростатические громкоговорители получили там в качестве высокочастотных элементов многополосных систем.

Появившиеся в последние годы *электретные* громкоговорители и телефоны имеют то преимущество перед электростатическими, что тут отпадает необходимость в источнике поляризующего напряжения, поскольку электроды несут на себе постоянный и довольно стабильный во времени электрический заряд.

Одним из других способов преобразования, используемых в громкоговорителях и телефонах, является также пьезоэлектрический, ставший перспективным благодаря появлению эффективных пьезоэлектрических пленок. Тут, естественно, не требуется напряжения поляризации. В остальном и электретные, и пьезоэлектрические громкоговорители обладают, в принципе, теми же свойствами, что и электростатические.

Приведенные выше выражения для чувствительности и КПД громкоговорителей и телефонов позволяют установить требования к их подвижным системам, необходимые для получения равномерных частотных характеристик. Подвижные системы электромагнитных, электродинамических и малых емкостных (электростатических, электретных и пьезоэлектрических) громкоговорителей должны управляться массой, т. е. их резонансные частоты должны находиться ниже воспроизводимого диапазона частот. У больших емкостных громкоговорителей подвижные системы должны иметь частотнонезависимое механическое сопротивление, т. е. желательно активное. Подвижные системы телефонов всех видов преобразования должны управляться упругостью, т. е. их резонансные частоты должны лежать выше воспроизводимого диапазона частот.

Направленность

Направленность отдельных диффузорных громкоговорителей не является явно выраженной ввиду малости поверхности излучения, хотя она и становится заметной в области высоких частот. Однако направленность начинает играть существенную роль, когда применяются системы, состоящие из совокупности громкоговорителей. К таким системам относятся, например, звуковые колонки, в которых несколько громкоговорителей располагается в виде одного или нескольких параллельных вертикальных рядов. Устроенные таким образом звуковые колонки мало направлены в горизонтальной плоскости и сильно направлены в вертикальной. Эти свойства звуковых колонок являются полезными при их применении в системах звукоусиления и озвучения.

Направленность колонки в вертикальной плоскости может быть приближенно вычислена по формуле

$$R_{\theta} = \sin\left(\frac{\pi l}{\lambda} \sin \theta\right) / n \sin\left(\frac{\pi d}{\lambda} \sin \theta\right),$$

где d — расстояние между центрами двух соседних громкоговорителей; n — число их в вертикальном ряду; l — вертикальная длина колонки (предполагает-

ся малой по сравнению с длиной волны излучаемого звука $\lambda \gg l$; θ — угол между нормалью к плоскости, в которой лежат диффузоры громкоговорителей, восстановленной в центре этой плоскости, и прямой, проведенной в вертикальной плоскости в точку наблюдения из этого же центра. Эта формула справедлива только для направленности в вертикальной плоскости.

Пространственная же характеристика определяется формулой

$$R_{\theta, \gamma} = \frac{\sin \left(\frac{\pi l}{\lambda} \cos \gamma \sin \theta \right)}{\frac{\pi l}{\lambda} \cos \theta \sin \theta} \frac{\sin \left(\frac{\pi b}{\lambda} \sin \gamma \sin \theta \right)}{\frac{\pi b}{\lambda} \sin \gamma \sin \theta}$$

где γ — угол между вертикальной плоскостью, проходящей через центр плоскости, в которой лежат диффузоры громкоговорителей, и перпендикулярной ей прямой, проведенной в точку наблюдения и лежащей в горизонтальной плоскости; b — ширина колонки в горизонтальной плоскости.

Приведенные формулы имеют ограничения, обусловленные тем, что на низких частотах они не учитывают взаимодействия громкоговорителей, а также эффекта дифракции из-за того, что громкоговорители колонки расположены не в бесконечной стене, а в корпусе конечных размеров. На высоких частотах расстояние d начинает становиться сравнимым с длиной волны и даже большим ее. Следует учесть, что на частотах, где $d > 3\lambda/4$, характеристика направленности становится многопестковой.

Однако приближенно эти формулы и построенный на основе первой из них график рис. 6.3 дают представление о направленности колонки.

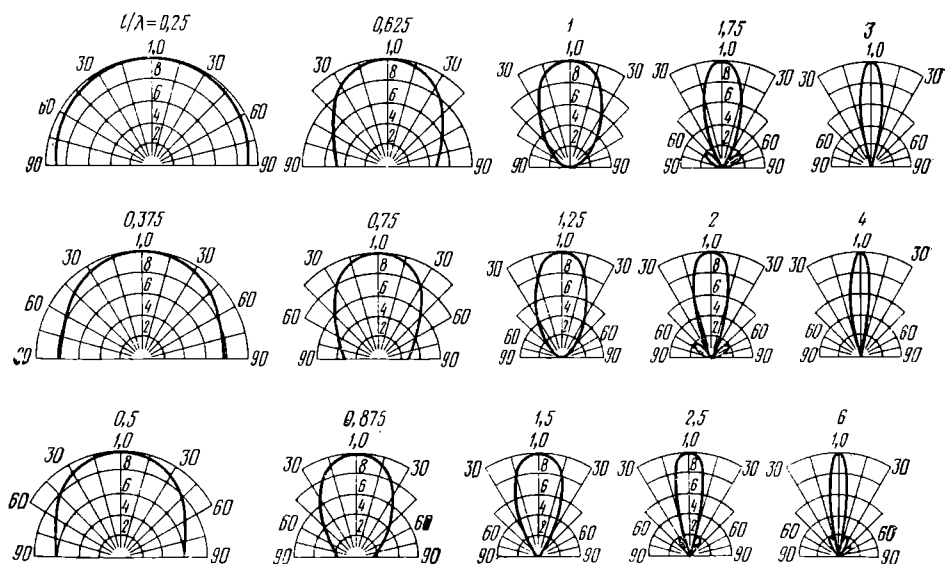
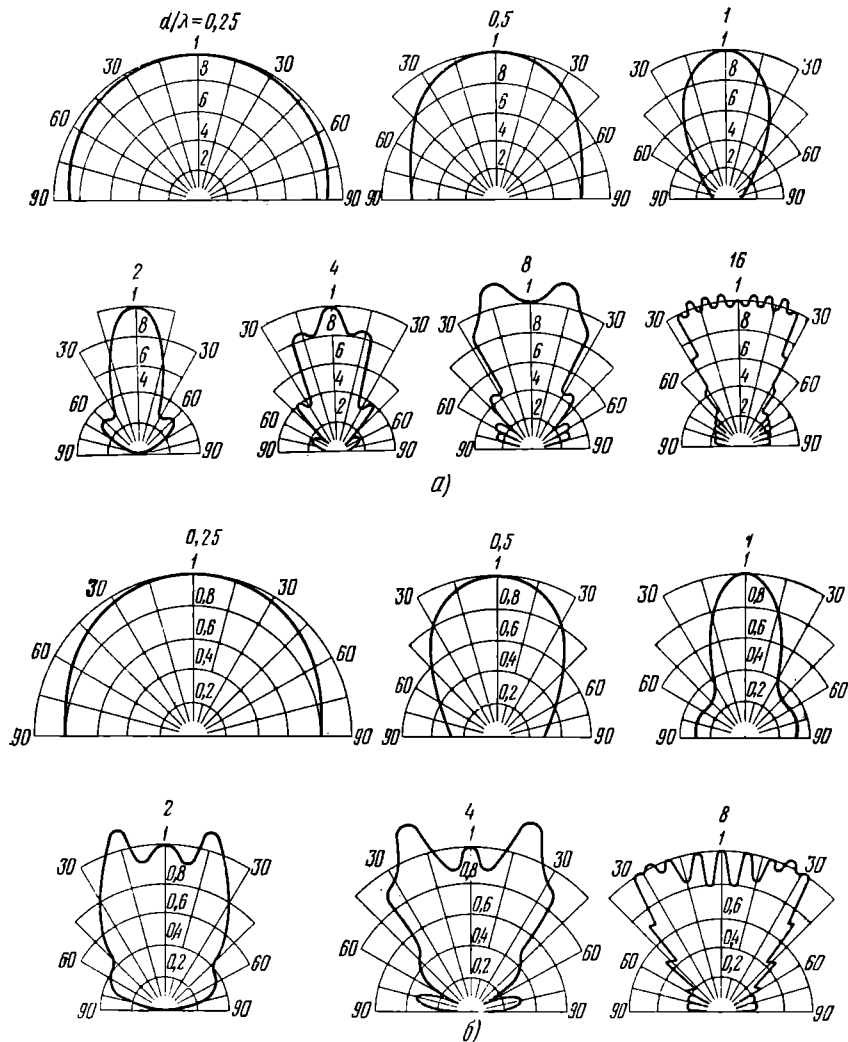


Рис. 6.3. Зависимость характеристики направленности линейного излучателя, колеблющегося в бесконечном экране, от отношения l/λ .

Пример. Пусть требуется найти звуковое давление, развиваемое звуковой колонкой длиной $l=1$ м под углом 15° на частоте 690 Гц в долях от осевого

давления. Длина волны, соответствующая частоте 690 Гц, приблизительно равна 0,5 м. Отсюда $l/\lambda = 1/0,5 = 2$. По кривой с таким параметром (справа в среднем ряду) находим точку пересечения кривой с направлением 15° и отсчитываем по вертикальной оси значение относительного звукового давления 0,45, что приблизительно и будет искомой величиной.

В противоположность звуковым колонкам, где требуется обострить направленность, для некоторых систем озвучения требуется, чтобы, по крайней мере, в горизонтальной плоскости направленность громкоговорителя отсутствовала, т. е. чтобы звуковое давление в горизонтальной плоскости в любом направлении от громкоговорителя на заданном расстоянии было одинаковым. Это требование удовлетворяется так называемыми радиальными громкоговорителями,



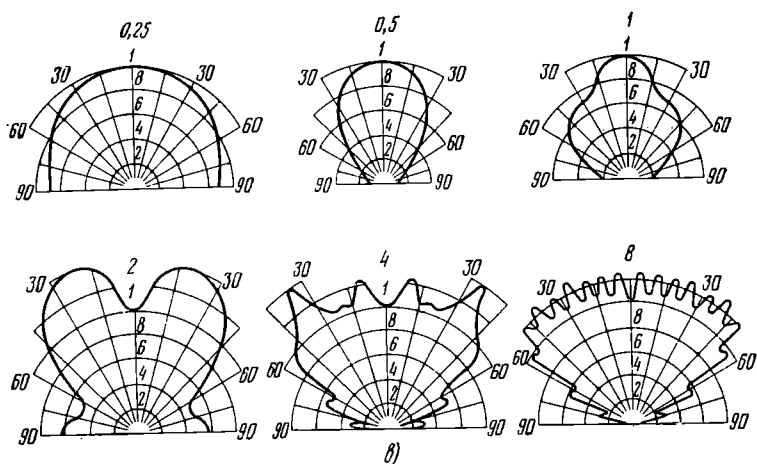


Рис. 6.4. Зависимость характеристик группы излучателей, расположенных по дуге окружности с центральным углом:

а) 60°; б) 90°; в) 120° — от являющегося параметром семейства характеристик отношения d/λ (диаметра базы к длине волны)

где несколько громкоговорителей расположено по окружности лежащими в одной горизонтальной плоскости.

Задача, которую приходится решать в бытовой радиоэлектронной аппаратуре, — не допустить по возможности обострения характеристики направленности в горизонтальной плоскости даже на высоких частотах во избежание их «пропадания» при слушании под углом к оси. С этой целью громкоговорители, служащие для воспроизведения высоких частот, располагают в горизонтальной плоскости по дуге круга.

В таком случае направленность в этой плоскости может быть вычислена по формуле

$$R_{\theta} = \sum_{k=-m}^{k=+m} \cos \left[\frac{\pi D}{\lambda} \cos (\theta + k \alpha) \right] + i \sum_{k=-m}^{k=+m} \sin \left[\frac{\pi D}{\lambda} \cos (\theta + k \alpha) \right],$$

где $2m+1$ — общее число громкоговорителей; D — диаметр дуги, по которой расположены громкоговорители; α — центральный угол между двумя соседними громкоговорителями. Для этого случая можно определить направленность и по рис. 6.4.

Пример. Пусть требуется найти звуковое давление, развиваемое группой громкоговорителей, расположенных по дуге с центральным углом 120° и хордой 0,4 м на частоте 750 Гц под углом 30° к оси группы в долях от звукового давления на последней. Диаметр такой группы $D = 0,4 / \sin(120^\circ/2) = 0,4/0,866 = 0,46$ м. Длина волны на частоте 750 Гц составляет также 0,46 м. Отсюда $D/\lambda = 1$. По характеристике с этим параметром (справа в верхнем ряду группы в) находим точку ее пересечения с направлением 30° и отсчитываем на вертикальной оси значение 0,7, что приблизительно и является искомой величиной.

Существуют и другие способы уменьшения направленности. Так, например, для тех акустических систем, где высокие частоты воспроизводятся рупорными громкоговорителями, рупоры выполняются так, что в осевом направлении внутри их устанавливаются перегородки под углом друг к другу или же так устанавливаются отдельные рупоры. Размеры этих рупоров невелики, так как они служат для излучения высоких частот.

Направленность рупорных громкоговорителей (с рупорами, построенными по экспоненциальному закону) может быть найдена с помощью экспериментально снятых характеристик, изображенных на рис. 6.5, где $\lambda_{гр}$ — граничная длина волны рупора, т. е. длина волны на той критической частоте $f_{гр}$, с которой теоретически он начинает излучать; d — диаметр устья (выходного отверстия рупора) или диаметр круга, равновеликого по площади устья, если последнее не слишком вытянуто; d/λ — отношение диаметра устья к длине волны излучаемого звука.

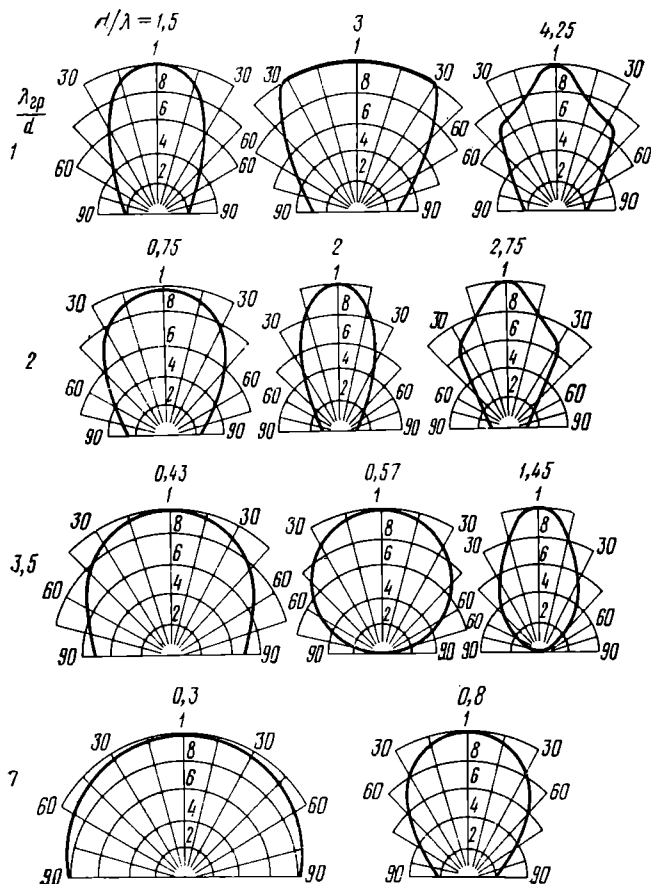


Рис. 6.5. Экспериментальная зависимость характеристики направленности экспоненциальных рупоров

Пример. Пусть требуется найти звуковое давление, развиваемое рупорным громкоговорителем с рупором, диаметр устья которого составляет 0,7 м, и рассчитанным на критическую частоту 250 Гц на частоте 375 Гц под углом 45°. Граничная длина волны $\lambda_{гр} = 343 / 250 = 1,36$ м. Отсюда $\lambda_{гр}/d = 1,36 : 0,7 = 2$. Длина волны на частоте 375 Гц будет $343/375 = 0,92$ м. Отсюда $d/\lambda = 0,7/0,92 = 0,75$. Находим в горизонтальном ряду с пометкой «2» характеристику, соот-

ветствующую $d/\lambda=0,75$ (первая слева), отсчитываем под углом 45° значения 0,6 от величины звукового давления на оси, что приблизительно и будет иско-мой величиной.

6.3. ТРЕБОВАНИЯ К ГРОМКОГОВОРИТЕЛЯМ И ТЕЛЕФОНАМ

Требования к телефонам, диффузорным и рупорным громкоговорителям приводятся в соответствующих стандартах. ГОСТ 13491—68 «Телефоны электромагнитные для телефонных аппаратов» устанавливает две категории телефонов: «Н» (нормальные) для работы в диапазоне температур $-10 \div +45^\circ\text{C}$ при влажности до $90 \pm 3\%$ и «У» (устойчивые) в диапазоне температур $-50 \div +50^\circ\text{C}$ при влажности до $95 \pm 3\%$. Полное электрическое сопротивление на частоте 1000 Гц 260 ± 52 Ом, хотя допускаются и другие величины его. Частотная характеристика телефона должна укладываться в допусковую область, изображенную на рис. 6.6а. Коэффициент гармоник на частоте 1000 Гц не должен превышать 5% при подведении мощности 1 мВ·А. Геометрические размеры телефона должны соответствовать указанным на рис. 6.6б. Требования к

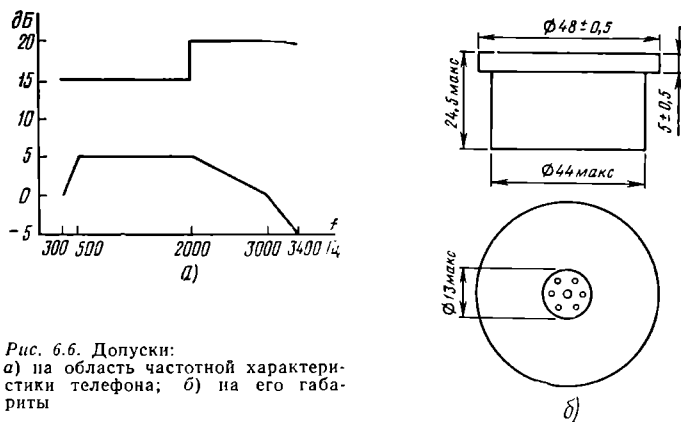


Рис. 6.6. Допуски:
а) на область частотной характеристики телефона; б) на его габариты

громкоговорителям изложены в ГОСТ 9010—73 «Головки громкоговорителей динамические прямого излучения». Громкоговорители (головки) должны выдерживать испытания на теплоустойчивость (до 60°C), влагуустойчивость (до $93 \pm 2\%$ при $+30^\circ\text{C}$), холодоустойчивость ($20-40^\circ\text{C}$), ударную устойчивость и виброустойчивость.

Надежность громкоговорителей, которая характеризуется как среднестатистическая наработка на отказ, должна быть не менее 3500 ч при номинальной мощности 0,1 Вт, 4000 ч при номинальной мощности от 0,1 до 0,5 Вт, 4500 ч при номинальной мощности от 1,0 до 5,0 Вт и 5000 ч при номинальной мощности свыше 5,0 Вт.

Стандартное звуковое давление (на расстоянии 1 м при подведении мощности 0,1 Вт) или характеристическое давление (при мощности 1 Вт), развиваемое громкоговорителем, должно быть соответственно не менее 0,2 и 0,63 Па. Оно может быть меньше для громкоговорителей, используемых в закрытых акустических системах (см. § 6.5). Частотная характеристика должна соответствовать типовой с допустимым отклонением ± 6 дБ. Если типовая частотная характеристика не указывается, то допустимая неравномерность в номинальном диапазоне не должна превышать 14 дБ.

Предусмотрены ряд номинальных мощностей: 0,1; 0,25; 0,5; 1,00; 2,00; 3,0; 4,00; 6,00; 8,00; 10,00; 15,00; 20,00; 25,00; 30,00 и 50,00 Вт и независимо от него ряд номинальных сопротивлений: 2, 4, 8, 15, 25, 50, 100, 400 и 800 Ом. Допус-

каются отклонения от этих величин сопротивлений, не превышающие ± 15 , -20% . Измерения проводятся в области частот, где модуль электрического сопротивления имеет минимальное значение, т. е. в области электромеханического

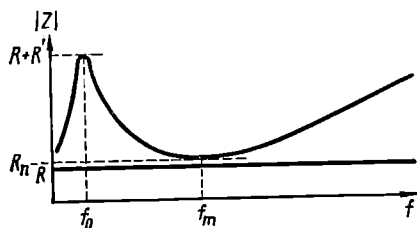


Рис. 6.7. Зависимость модуля электрического сопротивления громкоговорителя от частоты: f_0 — резонансная частота; f_m — частота электромеханического резонанса; R — сопротивление постоянного тока; R_n — сопротивление на частоте f_m ; $R+R'$ — сопротивление на частоте f_0 ; R' — вносимое активное сопротивление

го резонанса f_m (рис. 6.7). Номинальные диапазоны частот и соответствующие им предельные коэффициенты гармоник, требуемые ГОСТ 9010—73, приведены в табл. 6.1.

ТАБЛИЦА 6.1

Нормы на коэффициент гармонических искажений

Номер диапа- зона	Номиналь- ный диа- пазон частот, Гц	Суммарный коэффициент гармонических искажений при номинальной мощ- ности, %, не более, для частоты, Гц										
		63	80	125	200	400	630	1 000	2 000	4 000	6 300	8 000
1	450—3 150	—	—	—	—	—	10	7	—	—	—	—
2	315—3 550	—	—	—	—	10	10	7	—	—	—	—
3	315—5 000	—	—	—	—	10	10	7	5	—	—	—
4	200—6 300	—	—	—	—	5	5	5	5	—	—	—
5	125—7 100	—	—	—	7	5	5	5	3	—	—	—
6	100—1 000	—	—	10	7	5	5	5	3	3	—	—
7	80—12 500	—	—	10	5	5	5	3	3	3	3	—
8	63—12 500	—	15	10	5	5	5	3	3	3	3	—
9	63—5 000	—	15	10	5	5	5	3	3	—	—	—
10	63—1 000	—	15	10	5	5	—	—	—	—	—	—
11	40—5 000	20	15	10	5	5	5	3	3	—	—	—
12	40—2 500	20	15	10	5	5	5	3	—	—	—	—
13	40—1 000	20	15	10	5	5	—	—	—	—	—	—
14	30—1 000	20	15	10	5	5	—	—	—	—	—	—
15	200—5 000	—	—	—	—	5	3	3	3	—	—	—
16	1000—12 500	—	—	—	—	—	—	—	3	3	3	—
17	3000—18 000	—	—	—	—	—	—	—	—	3	3	3
18	5000—16 000	—	—	—	—	—	—	—	—	—	3	3

Установочные размеры громкоговорителей приведены в табл. 6.2 и 6.3 в соответствии с рис. 6.8.

Громкоговорители не должны дребезжать при подведении к ним синусоидального сигнала номинальной мощности в полосе частот от минимальной частоты основного резонанса до верхней частоты номинального диапазона частот.

У одного из выводов громкоговорителя по желанию потребителя наносится знак полярности в виде точки, пукли, знака «+» и т. п. Обозначение громкоговорителя (например, 1ГД-3-100) расшифровывается так: первая цифра — мощность, Вт; буквы Г, Д — громкоговоритель динамический; вторая цифра (3) — порядковый номер разработки; последняя цифра — значение резонансной частоты, Гц.

ТАБЛИЦА 6.2

Допуски¹ на установочные размеры круглых громкоговорителей

D		d ₂			l		D		d ₂			l	
	пред. откл.	d ₁	ном.	пред. откл.	ном.	пред. откл.	ном.	пред. откл.	d ₁	ном.	пред. откл.	ном.	пред. откл.
25,0*	-1	3,2	—	—	20,0	±0,5	125,0**	-3	5,0	114,0	±0,5	100,0	±0,5
31,5*	-2	3,2	—	—	25,0	±0,5	160,0**	-3	5,0	148,0	±0,5	125,0	±0,5
40,0	-2	3,2	—	—	31,5	±0,5	200,0**	-5	5,5	184,0	±0,5	160,0	±1,0
50,0	-2	3,2	—	—	40,0	±0,5	250,0**	-5	5,5	233,0	±1,0	200,0	±1,0
63,0	-2	4,3	—	—	50,0	±0,5	315,0**	-5	6,5	295,0	±1,0	250,0	±1,5
80,0	-2	5,0	—	—	80,0	±0,5							

¹ ном. — номинальные значения; пред. откл. — предельные отклонения.

* Для крепления допускается использовать диффузордержатель с ушками или без ушек и установочных отверстий.

** Предпочтительно изготовлять диффузордержатель в соответствии с рис. 6.10б.

ТАБЛИЦА 6.3

Допуски¹ на установочные размеры эллиптических громкоговорителей

A		B		d ₁	f		g	
ном.	пред. откл.	ном.	пред. откл.		ном.	пред. откл.	ном.	пред. откл.
20,0*	-1	31,5	-2	3,2	16,0	±0,5	25,0	±0,5
25,0*	-1	40,0	-2	3,2	20,0	±0,5	31,0	±0,5
35,5*	-2	50,0	-2	3,2	25,0	±0,5	40,0	±0,5
40,0	-2	63,0	-2	3,2	31,5	±0,5	50,0	±0,5
50,0	-2	80,0	-2	4,3	40,0	±0,5	63,0	±0,5
63,0	-2	100,0	-2	4,3	50,0	±0,5	80,0	±0,5
80,0	-2	125,0	-3	5,0	63,0	±0,5	100,0	±0,5
100,0	-2	160,0	-3	5,0	80,0	±0,5	125,0	±0,5
125,0	-3	200,0	-5	5,0	100,0	±0,5	160,0	±0,5
160,0	-3	250,0	-5	5,5	125,0	±1,0	200,0	±1,0
200,0	-5	315,0	-5	5,5	160,0	±1,0	250,0	±1,0
250,0	-5	400,0	-5	6,5	200,0	±1,0	315,0	±1,0

¹ ном. — номинальные значения; пред. откл. — предельные отклонения.

* Для крепления допускается использовать диффузордержатель с ушками или без ушек и установочных отверстий.

В последнее время появились международные нормы на высококачественные громкоговорители (системы) высокой верности Hi Fi. Коротко их можно сформулировать следующим образом. Номинальный диапазон частот 50—12 500 Гц. Частотная характеристика, снятая 1/3 октавными полосами розового шума, должна укладываться в допусковую область, представленную на рис. 6.9. Звуковое давление, приведенное к расстоянию 1 м при подведении рабочей мощности, должно быть не менее 1,2 Па (96 дБ). Коэффициент гармоник, определяемый как отношение среднеквадратичного звукового давления гармоник к среднему звуковому давлению (средняя линия допусковой области), не должен превышать 3% в диапазоне от 250 до 1000 Гц при подводимом синусоидальном сигнале рабочей мощности, 2% в диапазоне 1000—2000 Гц при подведении половинной мощности, 1% в диапазоне 2000—4000 Гц при подведении 1/4 мощности.

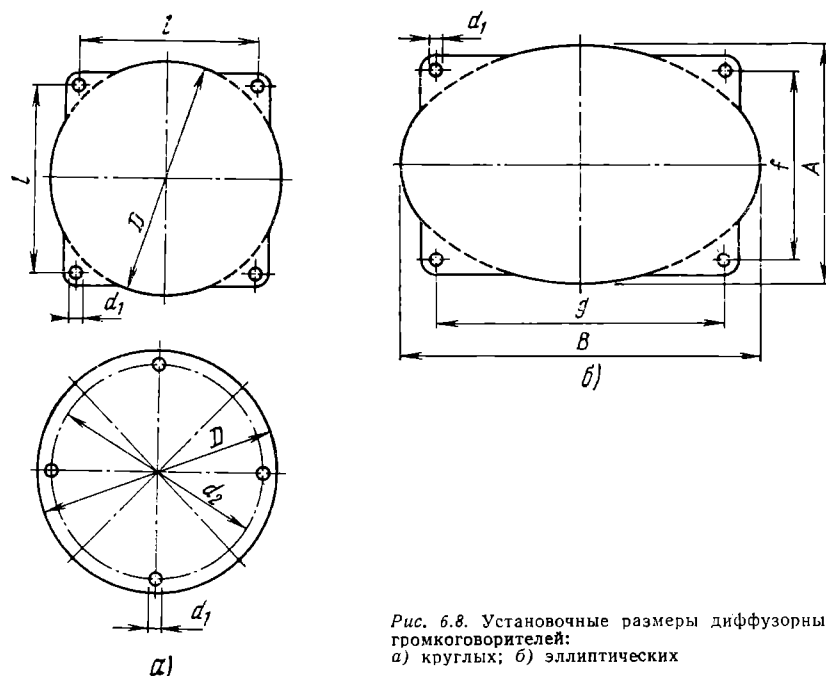


Рис. 6.8. Установочные размеры диффузорных громкоговорителей:
а) круглых; б) эллиптических

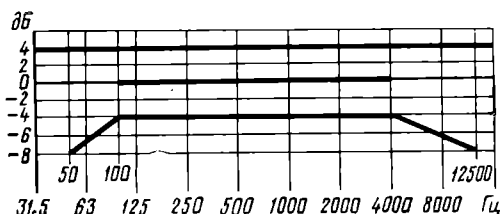


Рис. 6.9. Допусковая область частотной характеристики громкоговорителей высокого качества ($H_1 F_1$)

Частотные характеристики, снятые под углами 15° к оси (вверх, вниз, вправо, влево), не должны отличаться от осевой при совмещении их больше чем на 4 дБ. Частотные характеристики громкоговорителей для двух каналов стереофонической установки не должны расходиться между собой больше чем на 2 дБ.

Рекомендуемые величины сопротивлений 4 и 8 Ом.

Следующая группа громкоговорителей и акустических систем, требования к которым нормируются ГОСТ 5961—76, — это абонентские громкоговорители, используемые в радиотрансляционных сетях. Их электроакустические параметры приведены в табл. 6.4.

Нормированы требования и к рупорным громкоговорителям, предназначенным для звукоусиления и озвучения помещений открытых пространств (ГОСТ 12089—66). Их электроакустические параметры приведены в табл. 6.5.

Рупорные громкоговорители должны изготавливаться на номинальную мощность 10, 25, 50 и 100 Вт и иметь две ступени переключения, при которых подводимая мощность составляла бы соответственно половину и четверть от номинальной для данного типа. Предусматривается, что громкоговорители мо-

ТАБЛИЦА 6.4

Нормы на параметры абонентских громкоговорителей

Параметр	Норма по классам		
	I	II	III
Номинальное напряжение, подводимое ко входу, В	30	30	30
Номинальный диапазон частот, Гц, не уже	63—10 000	100—10 000	160—6 300
Неравномерность частотной характеристики звукового давления, дБ, не более	12	15	15
Модуль полного входного электрического сопротивления при положении регулятора громкости, соответствующем максимальной громкости, определяемый:			
при напряжении, равном 1/3 номинального.			
Ом, не менее, на частотах:			
120 кГц	4 000	4 000	4 000
78 кГц	4 000	4 000	4 000
400 Гц	1 800	3 500	5 900
80 (50)* Гц	1 700	2 800	4 700
при номинальном напряжении, Ом, не менее, на частотах:			
120 кГц	4 000	4 000	4 000
78 кГц	4 000	4 000	4 000
400 Гц	1 800	3 600	6 000
80 (50) Гц	1 800	2 900	4 800
Среднее звуковое давление, Па, не менее**:			
в номинальном диапазоне частот	0,40	0,25	0,23
300—3000 Гц	0,40	0,30	0,25
Суммарный коэффициент гармонических искажений при номинальном напряжении, %, не более, в диапазонах частот:			
от 100 до 200 Гц	7	7	—
свыше 200 до 400 Гц	4	4	5
свыше 400 Гц	3	3	3
Диапазон регулирования громкости, дБ, не менее	40	36	32
Наработка на отказ, ч, не менее		1 000	

* С 1 января 1980 г. вводятся нормы для частоты 50 Гц взамен норм для частоты 80 Гц.

** При подведении номинального напряжения.

Примечание. Для сети проводного вещания Москвы абонентские громкоговорители допускается изготавливать рассчитанными на работу при номинальном напряжении 15 В со снижением входного сопротивления в 4 раза.

ТАБЛИЦА 6.5

Нормы на параметры рупорных громкоговорителей

Параметр	Норма по классам			
	I	II	III	IV
Номинальный диапазон частот, Гц, не уже	80—10 000	100—6 300	200—4 000	500—3 550
Неравномерность частотной характеристики в номинальном диапазоне частот, дБ, не более	15	15	15	15
Коэффициент гармоник, %, не более, при номинальной мощности в установленном диапазоне частот:				
до 400 Гц вкл.	7	7	10	10
свыше 400 Гц	5	5	—	—

Примечание. Среднее стандартное звуковое давление и характеристика направленности в плоскостях малой и большой баз должны быть указаны в технических условиях на конкретный тип громкоговорителя.

гут работать от любого из следующих напряжений: 30, 120, 240 Вт. Испытываются они предварительно соответственно на напряжениях 500, 1500 и 2000 В от сети с частотой 50 Гц.

Естественно, что к рупорным громкоговорителям предъявляются требования повышенной устойчивости к климатическим факторам, ударам и вибрациям. Для проверки этого их испытывают на ударную устойчивость с ускорением $10g$, ударную прочность с ускорением $15g$, виброустойчивость с ускорением $3g$ в диапазоне частот 10—70 Гц, теплоустойчивость при $+60^{\circ}\text{C}$, на холодоустойчивость при -50°C , влагоустойчивость при влажности до $95\pm 3\%$ и на брызгозащищенность при силе дождя 5 ± 1 мм/мин.

6.4. ОПИСАНИЕ НЕКОТОРЫХ ТИПОВ ТЕЛЕФОНОВ, ГРОМКОГОВОРИТЕЛЕЙ И АКУСТИЧЕСКИХ СИСТЕМ

Телефоны

В телефонных аппаратах и переговорных устройствах широко применяется телефонный капсюль ТК-47, устройство которого представлено на рис. 6.10а.

Принцип действия электромагнитного телефона заключается в следующем. На постоянный магнитный поток магнитной системы, состоящей из постоянного магнита 2 и магнитопровода (полюсных наконечников) 3, накладывается переменный поток звуковой частоты создаваемый катушками 4, надетыми на

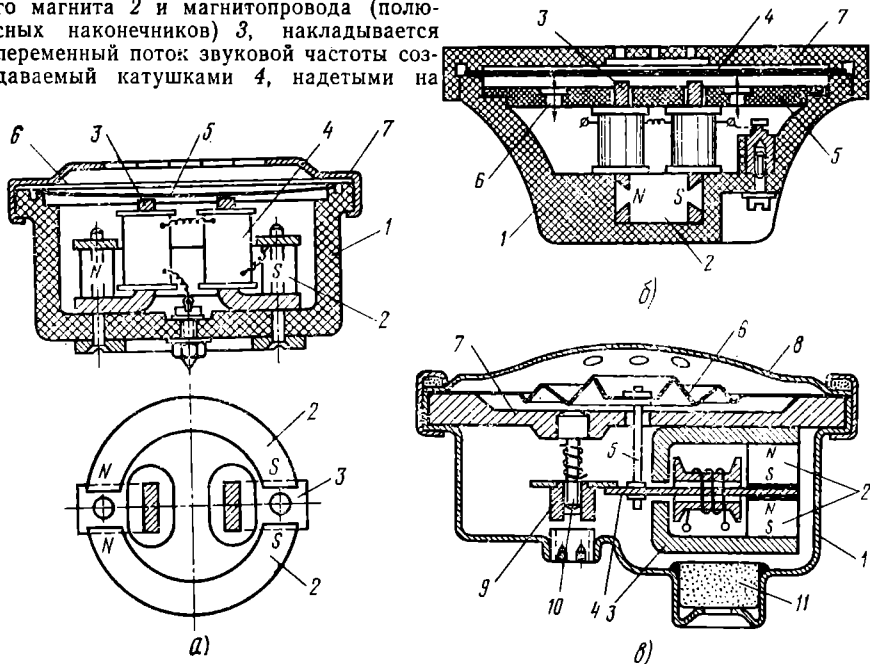


Рис. 6.10. Устройство телефона:

а) ТК-47: 1 — корпус; 2 — дугообразные магниты с полюсными наконечниками 3; 4 — катушки; 5 — ферромагнитная диафрагма, свободно лежащая на выточке в корпусе; 6 — защитный эксцельсировый диск; 7 — крышка с отверстиями, завальцованная вокруг выступа корпуса; б) ТА-4: 1 — корпус; 2 — постоянный магнит с полюсными наконечниками 3; 4 — ферромагнитная диафрагма, прижимаемая навинчивающейся крышкой 7; 5 — акустическая перегородка с двумя отверстиями 6, затянутыми шелком; в) ДЭМК-6А: 1 — герметизированный корпус; 2 — постоянные магниты; 3 — полюсные наконечники; 4 — якорь, соединенный штоком 5 с диафрагмой 6; 7 — немагнитное основание; 8 — крышка с отверстиями; 9 — гайка; 10 — винт, регулирующий положение якоря; 11 — керамическая пробка

магнитопровод. К этим катушкам подводится напряжение звуковой частоты. Перед полюсными наконечниками находится ферромагнитная диафрагма 5. При воздействии совокупности постоянного и переменного магнитных потоков, пронизывающих диафрагму, возникает сила, приводящая в колебания последнюю, так как эта сила изменяется в такт с переменным магнитным потоком. При своих колебаниях диафрагма создает звуковые колебания в ушной раковине и слуховом проходе. Устройство электромагнитного громкоговорителя отличается от описанного тем, что перед полюсными наконечниками находится не диафрагма, а якорь, приводящий в колебания скрепленную с ним диафрагму (диффузор), излучающую звук в окружающую среду. Несколько сложнее бывает и конструкция магнитной цепи.

Частотная характеристика чувствительности телефона представлена на рис. 6.11. Так как при одинаковых величинах отдачи телефоны разного сопротивления будут иметь различные величины чувствительности, то, для того чтобы иметь возможность сравнивать по отдаче телефоны разного сопротивления, используют понятие приведенной чувствительности, под которой понимают величину

$$M_{\text{пр}} = M_{\tau} \sqrt{\frac{|Z_{\tau}|}{Z_{\text{ст}}}},$$

где $M_{\text{пр}}$ — приведенная чувствительность телефона, Па/В; M_{τ} — его чувствительность; $|Z_{\tau}|$ — модуль его электрического сопротивления; $Z_{\text{ст}}$ — стандартное сопротивление, которое в телефонии принимается равным 600 Ом.

Средняя чувствительность телефона ТК-47 в диапазоне 300—3000 Гц составляет 15—17 Па/В, а сопротивление его катушек постоянному току 130 Ом. Этот телефон находит свое применение в телефонных аппаратах. В переговорных устройствах и на радиостанциях применяют телефон типа ТА-4 (рис. 6.106). Как видно из аналоговой электрической схемы этого телефона (рис. 6.12), она

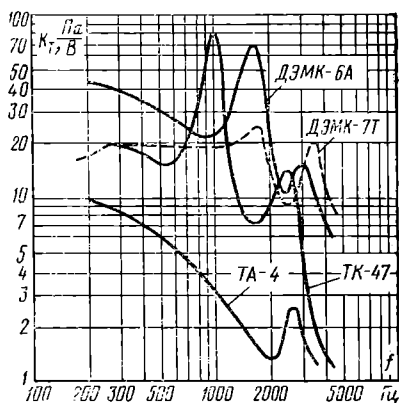


Рис. 6.11. Частотные характеристики телефонов ТК-47, ТА-4, ДЭМК-6А, ДЭМК-7Т

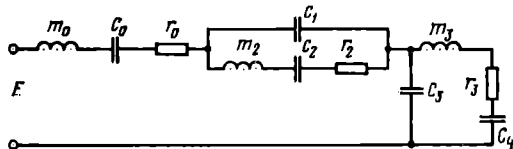


Рис. 6.12. Аналоговая электрическая схема телефона ТА-4:

m_0, c_0, r_0 — масса, гибкость, активное сопротивление диафрагмы; c_1 — гибкость воздуха в объеме под диафрагмой 4; m_2, r_2 — масса и активное сопротивление воздуха в отверстиях 6; c_2 — гибкость воздуха в корпусе, под акустической перегородкой 5; c_3 — гибкость воздуха в объеме между диафрагмой и крышкой; m_3, r_3 — масса и активное сопротивление в отверстиях крышки; c_4 — гибкость воздуха в объеме между телефоном и ухом

отображает сложный, многорезонансный контур. Поэтому частотная характеристика телефона относительно равномерна (рис. 6.11). Его средняя чувствительность в диапазоне 300—4000 Гц 3 Па/В при сопротивлении постоянному току 2200 Ом и 15 Па/В при сопротивлении 65 Ом.

Простую резонансную систему, но более сложную (дифференциальную) магнитную систему имеет телефон ДЭМК-6А (рис. 6.10а). Для того чтобы

при изменениях атмосферного давления его диафрагма не прогибалась внутрь или не выпучивалась бы, телефон снабжен керамической пробкой, пропускающей воздух, но не пропускающей влаги. Средняя чувствительность телефона 20 Па/В при сопротивлении постоянному току 130 Ом. Несколько отличается от этого телефона ДЭМК-7Т. В нем нет керамической пробки, а в основании 7 проделан ряд отверстий, что делает его эквивалентную схему многорезонансной, такой же, как и у телефона ТА-4. Электрическая эквивалентная схема телефона ДЭМК-6А такая же, как у телефона ТК-47. Частотные характеристики телефонов ДЭМК-6А и ДЭМК-7Т также приведены на рис. 6.11. При сравнительном рассмотрении этих характеристик следует иметь в виду, что они не приведены к стандартному сопротивлению 600 Ом и поэтому располагаются на разных уровнях.

Для прослушивания радиопередач, звукового сопровождения, телевидения и звукозаписей применяются другие типы телефонов преимущественно стереофонические. Большая часть типов стереофонических телефонов, выпускаемых промышленностью, — электродинамические. В качестве примера приведем конструкцию телефона ТДС-1 (рис. 6.13а).

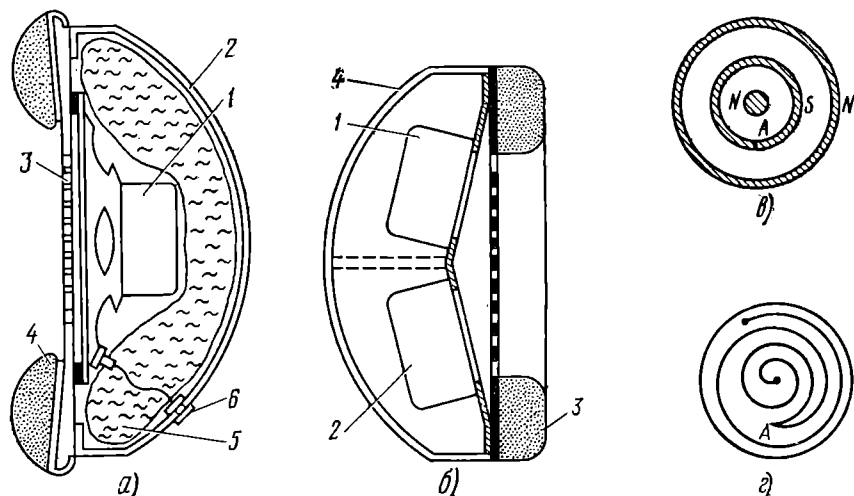


Рис. 6.13. Устройство телефона:

а) ТДС-1 (1 — малый электродинамический громкоговоритель; 2 — корпус; 3 — перфорированная решетка; 4 — мягкий амбушюр, прижимаемый к ушной раковине; 5 — звукопоглощающий материал — поролон; 6 — контакт); б) квадрафонического: 1, 2 — громкоговорители переднего и заднего каналов; 3 — амбушюр; 4 — корпус; в) и г) изодинамические

В корпусе 2 находится малый электродинамический громкоговоритель 1 с диффузором или с полусферической диафрагмой. Пространство между ним и корпусом заполнено звукопоглощающим материалом (поролоном) 5. Перед громкоговорителем находится перфорированная решетка 3. К краю корпуса примыкает мягкий амбушюр, прижимаемый к ушной раковине. Этот телефон (в паре) позволяет получить высококачественное воспроизведение, особенно низких частот, при малой подводимой мощности, обеспечивая очень хороший стереофонический эффект, и довольно надежно звукоизолирует слушателя от внешних шумов, а окружающих людей — от звуков воспроизведения.

Устройство квадрафонического телефона схематически показано на рис. 6.13б. Его основным отличием является то, что на каждое ухо воздействуют два преобразователя-громкоговорителя. Здесь 1 и 2 — соответственно громкоговорители переднего и заднего каналов (скажем, правых). Так же устроен телефон переднего и заднего левых каналов. Преобразователи передних кана-

лов располагаются прямо против входа в слуховые каналы ушей, а задних — смещены за ушную раковину, что несколько ослабляет высокие частоты. Иногда оба громкоговорителя включаются через специальный электрический контур, позволяющий подчеркнуть низкие частоты для одного преобразователя и высокие для другого.

Известны головные телефоны, построенные на электродинамическом принципе, но без применения громкоговорителей. Наиболее известный из них — так называемый изодинамический. Он состоит из магнитной системы и диафрагмы. Оригинальная магнитная система, в свою очередь, состоит из двух дискообразных магнитов, например из феррита бария, намагниченных таким образом, что каждый из них имеет три пары полюсов. Скажем, центральная часть, ограниченная окружностью, имеет полярность N , следующая кольцевая — S и наружная кольцевая — N (рис. 6.13а). Таким образом, по поверхности магнита проходят два радиальных магнитных потока. Так же намагничен и второй магнит. Магниты по всей своей плоскости перфорированы, для того чтобы обеспечить проход звука через отверстия при колебаниях диафрагмы из синтетической пленки, натянутой между магнитами на равных расстояниях от поверхности каждого из них. На пленку нанесен проводник в виде спирали. В том месте, где встречаются противоположно направленные потоки (окружность, проходящая через точку A на рис. 6.13г), витки спирали начинают идти в обратном направлении.

Таким образом сохраняется одно и то же взаиморасположение магнитного поля и электрического тока. Благодаря тому что диафрагма такого телефона возбуждается по всей поверхности, он очень эффективен, имеет весьма равномерную частотную характеристику и ничтожные нелинейные искажения.

Некоторое распространение в настоящее время получили электростатические телефоны (см. рис. 6.2а). Между двумя неподвижными перфорированными пластинами для пропускания звука пластинами 2, 2 находится подвижная пластина 1, подсоединенная к одному из выводов источника постоянного напряжения (напряжения поляризации), величина которого практически бывает в среднем 100 В. Другой вывод источника напряжения поляризации присоединен к средней точке вторичной обмотки трансформатора, к выводам которой присоединены неподвижные пластины. Первичная обмотка трансформатора присоединена к выходу усилителя. Все пластины находятся в корпусе, снабженном амбушуром, как и другие типы телефонов (рис. 6.14а). Конструкции телефонов предус-

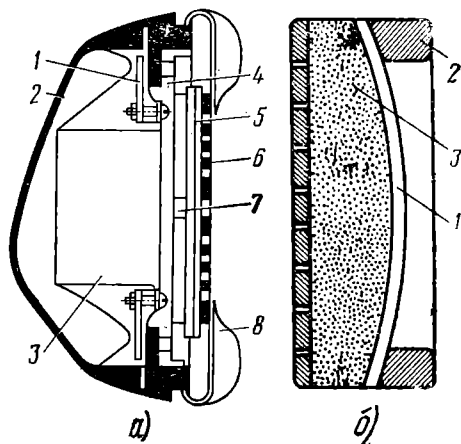


Рис. 6.14. Телефоны:

а) электростатический: 1 — крепление капсюля; 2 — корпус; 3 — капсуля; 4 — внутренний объем; 5 — защитная мембрана; 6 — защитная решетка; 7 — отверстие в прокладке; 8 — мягкий амбушюр; б) пьезоэлектрический: 1 — диафрагма; 2 — мягкий амбушюр; 3 — мягкая подушка из поронлеста, закрытая с задней стороны перфорированной пластинкой

матривают, чтобы напряжение поляризации не могло попасть на слушателя. Электростатический телефон обладает высокими качественными показателями.

ТАБЛИЦА 6.6

Основные параметры отечественных телефонов

Тип	Частотный диапазон, Гц	Модуль электрического сопротивления, Ом	Отдача средняя, Па	Габариты, мм	Масса, кг	Назначение
Электромагнитные						
ТК-67-Н	300—3 400	260	8—14	Ø48×25	0,06	В телефонных аппаратах
ТКЭД-7	300—3 400	260	14—21	Ø48×24,5	0,06	То же
ТА-4	300—4 000	65	15	Ø51×24,5	0,06	То же, и аппарата связи
ТК-47	300—3 000	2200	3	Ø42×14	0,035	То же
ТА-56М	300—3 000	300, 600	15—17	Ø24×21,5	0,15 на па-ру	В аппаратуре связи с оголовьем
ТГ-7М	300—3 000	10 000	5,5—10	Ø65×180×125 с оголовьем	0,17 на па-ру	—> —
ТГ-9	200—6 000	5 000 на пару	8—14 на 1 В	Ø42×165×135 с оголовьем	то же	—> —
ТОН-2	300—3 000	12 000 на пару	6	Ø15×22	0,01	В радиоприемниках, трансляционных сетях с регулятором громкости
ТМ-4	300—3 000	50	4	Ø22×11,7	0,02	В радиоприемниках, вкладывается в ушную раковину
ТМ-2	300—3 000	450	1,7			В аппаратуре связи и слуховых аппаратах с заушным держателем
ТМ-3			4,5			
ДЭМ-4М	300—3 000	600	на 1 В	Ø55×30	0,160	Обратимый, в аппаратуре связи
Электродинамические						
ТДК-1	100—5 000	160	10 на 1 В	Ø52×26	0,115	В аппаратуре связи
ТД-6	100—5 000	140	10 на 1 В	Ø52×26	0,110	Измерительный, для контроля звукозаписи
12А-25	40—16 000	60	6 на 1 В		0,365	Для контроля звукозаписи
ТДС-1	40—16 000	10	2 на 1 В		0,5	Стереофонический (максимальная мощность 0,5 Вт)

В последнее время в связи с разработкой пьезоэлектрических синтетических пленок появились пьезоэлектрические телефоны. Фирма Пайонир применяет для своих телефонов пленку поливинилиденфлуорид. Эту пленку можно делать разной толщины (от 8 до 30 мкм). Она имеет малую жесткость и удовлетворительные пьезоэлектрические параметры. Конструкция пьезоэлектрического телефона на основе пленки изображена на рис. 6.14б. Качество этого телефона достаточно высокое. При этом он не требует напряжения поляризации. Параметры наиболее распространенных телефонов приведены в табл. 6.6.

Электродинамический громкоговоритель

Наиболее распространенная конструкция обычного электродинамического громкоговорителя показана на рис. 6.15.

В кольцевом воздушном зазоре магнитной цепи, состоящей из постоянного магнита 1 и магнитопровода 2, 3, 4, в радиальном направлении проходит постоянный магнитный поток. В этом зазоре помещается так называемая звуко-

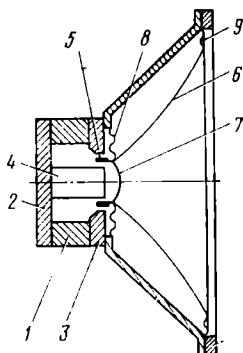


Рис. 6.15. Устройство электродинамического громкоговорителя:

1 — магнит (кольцевой); 2 — нижний фланец; 3 — верхний фланец; 4 — полусферический наконечник (кern); 5 — звуковая катушка; 6 — диффузор; 7 — колпачок; 8 — центрирующая шайба; 9 — подвес

вая катушка 5, к которой приложено переменное напряжение звуковой частоты. Ток, проходя через катушку, взаимодействует с постоянным потоком и создает силу, приводящую в колебания катушку и скрепленную с ней диафрагму (диффузор) 6. Диффузор, обычно бумажный, представляет собой конус, имеющий в основании окружность или эллипс и прямую или криволинейную образующую. По внешнему краю диффузор имеет гофрированный подвес 9. Назначение подвеса — создать диффузору возможность колебаться поршнеобразно в более широком диапазоне частот и увеличить диапазон линейной зависимости сила — смещение диффузора. У своей вершины диффузор, а вместе с ним звуковая катушка удерживаются в коаксиальном относительно зазора магнитной цепи положении с помощью центрирующей шайбы 8. Эта шайба большей частью также гофрированная, охватывает по внутреннему контуру вершину диффузора и звуковую катушки, а по внешнему — крепится к специальному кольцу.

Магниты изготавливают из материала с большой магнитной энергией. В СССР в настоящее время в основном используются три вида материалов (см. § 4.6). Это — феррит бария марки 2БА для изготовления прессованных кольцевых магнитов. Материал имеет максимальную удельную магнитную энергию $2 \cdot 10^6$ Гс·Э. В последнее время начали выпускать, хотя и в незначительном объеме, магниты из материала 3,2БА, в который входит стронций. Его максимальная удельная магнитная энергия составляет $3,2 \cdot 10^6$ Гс·Э, т. е. в 1,6 раза больше, чем у 2БА, что дает возможность при равном объеме магнита получать индукцию в зазоре примерно в $\sqrt{3,2/2} = 1,25$ раза большую или же иметь магнит в 1,6 раза меньшего объема.

Для литых магнитов применяют сплавы ЮНДК-24 и ЮНДК-25БА. Из первого, имеющего максимальную удельную магнитную энергию $4 \cdot 10^6$ Гс·Э, отливают магниты либо в форме колец (полых цилиндров), либо в форме цилиндров, используемых конструктивно как керны. Иногда эти керны отливают с суженной в форме гриши верхней частью для уменьшения утечки магнитного потока. Магниты лют также из сплава ЮНДК-25БА с максимальной магнитной энергией $6,4 \cdot 10^6$ Гс·Э. Магниты из него лют только керновые. Экономически выгоднее прессованные магниты, несмотря на то что они имеют меньшую удельную магнитную энергию. Кроме того, в них не входят дефицитные материалы. Но поскольку они составляют внешнюю часть магнитной системы, то вокруг громкоговорителей, частью которых они являются, наблюдается заметный поток рассеяния, что недопустимо при применении этих громкоговорителей в телевизорах, где этот поток утечки искажает «картинку», в радиоприемниках с магнитной антенной, где он изменяет настройку, и в магнитофонах, где при близком расположении от магнитной ленты он «зашумляет» последнюю. Эти соображения следует иметь в виду при выборе громкоговорителя для того или иного применения. Детали магнитопровода (флашцы, керн, если он не является магнитом, полюсный наконечник) желательно делать из магнитно-мягкого материала с возможно большой магнитной проницаемостью для уменьшения сопротивления магнитному потоку. Несмотря на то что такие материалы выпускаются (например, пермендюр), из экономических и технологических соображений применяют обычные малоуглеродистые стали СТ-3 и СТ-10, не применяя термической обработки (отжига) деталей из них.

Звуковую катушку изготавливают из медного провода марки ПЭЛ. Витки ее скрепляют между собой и каркасом (обычно из кабельной бумаги) клеем. Редко для звуковых катушек высокочастотных громкоговорителей для уменьшения массы катушки применяют алюминиевый провод.

Диффузор является важнейшей частью громкоговорителя. Его форма и материал оказывают большое влияние на характеристики громкоговорителя. В настоящее время наиболее употребительным материалом для него является сульфатная или сульфитная целлюлоза, в некоторых случаях с определенными добавками. Диффузоры изготавливают методом литья (осаждения) водной суспензии размолотых волокон целлюлозы на сетку, имеющую форму диффузора. После просушивания диффузоры подвергают уплотнению путем их прессования. В более дешевых громкоговорителях вместе с диффузором отливается и подвес, конструктивно являющийся его частью, но имеющий меньшую толщину. В более дорогих громкоговорителях подвес изготавливают из специальных сортов резины или латекса.

Конструкции диффузорных электродинамических громкоговорителей, вообще говоря, сходны между собой, имея лишь некоторые конструктивные различия. Поэтому опишем ниже лишь некоторые их типы отечественного производства а именно: низкочастотный 25ГД-26, высокочастотный 2ГД-36 и громкоговоритель широкого применения 2ГД-38. Громкоговорители зарубежных фирм ввиду незначительного их применения в СССР здесь не рассматриваются.

Громкоговоритель типа 25ГД-26 (рис. 6.16) диаметром 200 мм предназначен для применения в качестве низкочастотного звена излучающих акустических систем. В его магнитной системе используется магнит кольцевой формы 1 из сплава ЮНДК-24. В воздушном зазоре магнитной системы находится звуковая катушка 4 диаметром 40 мм с обмоткой в два слоя из 85 витков медного провода 0,27 ПЭЛ. Катушка приклеена к круглому бумажному диффузору с криволинейной образующей 2. Примерно в этом же месте с внешней стороны диффузор охватывается плоской гофрированной центрирующей шайбой 5, назначение которой — фиксировать положение системы звуковая катушка — диффузор в коаксиальном положении, чтобы предотвратить затирание катушки в воздушном зазоре. Выводы от нее, выполненные из многожильного провода, идут на контактную планку 6, помещенную на диффузородержателе 8. По внешнему периметру диффузор приклеен к кольцевому подвесу 7, отпрессованному из резины на основе натурального каучука. Поперечный профиль

подвеса — полуокружность. По внешнему периметру подвес приклеивается к диффузордержателю. По внутреннему периметру диффузора несколько выше линии приклеивания катушки к нему приклеен колпачок 3, имеющий фор-

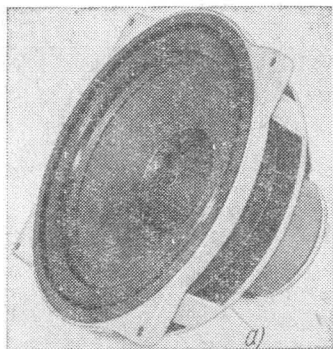
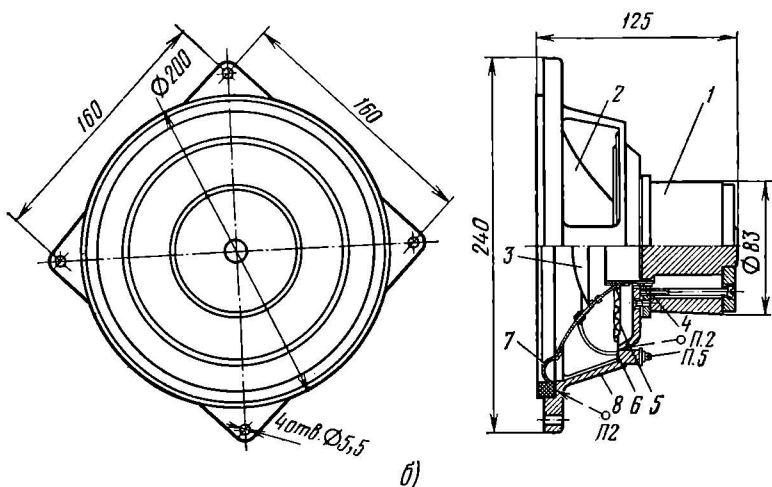


Рис. 6.16. Громкоговоритель низкочастотный 25ГД-26:
а) внешний вид; б) устройство



му шарового сегмента и предназначенный для защиты от попадания в воздушный зазор пыли. Кроме того, он способствует выравниванию частотной характеристики в области 2000—5000 Гц. Все основные параметры громкоговорителя приведены в табл. 6.7.

Высокочастотный громкоговоритель 2ГД-36 имеет (рис. 6.17) эллиптическую форму с размерами осей 50×80 мм. Он предназначен для применения в излучающих акустических системах, в основном в закрытых. В его магнитной системе используется магнит керновой формы из сплава ЮНДК-24. Звуковая катушка имеет диаметр 15 мм и намотана проводом ПЭЛ 0,1. Диффузор имеет криволинейную образующую и гофрированный подвес с поперечным профилем в виде синусоиды, отлитый вместе с диффузором. Основные параметры громкоговорителя приведены в табл. 6.7.

Громкоговоритель 2ГД-38 (рис. 6.18) предназначен для широкого применения в открытых излучающих акустических системах радиоприемников, телевизоров, магнитофонов, проигрывателей и т. е. Он имеет эллиптическую форму

с размерами осей 160×100 мм. В его магнитной цепи используется керновый магнит из сплава ЮНДК-24. Диаметр звуковой катушки 15 мм; намотана она проводом ПЭЛ 0,1; 75 витков. Подвес его, отливаемый совместно с диффузо-

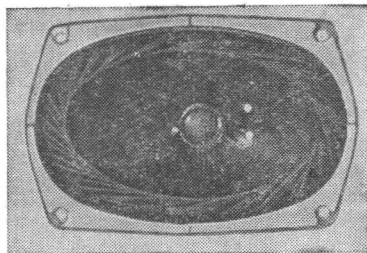
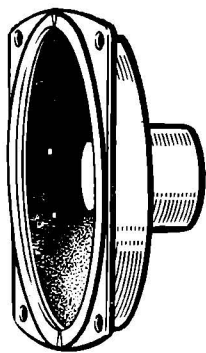


Рис. 6.17. Громкоговоритель высокочастотный 2ГД-36

Рис. 6.18. Громкоговоритель 2ГД-38

ром, имеет тангенциальный поперечный профиль. Основные параметры громкоговорителя приведены в табл. 6.7.

Довольно широкое применение для целей озвучения, командной и диспетчерской связи имеют рупорные громкоговорители. Устройство электродинамического рупорного громкоговорителя отличается от устройства диффузорного тем, что либо к диффузору примыкает рупор, назначение которого в данном случае — служить концентратором и, следовательно, увеличивать звуковое давление на оси рупора, либо со звуковой катушкой скрепляют диафрагму, которая обычно имеет куполообразную форму, а по периферии — гофрированный подвес. Диафрагма через акустическую камеру, представляющую собой объем воздуха с входным сечением, равным поверхности диафрагмы S_d , своим выходным сечением примыкает к горлу рупора, имеющему площадь S_0 . Эта камера играет роль акустического трансформатора с коэффициентом трансформации S_0/S_d , согласующего механическое сопротивление подвижной системы громкоговорителя с входным механическим сопротивлением рупора, являющимся, по существу, сопротивлением нагрузки. Поскольку конструктор имеет возможность изменять коэффициент трансформации в широких пределах, то можно выбрать такой режим нагрузки подвижной системы, при котором будут достигнуты выгодные условия передачи энергии колебаний рупору. В качестве примера их конструкции рассмотрим широко распространённый громкоговоритель 10ГРД IV-5 (рис. 6.19а). Устройство его головки показано на рис. 6.19б.

Аналоговая электрическая схема этого громкоговорителя представлена на рис. 6.19а, где через $n = S_0/S_d$ обозначен коэффициент акустической трансформации камеры; S_d — площадь диафрагмы; S_0 — площадь горла рупора; r — его сопротивление излучения, приведенное к горлу; m_0 , c_0 — масса и гибкость подвижной системы; c_1 — гибкость воздуха в камере. Параметры громкоговорителя приведены в табл. 6.8.

Примером рупорного громкоговорителя без камеры или, как его иначе называют, громкоговорителя с широкогорлым рупором, является громкоговоритель 25ГРДШ-2 (рис. 6.20а). У него прямой (не свернутый) рупор примыкает прямо к диффузору подвижной системы. Увеличение звукового давления на оси по сравнению с диффузорным громкоговорителем достигается здесь только из-за концентрации звуковой энергии рупором.

Из других типов рупорных громкоговорителей, выпускаемых промышленностью, отметим еще громкоговоритель 10ГРД-6ИГАС (рис. 6.20б), 25ГРД IV-5

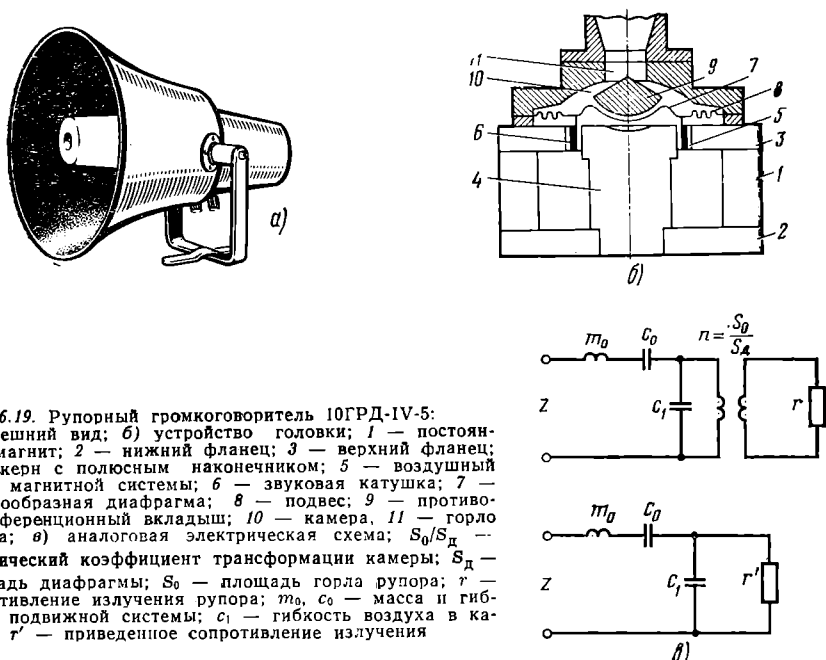


Рис. 6.19. Рупорный громкоговоритель 10ГРД-IV-5: а) внешний вид; б) устройство головки; 1 — постоянный магнит; 2 — нижний фланец; 3 — верхний фланец; 4 — Kern с полюсным наконечником; 5 — воздушный зазор магнитной системы; 6 — звуковая катушка; 7 — куполообразная диафрагма; 8 — подвес; 9 — противоинтерференционный вкладыш; 10 — камера; 11 — горло рупора; в) аналоговая электрическая схема; S_0/S_d — акустический коэффициент трансформации камеры; S_d — площадь диафрагмы; S_0 — площадь горла рупора; r — сопротивление излучения рупора; m_0, c_0 — масса и гибкость подвижной системы; c_1 — гибкость воздуха в камере; r' — приведенное сопротивление излучения

(рис. 6.20а), 25ГРД-7ВЗГ (рис. 6.20з). Первый из них предназначен для использования в искробезопасных системах громкоговорящей связи в условиях, опасных по содержанию газов и пыли. Характерной чертой его конструкции является блок, наполненный стальными шариками, устанавливаемый в горле рупора. Эти шарики не препятствуют прохождению звуковых колебаний, но противодействуют возможности проникновения во вне искры, которая может возникнуть в электрической цепи громкоговорителя и вызвать взрыв в окружающей среде. Громкоговоритель 25ГРД IV-5 предназначен для использования в помещениях, где имеются запыленность и химически агрессивные вещества, способные разрушить детали громкоговорителя и, в первую очередь, его подвижную систему. Громкоговоритель 25ГРД-7ВЗГ предназначен для применения в помещениях с взрывоопасными средами. Его конструкция рассчитана на устойчивость при взрыве. Технические данные всех этих громкоговорителей даны в табл. 6.8.

Кроме конструктивно завершенных изделий, какими являются описанные выше рупорные громкоговорители, имеются их типы, входящие в качестве составных элементов в ряд систем. Так, например, основной электромегафона ЗПЭМ-5 (рис. 6.21), служащего для передачи команд и т. п., является электродинамический громкоговоритель мощностью 3 Вт со свернутым рупором. Он имеет неравномерность частотной характеристики 10 дБ в номинальном диапазоне 710—3150 Гц и развивает среднее стандартное звуковое давление в номинальном диапазоне не менее 1,2 Па, следовательно, при полной мощности 6,5 Па на расстоянии 1 м. Его сопротивление на частоте 1000 Гц равно $20 \text{ Ом} \pm 10\%$.

Особое внимание в конструкции электромегафона уделяется выбору и размещению микрофона, что очень важно для предотвращения акустической обратной связи в системе микрофон — усилитель — громкоговоритель — воздух. С этой целью в электромегафоне применен микрофон ДЭМШ, который укреплен так, что рот говорящего находится перед ним в непосредственной близости, го-

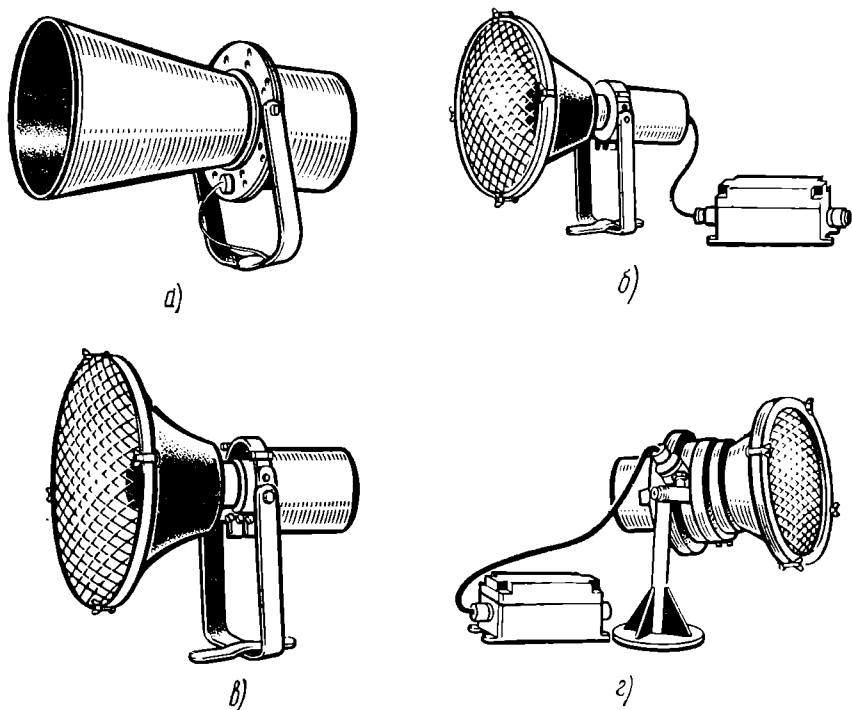


Рис. 6.20. Рупорные громкоговорители:

а) 25ГРД-III-2; б) 10ГРД-6 ИГАС; в) 25ГРД-IV-5; г) 25ГРД-7ВЗГ

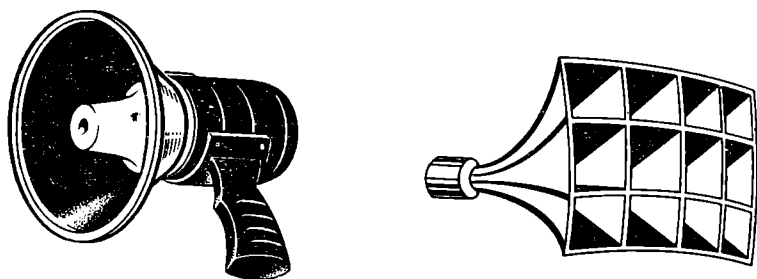


Рис. 6.21. Электромегатон 3ПЭМ-5

Рис. 6.22. Высокочастотное звено двухполосной акустической системы

раздо ближе устья рупора громкоговорителя. Кроме того, ось рупора находится в плоскости нулевой чувствительности микрофона. Все это и обеспечивает отсутствие акустической обратной связи.

Применяются рупорные громкоговорители и в качестве высокочастотных звеньев многополосных акустических систем. На рис. 6.22 в качестве примера приведен внешний вид высокочастотного звена двухполосной акустической системы для кинотеатров. Обращает на себя внимание, что отдельные рупоры собраны здесь в «соты» и их устья располагаются по сферической поверхности. Это сделано для расширения характеристики направленности, без чего изобра-

женный комплект высокочастотных рупоров излучал бы звук узким пучком, и поэтому для всех направлений, отличных от осевого, уровень высоких частот относительно низких был бы очень малым.

Динамические диффузорные головки громкоговорителей, как правило, не применяются без акустического оформления, необходимого для получения от них удовлетворительных результатов.

Причиной этого является то, что при колебаниях диффузора без оформления сгущения воздуха, образуемые одной его стороной, нейтрализуются разрежениями, образуемыми другой его стороной. Применение же какого-либо оформления удлиняет путь колебаний воздуха между передней и задней сторонами диффузора, вследствие чего фазы соответствующих колебаний отличаются уже не на 180° , а на меньший угол, благодаря чему указанной выше нейтрализации колебаний не наступает. Это особенно важно на низких частотах, где размеры диффузора слишком малы по сравнению с длиной волны. Поэтому применение оформлений сильно увеличивает эффективность излучения на низких частотах. По конструкции оформлений, образующих совместно с громкоговорителем акустические системы, их можно разделить на встроены и выносные. Встроенные системы отличаются тем, что один или несколько громкоговорителей устанавливаются в том аппарате, оконечным звеном которого они являются. Такими системами обладает большинство типов радиоприемников, магнитофонов, проигрывателей. Выносные системы, как указывает их название, представляют собой отдельную конструкцию, включаемую электрически на выход одного из вышеперечисленных аппаратов, или усилитель низкой частоты, в свою очередь являющийся оконечным электрическим звеном электроакустического тракта.

По области применения выносные системы можно разделить на абонентские громкоговорители радиотрансляционных сетей проводного вещания, акустические системы бытовой радиоэлектронной аппаратуры, звуковые колонки, имеющие в основном профессиональное применение. Для профессиональных целей находят применение и так называемые радиальные громкоговорители, предназначенные для ненаправленного в горизонтальной плоскости излучения.

Устройство абонентских громкоговорителей просто. На передней стенке обычно прямоугольного корпуса укрепляется громкоговоритель. Для абонентских громкоговорителей III класса, в основном выпускаемых промышленностью, применяется громкоговоритель типа 3,5ГД42, ранее 1ГД-30. На переднюю или боковую стенку выходит ручка регулировки громкости, включаемая в первичную (высокоомную) обмотку трансформатора, подключенную к абонентской сети. Во вторичную (низкоомную) обмотку включается громкоговоритель. Внутренний объем корпуса абонентского громкоговорителя — от 2 до 4 л. Внутренний объем громкоговорителя II класса — от 4 до 6 л.

В качестве примера акустических систем бытовой аппаратуры приведем систему (десятиваттной малогабаритной акустической системы) 10МАС-1 (рис. 6.23). Она состоит из деревянного корпуса внутренним объемом 18 л, заполненного ватой (для демпфирования нежелательных резонансов объема воздуха внутри корпуса). На передней стенке корпуса установлены низкочастотный громкоговоритель 10ГД-30 и высокочастотный громкоговоритель 3ГД-31. Оба они включены через упрощенный разделительный фильтр. Частота деления 3500—4500 Гц. Основные параметры акустической системы приведены в табл. 6.9.

В качестве примера звуковых колонок опишем звуковую колонку 15КЗ-1, предназначенную для воспроизведения в основном речи на открытом воздухе (рис. 6.24). В ее металлическом кожухе на общей доске по вертикали установлены четыре диффузорных электродинамических громкоговорителя типа 4ГД-8Е. В кожухе установлен трансформатор с отводами, выведенными на плату. Благодаря возможности переключения можно использовать колонку на 5, 10 и 15 Вт при линейном напряжении сети 30 или 120 В. Колонка комплектуется поворотным устройством, позволяющим изменять наклон ее рабочей оси.

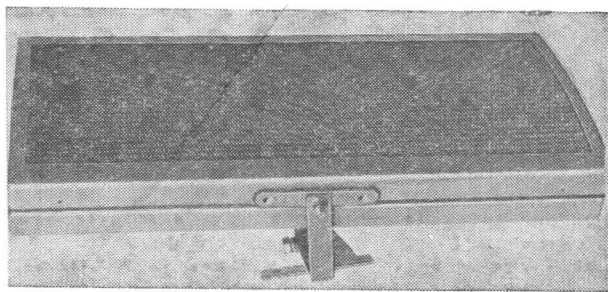
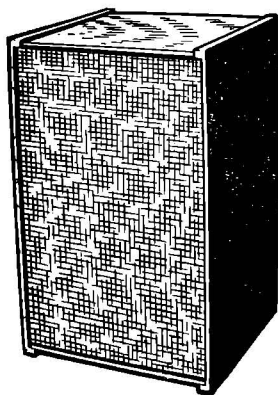


Рис. 6.24. Звуковая колонка 15КЗ-1

← Рис. 6.23. Акустическая система 10МАС-1

Благодаря ее большому стандартному звуковому давлению колонка может обеспечить довольно высокий уровень при минимальной мощности—111 дБ, что позволяет использовать ее для озвучения сравнительно больших площадей и на довольно большие расстояния—до 30—40 м при умеренных уровнях окружающего шума. Основные параметры колонки приведены в табл. 6.10. Устройство радиального громкоговорителя показано на рис. 6.25. В круглом кожухе с рымом наверху для подвеса заключены четыре диффузорных громкоговорителя, расположенных под углами 90° друг к другу. Под основным кожухом находится также круглый отражатель, назначение которого—сделать более равномерной характеристику направленности в вертикальной плоскости. Технические данные радиальных громкоговорителей даны в табл. 6.8.

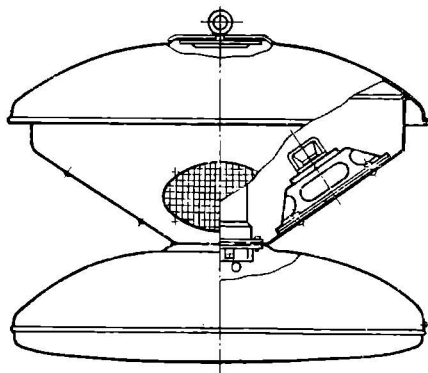


Рис. 6.25. Радиальный громкоговоритель: а) устройство и б) внешний вид

Эксплуатация акустических излучающих систем не представляет каких-либо затруднений. Следует лишь следить, чтобы они использовались в тех климатических условиях, которые указаны в технической документации на них. В агрессивных, взрывоопасных и искробезопасных средах можно применять лишь те громкоговорители, работа которых в этих условиях оговорена в их технических условиях. Естественно, что следует

о бер е г а т ь акустические системы от механических повреждений и не подводить к ним напряжение, большее того, на которое они рассчитаны.

Специфическими повреждениями громкоговорителей и акустических систем являются повреждения диффузора или куполообразной диафрагмы. Если они просто помяты, то лучше всего восстановить их форму путем всасывания ртом воздуха через трубочку, другой конец которой приставить к поврежденному месту. Если же в диафрагме или диффузоре образовалось отверстие, то на него нужно положить заплату: на гофр—из тонкой (промокательной) бумаги, наклеенной с помощью резинового клея, а на коническую часть диффузора или диафрагму—из бумаги типа кабельной, приклеенной клеем БФ-4 или АК-20. Если оборвались выводы от звуковой катушки, то припаявать их нужно осторожно, следя за тем, чтобы канифоль или припой не растекались по

Т А Б Л И Ц А 6.7
Основные параметры отечественных диффузорных электродинамических громкоговорителей

Тип	Паспортная мощность, Вт	Номинальные		Диапазон час- тот, Гц	Неравномер- ность характе- ристики, дБ	Стандартное звуковое дав- ление, Па	Габариты, мм (в плане)	Высота, мм	Масса, кг	Вид магнит- ной системы
		мощность, Вт	сопротив- ление, Ом							
0,25ГД-10	0,5	0,25	8	315-5 000	15	0,2	63×63	29,5	0,028	Закрыва- тая
0,5ГД-30	1,0	0,5	15	125-10 000	по т. х.	0,3	80×125	47	0,19	—
0,5ГД-31	1,0	0,5	15	200-10 000	—	0,23	80×125	42	0,19	—
0,5ГД-37	1,0	0,5	8	315-7 000	15	0,3	80×80	37,5	0,135	—
1ГД-39Е	1,5	1,0	8	200-6 300	по т. х.	0,2	100×100	36	0,20	Открытая
1ГД-37	1,5	1,0	8	100-10 000	12	0,25	100×160	65	0,27	Открытая
1ГД-40Р	1,5	1,0	8	140-10 000	12	0,28	100×160	45	0,25	Открытая
1ГД-48	2,0	1,0	8	100-10 000	12	0,3	100×160	63	0,27	Закрыва- тая
2ГД-38	3,0	2,0	4	100-12 500	12	0,2	100×160	58	0,28	—
2ГД-40	3,0	2,0	4	100-12 500	12	0,28	100×160	47	0,32	Открытая
3ГД-32	6,0	3,0	4	80-12 500	12	0,3	125×200	77	0,52	Закрыва- тая
3ГД-38Е	5,0	3,0	4	80-12 500	по т. х.	0,2	160×160	55	0,29	Открытая
3ГД-40	5,0	3,0	4	80-12 500	—	0,3	160×160	58	0,3	—
4ГД-8Е	6,0	4,0	4	125-7 100	—	0,3	125×125	49	0,62	—
4ГД-35	8,0	4,0	4/12	63-12 500	—	0,25	200×200	74	0,90	—
4ГД-36	8,0	4,0	4/12	63-12 500	—	0,2	200×200	85	0,65	Закрыва- тая
10ГД-36	15,0	10,0	4	63-20 000	—	0,2	200×200	87	1,40	Открытая
15ГД-11	30,0	15,0	4/8	250-5 000	—	0,2	125×125	75	1,25	—
Низкочастотные										
6ГД-6	20,0	6,0	4	63-5 000	15	0,1	125×125	80	1,5	Открытая
10ГД-30Е	25,0	10,0	8	63-5 000	15	0,15	240×240	116	2,4	—
10ГД-34	25,0	10,0	4	63-5 000	по т. х.	0,1	125×125	173	1,25	Открытая
23ГД-26	50,0	25,0	4	40-5 000	—	0,12	200×300	125	2,5	Закрыва- тая
30ГД-1	70,0	30,0	4/8	30-1 000	—	0,15	250×350	151	6	Открытая
Высокочастотные										
0,5ГД-36	0,7	0,5	10	1 000-16 000	16	0,15	80×80	34,5	0,08	Закрыва- тая
1ГД-3	1,0	1,0	12,5	5 000-18 000	10	0,3	70×70	33	0,18	Открытая
2ГД-36	3,0	2,0	8	3 000-20 000	12	0,2	50×80	35	0,09	—
3ГД-2	6,0	3,0	15	5 000-18 000	10	0,25	63×63	31	0,20	—
3ГД-31	5,0	3,0	8	3 000-18 000	15	0,2	100×100	48	0,3	—
3ГД-11	10,0	6,0	8	3 000-20 000	по т. х.	0,2	50×50	48	0,33	Закрыва- тая
10ГД-35	15,0	10,0	15	5 000-25 000	12	0,25	100×100	47	1	Открытая
9ГД-13	10,0	6,0	8	3 000-20 000	12	0,3	100×100	45	1	—

По т. х. — по типовой частотной характеристике.

ТАБЛИЦА 6.8
Основные параметры отечественных рупорных и радиальных громкоговорителей

Тип	Номинальные		Модуль сопро- тивления, В	Частотный диапазон, Гц	Неравно- мерность частотной характери- стики, дБ	Среднее стан- дартное звуко- вое давление, Па	Габариты, мм	Масса, кг	Назначение
	мощно- сть, Вт	напря- жение, В							
Рупорные									
10 ГРД IV-5	10	30 120 240	90 1440 5760	300—3 550	15	1,5	1524×476×390	8	Для озвучения
10 ГРД IV-6	10	30 120 240	90 1440 5760	500—3 550	15	1,5	374×333×420	9	Для установки на метал- лургических заводах, шахтах, химических предприятиях, пылесо- стойкий Искробезопасный
10 ГРД-6ИГАС	3	6,5	14 (при напря- жении 6,5 В)	500—3 550	15	1,25	374×333×420	6	Для озвучения
25 ГРД-III-2	25	30 120 240	36 576 2304	200—4 000	15	0,8 в диапа- зоне 200— 2000 Гц	530×410×735	13	Для озвучения
25 ГРД IV-5	25	30 120 240	36 576 2304	500—3 550	15	1,5	317×333×415	12	Там же, где и 10 ГРД IV-6
25 ГРД7 ВЗГ	10	30 120 240	90 1440 5760	500—2 000	18	1,2	400×446×352	22	Взрывобезопасный
50 ГРД III-8	50	30 120 240	36 576 2304	200—4 000	15	0,7 в диапа- зоне 200— 2000 Гц	550×410×270	17	Для озвучения
100 ГРД III-1	100	30 120 240	90 1440 5760	200—4 000	15	1,5 в диапа- зоне 200— 4000 Гц	1167×896×740 и 1018×714×740 в двух вари- антах уста- новки	43	То же
Радиальные									
10 ГДН-1	10	30 120 240	90 1440 5760	80—8 000	16	0,18	Ø620×520	15	— — —
25 ГДН-1	25	30 120 240	36 576 2304	80—8 000	16	0,25	Ø788×667	26	— — —

ТАБЛИЦА 6.9
Основные параметры отечественных акустических систем

Тип	Типы и число комплектующих громкоговорителей	Частотный диапазон, Гц	Неравномерность частотной характеристики, дБ	Среднее стандартное звуковое давление, Па	Номинальное электрическое сопротивление, Ом	Габариты, мм	Вид акустического оформления системы	Масса, кг	Мощность, Вт	
									номинальная	максимальная
3АС-3	3ГД-38×1	125—10 000	18	0,2	4	376×260×190	Открытая	3	3	4
4АС-1	4ГД-43×1 3ГД-31×1	125—10 000	18	0,2	4	172×272×100	—>—	4	4	8
6АС-2	6ГД-6×1 3ГД-2×1	63—18 000	20	0,1	4	168×163×300	Закрытая	4	6	20
6АСЛ-1	6ГД-6×1 3ГД-31×1	63—20 000	15	0,11	4	168×423×284	—>—	4,5	6	12
6АСШ-2	6ГД-6×1 6ГД-11×1	100—12 500	15	0,09	4	Ø190	Закрытая сферическая	3,5	6	12
6МАС-4	10ГД-34×1 3ГД-22×1	63—18 000	18	0,1	4	160×260×190	Закрытая	4	6	20
8АС-3	4ГД-35×2	100—10 000	14	0,25	2	470×270×170	Открытая	5	8	16
10МАС-1М	10ГД-30×1 3ГД-31×1	63—20 000	18	0,15	8	425×272×234	Закрытая	8,5	10	15
15АС-1	6ГД-6×2 3ГД-31×1	63—20 000	18	0,11	8	240×395×160	—>—	7	15	25
20АС-1	4ГД-43×4 3ГД-31×2	63—18 000	18	0,35	4	680×430×220	—>—	12	20	30
20АС-2	10ГД-30×2 3ГД-31×4	40—18 000	18	0,15	4	630×340×125	—>—	20	20	40
35АС-1	30ГД-1×1 15ГД-11×1	30—20 000	18	0,1	4	360×695×275	Фазоинвертор	27	35	70
50АС-5	10ГД-35×1 30ГД-1×2 15ГД-11×2 10ГД-35×1	20—20 000	20	0,1	4	900×472×290	—>—	42	50	100

Т А Б Л И Ц А 6.10

Основные параметры отечественных звуковых колонок

Тип	Тип и число комплек- тующих громкогово- рителей	Частотный диапазон, Гц	Неравно- мерность частотной характе- ристики, дБ	Среднее стандарт- ное звуко- вое давле- ние, Па	Габариты,	Материал оформления	Масса, кг	Номинальная мощность, Вт
2КЗ-5	0,5ГД-31×4 (0,5ГД-30×4) 4ГД-8ЕХ4	300—7 000	15	0,45	684×120×73	Металл	3,8	2
15КЗ-1		200—5 000	15	0,6	643×335×245	— » —	10	25; 12,5; 6,25
15КЗ-2	4ГД-8ЕХ4	200—5 000	15	0,6	730×274×118	Дерево	10	25; 12,5;
15КЗ-4	4ГД-8ЕХ4	200—5 000	15	0,6	725×274×100	— » —	10	6,25
15КЗ-5	4ГД-43×4 3ГД-31×2	80—12 500	15	0,3	301×651×179	— » —	11	25; 12,5; 6,25
15КЗ-8	10ГД-21×1	80—10 000	15	0,5	476×1368×292	— » —	15	25; 12,5; 6,25
15КЗ-8А	10ГД-22×2 25ГД-18-22×2	80—10 000	15	0,9	394×1360×264	Металл	40	50,25
50КЗ-3М	25ГД-21×2		15	0,7	394×1480×290	— » —	45	100
100КЗ-7	25ГД-21×2	100—10 000	15	0,4	362×1193×291	— » —	25	100
100КЗ-11	25ГД-18-22×2 25ГД-25×4	100—10 000	15	0,5	362×1623×320	— » —	15	25; 12,5; 6,25
25КЗ-5	10ГД-21×1	80—10 000	15	0,5	270×1433×320	— » —	15	25; 12,5; 6,25
25КЗ-6	10ГД-22×2	80—10 000	15	0,5	340×300×230	Дерево	15	25; 12,5; 6,25
8КЗ-4	10ГД-21×1 10ГД-22×2	150—8 000	15	0,85	320×307×260	— » —	7,5	2, 4, 8
2КЗ-6	4ГД-47×2 1ГД-42×2	300—7 000	15	0,85	188×423×124	— » —	3,7	2
2КЗ-7	0,5ГД-30×4	300—7 000	15	0,5	132×94×394	— » —	4	2
6КЗ-2	3ГД-42×2	160—18 000	15	0,4	600×120×75	Металл	7	6,25
15КЗ-8	3ГД-42×5	160—18 000	15	0,6	520×230×140	Дерево	10	15; 7,5; 3,75
25КЗ-12	10ГД-36×3	63—16 000	18	0,3	670×280×140	— » —	26	25; 12,5; 6,25
25КЗ-7	25ГД-21×2 10ГД-35×4	80—14 000	18	0,5	730×280×240	— » —	45	25; 12,5; 6,25
50КЗ-5	10ГД-21×3 10ГД-35×6	80—14 000	18	0,6	974×340×280	Металл	60	50, 25
100КЗ-13	25ГД-18-22×4	80—10 000	18	0,7	1260×340×280	— » —	60	100

Примечание. В графе комплектующих громкоговорителей указаны их типы, не включенные в табл. 6.7. Это объясняется тем, что они выпускаются только для комплектации акустических систем и в продажу не поступают.

проводнику. В противном случае проводник потеряет гибкость и скоро сломается.

При подведении слишком большого напряжения катушка может сгореть или с каркаса могут сползти витки, что заклинивает катушку в зазоре. Ремонт при этом получается сложный, поэтому громкоговорители дешевых типов лучше просто заменить. Дорогие громкоговорители (низкочастотные) лучше ремонтировать в специализированных предприятиях.

6.5. РАСЧЕТЫ И КОНСТРУКЦИИ АКУСТИЧЕСКИХ ОФОРМЛЕНИЙ

Плоский экран

Наиболее простой вид оформления — плоский экран. Даже при сравнительно небольших его размерах воспроизведение низких частот значительно улучшается. Вместе с тем в области средних и особенно высоких частот экран уже не оказывает существенного влияния. Конструктивно экран рекомендуется выполнять в виде толстой доски или фанеры толщиной 10—20 мм, в которой вырезано отверстие по диаметру диффузородержателя громкоговорителя. В это отверстие последний и вставляется. Экран выполняют квадратной или лучше прямоугольной формы. Предпочтительное отношение сторон прямоугольника (ширина к высоте) в пределах от 2:1 до 3:1. Что касается абсолютных размеров экрана, желательно, чтобы на нижней границе диапазона частот, который акустическая система должна воспроизводить (за которую целесообразно принять резонансную частоту громкоговорителя), эквивалентный диаметр экрана (диаметр круга, площадь которого равна площади экрана) $D = 0,5\lambda_0/Q$, где λ_0 — длина звуковой волны на нижней граничной частоте диапазона; Q — добротность головки громкоговорителя на резонансной частоте (см. § 6.1). При таких размерах экрана частотная характеристика получится наиболее равномерной. Если экран не может быть сделан таких размеров, то следует на нижней граничной частоте диапазона ожидать спада $N = 20\lg(D/D_1)$, где D — вычисленный по вышеприведенной формуле диаметр; D_1 — фактический диаметр.

Пример. Резонансная частота громкоговорителя 85 Гц. Его добротность 2. Требуется определить величину спада на резонансной частоте, если по конструктивным соображениям фактически эквивалентный диаметр равен 0,5 м.

Определяем желательный диаметр экрана $D = 0,5(343:85 \cdot 2) = 1\text{ м}$. При диаметре 0,5 м спад на нижней граничной частоте $N = 20\lg(1:0,5) = 6\text{ дБ}$.

Размещать громкоговоритель рекомендуется в случае прямоугольного экрана в его центре. Смещение от центра уменьшает величину развиваемого звукового давления и ухудшает частотную характеристику. Для квадратных экранов некоторое смещение места установки головки несколько улучшает частотную характеристику, хотя одновременно и снижает величину звукового давления. Следует еще остановиться на том, как «врезать» головку в экран. Здесь настоятельно рекомендуется выполнять это так, чтобы передняя плоскость диффузородержателя (обычно поверхность картонных секторов) была «заподлицо» с передней плоскостью экрана. В противном случае перед громкоговорителем образуется цилиндрическое углубление (род короткой трубы). Столб воздуха, находящийся в нем, может резонировать на ряде частот и тем самым ухудшать частотную характеристику и качество звучания акустической системы. Наконец, следует учесть, что громкоговоритель в экране, по существу, является открытым и поэтому может легко покрываться пылью. Во избежание этого необходимо спереди закрывать громкоговоритель какой-либо радиотканью, удерживаемой металлической рамкой (круглой, эллиптической, прямоугольной), притягиваемой к экрану шурупами. Следует при этом обратить серьезное внимание, чтобы ткань была натянутой и ни в коем случае не резонирувала, что можно обнаружить на глаз или на ощупь, подавая на громкоговоритель напряжение меняющейся частоты от звукового генератора. Сзади, со

стороны магнитных цепей, на громкоговоритель рекомендуется надевать «юбочку», например, из бязи.

Встречаются описания акустических систем, в которых громкоговоритель вставляется в отверстие в стене комнаты, т. е. стена является экраном. Принципиально такое конструктивное решение выгодно, но при этом не надо забывать, что звучание акустической системы будет иметь место не только в той комнате, в которой акустическая система предназначена работать, но и в той, куда выходит задняя сторона громкоговорителя, что, конечно, не всегда желательно. Если же такое решение возможно, то оно дает заметное улучшение частотной характеристики и качества звучания, особенно на низких частотах. Разумеется, что и в этом случае остаются в силе все вышеприведенные рекомендации по «врезанию» громкоговорителя теперь уже в стену. Дополнительно «мешочек» сзади головки следует делать побольше (например, в виде полусферы с диаметром, равным диаметру громкоговорителя) и набить его хлопчатобумажной ватой, что предохранит от нежелательных резонансов. Естественно, что такую полусферу надо как-то замаскировать, чтобы она не портила вида той комнаты, в которую она выходит.

Открытый корпус

Распространенным видом акустического оформления является открытый. Он представляет собой ящик, у которого задняя стенка или полностью отсутствует, или же имеет ряд сквозных отверстий (например, из перфорированного картона, пластмассовая со щелями или отверстиями и т. д.). Громкоговорители устанавливаются обычно на передней стенке ящика. Его внутренний объем, как правило, используется для размещения деталей электрической схемы, например, приемника. Акустическое действие открытого оформления подобно действию экрана. Наибольшее влияние на частотную характеристику акустической системы с открытым оформлением оказывают передняя стенка (считается передней та, на которой установлен громкоговоритель) и ее размеры. Вопреки распространенному мнению боковые стенки открытого оформления влияют на характеристику акустической системы мало. Таким образом важен не внутренний объем оформления, а площадь передней стенки. Размеры ее (эквивалентный диаметр передней стенки) из-за влияния боковых можно делать на 25—40% меньше размеров экрана. Конечно, если оформление сделать очень глубоким, то оно может начинать действовать как труба, резонирующая на ряде частот, тем более низких, чем больше длина трубы. Естественно, это является нежелательным, поскольку такие резонансы явятся причиной появления пиков и провалов на частотной характеристике акустической системы. Кроме нежелательности большой глубины открытого оформления, оно должно удовлетворять еще некоторым требованиям. Прежде всего, следует избегать каких-либо отверстий и щелей в акустическом оформлении (за исключением отверстий или щелей в задней стенке). Особенно опасны они на передней стенке как причины акустического «короткого замыкания» и как причины, которые могут привести к резкому ухудшению восприятия низких частот. Поэтому, в частности, рекомендуется устанавливать громкоговорители на передней стенке с уплотнением в виде кольцевой прокладки из резины, пленки и т. п. между диффузородержателем и передней стенкой. Уплотнением могут служить и картонные сектора, обычно располагающиеся на диффузородержателе. Но тогда надо уплотнить щели между ними. Громкоговоритель надо притягивать к стенке винтами или шурупами, но не очень сильно, чтобы не покоробить диффузородержателя и тем самым не вызвать перекоса подвижной системы, что может привести к нелинейным искажениям и явиться причиной дребезга. Задняя сторона громкоговорителя не должна быть закрыта, как это часто делают, деталями схемы, не должна «задышаться». Несоблюдение этого требования приводит к снижению звукового давления, развиваемого акустической системой. Можно рекомендовать, чтобы детали схемы не занимали более 25—30% внутреннего объема.

ма оформления. Размеры передней стенки, как уже говорилось при рассмотрении работы акустического экрана, желательно иметь как можно больше. Ограничением здесь являются только соображения удобства размещения и пользования. Что касается места установки головки на передней панели и соотношения ширины и высоты последней, то тут рекомендации такие же, как и в случае плоского экрана. Площадь перфорации или щелей в задней стенке должна составлять 10—20% от всей площади этой стенки.

Конфигурация оформления оказывает большое влияние на форму частотной характеристики на средних частотах, вызывая появление многочисленных пиков и провалов в случае неудачной формы. Это хорошо видно из рассмотренных графиков рис. 6.26, где приведены частотные характеристики для разных

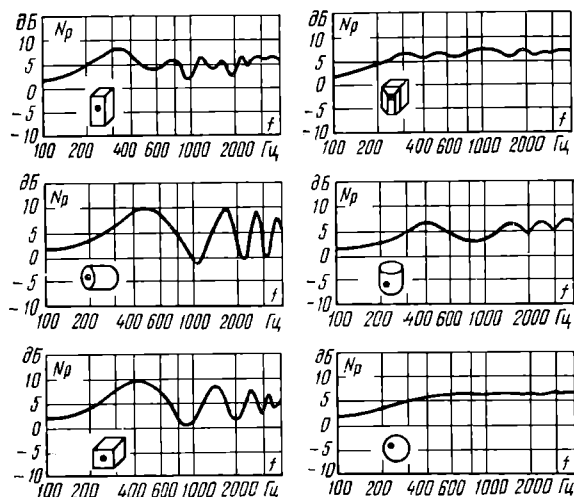


Рис. 6.26. Частотные характеристики в корпусах различной формы

конфигураций оформления: сферического (шара), куба, усеченной пирамиды, параллелепипеда. Эти характеристики сняты при условии, что скорость колебаний подвижной системы головки не изменяется при изменении частоты (что практически, конечно, не соблюдается). Видно, что наиболее благоприятной формой является сфера. Приведенные характеристики следует иметь в виду при выборе конфигурации оформления, хотя исходя из конструктивных соображений редко можно применить благоприятную форму из числа изображенных на рис. 6.26. Из эстетических соображений размеры оформления в виде параллелепипеда часто выбирают так, чтобы размеры лицевой стороны и глубина относились друг к другу, как 2: $\sqrt{2}$:1.

Материал оформления должен обеспечивать жесткость стенок, особенно передней. Наиболее подходящим материалом являются деревянные доски или фанера, тем более толстая, чем больше размеры оформления. Так, например, для оформления объемом 5—10 л можно использовать доску или фанеру толщиной 10—12 мм. Для оформления объемом 50—60 л следует делать стенки толщиной до 20 мм. Переднюю панель оформления, на которой крепятся громкоговорители, во всех случаях желательно брать не тоньше 15—20 мм. Кроме дерева и фанеры, широко применяется пластмасса.

Корпус с лабиринтом

Для того чтобы избежать акустического «короткого замыкания», в свое время было предложено акустическое оформление с лабиринтом. Один из возможных вариантов его конструкции ясен из рис. 6.27. Изображенная акустическая система состоит из корпуса, на передней панели которого укреплен громкоговоритель. Задняя сторона диффузора работает на образованный рядом перегородок зигзагообразный звукопровод — лабиринт. Второй конец лабиринта заканчивается выходным отверстием на одной из стенок корпуса. Поперечное сечение лабиринта — обычно прямоугольное или круглое. Величина площади этого сечения делается примерно равной площади диффузора. Выпрямленную длину лабиринта желательно делать равной примерно половине длины волны на низкой граничной частоте акустической системы, благодаря чему излу-

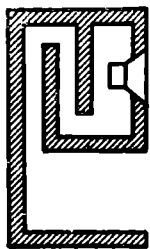


Рис. 6.27. Устройство акустической системы с лабиринтом

чения из выходного отверстия лабиринта будут совпадать по фазе с излучением передней стороны диффузора. Так, если акустическая система должна воспроизводить звук с 50 Гц (длина волны 6,8 м, половина длины волны 3,4 м), то желательно, чтобы выпрямленная длина лабиринта равнялась также 3,4 м. Конечно, если лабиринт будет иметь больше колен, то конструктивная глубина корпуса акустической системы будет соответственно меньше. Внутренние стенки лабиринта желательно покрывать звукопоглощающим материалом, например слабо набитыми и простеганными ватными матами. Однако конструкции акустических систем с лабиринтом являются довольно громоздкими, вследствие чего редко применяются, несмотря на то, что от них можно получить неплохие результаты.

Закрытый корпус

Очень большое распространение в последние годы приобрели закрытые системы. Преимущество их заключается в том, что задняя поверхность диффузора не излучает и, таким образом, полностью отсутствует акустическое «короткое замыкание». Но закрытые системы имеют другой недостаток. Он заключается в том, что при колебаниях диффузора он должен преодолевать дополнительную упругость воздуха в объеме ящика. Наличие этой дополнительной упругости приводит к тому, что повышается резонансная частота подвижной системы громкоговорителя, в результате чего ухудшается воспроизведение частот, лежащих ниже этой частоты. Чтобы эта резонансная частота все же не была чрезмерно высокой, применяют головки громкоговорителей с тяжелой подвижной системой, что позволяет снизить резонанс, как это следует из формулы

$$f'_0 = \frac{1}{2\pi} \frac{1}{\sqrt{m_0 c_0}} \sqrt{1 + \frac{c_0}{c}} = f_0 \sqrt{1 + \frac{V_0}{V}},$$

где f'_0 — резонансная частота системы; c_0 — гибкость закрепления подвижной системы; c — гибкость воздуха в закрытом объеме V оформления; m_0 — масса подвижной системы; V_0 — эквивалентный объем; f_0 — резонансная частота головки. Однако следует иметь в виду, что увеличение массы подвижной системы влечет за собой понижение чувствительности акустической системы в целом. Особенно небольшой является чувствительность у так называемых малогабаритных акустических систем (МАС), упругость объема воздуха внутри оформления которых существенно больше, чем упругость закрепления подвиж-

ной системы. Величина стандартного звукового давления для них определяется формулой $p_{ст} = 2,65 \cdot 10^{-3} \sqrt{f_0 V / Q}$, где f_0 — резонансная частота подвижной системы головки, установленной в закрытое оформление объемом V ; Q — добротность системы на этой частоте. Не рекомендуется выбирать добротность выше 0,7—1,0, так как подвижная система при этом получается «раздемпфированной». Это значит, что при ее возбуждении, т. е. при подаче на нее напряжения музыкальной или речевой программы, она, помимо того, чтобы колебаться в такт с этим напряжением, будет колебаться и с частотой собственных колебаний, близкой к резонансной частоте. Для слушателя это будет проявляться в том, что к звучанию программы будет примешиваться звучание этой частоты как своего рода «гудение», «нечистота низов». Таким образом, будут иметь место своеобразные искажения, носящие названия переходных. Эти искажения еще плохо слышны, пока добротность не превышает единицы. Вместе с тем необходимо отметить, что чем меньше величина добротности, тем больше спад частотной характеристики на резонансной частоте. Так, при добротности 0,707 он составляет 3 дБ, а при добротности 0,5 он составляет уже 6 дБ (рис. 6.28). Естественно, что такой спад характеристики во избежание ухудшения воспроизведения низких частот необходимо корректировать в усилителе низкой частоты. При наличии же такой коррекции система с уменьшенной добротностью дает существенно лучшее качество звучания.

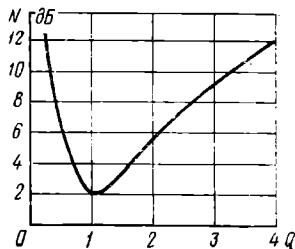


Рис. 6.28. Зависимость величины неравномерности частотной характеристики закрытой акустической системы от ее добротности

Конструктивно закрытые системы надо выполнять так, чтобы отсутствовали какие-либо щели и отверстия, наличие которых сразу же может превратить закрытую систему в открытую. Что касается установки громкоговорителей и выбора материалов и толщины стенок, то тут должны соблюдаться те же требования, какие были перечислены в случае открытых систем. Размеры оформления рекомендуется брать возможно больше, однако нет смысла делать объем его (в m^3) существенно больше величины, определяемой формулой

$$V = \frac{\rho c^2 S^2}{23,2 f_0^2 m} = 6,5 \cdot 10^8 \frac{S^2}{f_0^2 m},$$

где f_0 — резонансная частота подвижной системы головки громкоговорителя без оформления; m — масса подвижной системы в кг; S — площадь диффузора в m^2 .

Если объем оформления будет больше, то это скажется лишь незначительно на снижении резонансной частоты акустической системы в оформлении выбранного объема. Что касается минимально допустимого внутреннего объема, то он выбирается исходя из того, чтобы добротность акустической системы не превысила допустимой величины добротности из-за повышения резонансной частоты. Добротность акустической системы определяется через добротность головки как $Q_1 = Q \sqrt{1 + V_0/V}$. Отсюда минимально допустимый внутренний объем закрытого оформления $V = V_0 / (Q_1^2 / Q^2 - 1)$.

Пример. Пусть надо найти минимальную величину объема закрытого оформления для громкоговорителя с резонансной частотой 40 Гц, добротностью 0,5 и эквивалентным объемом 50 л при допустимой максимальной добротности акустической системы 1,0:

$$V = \frac{50}{(1/0,5)^2 - 1} = \frac{50}{3} \approx 17 \text{ л.}$$

При этом резонансная частота системы $f'_0 = f_0 \sqrt{1 + 50/17} = 80$ Гц. Спад характеристики (см. рис. 6.28) на этой частоте будет 2 дБ. Естественно, может слу-

читься, что при таком объеме оформления получающаяся резонансная частота будет слишком высокой. Тогда нужно увеличивать объем до получения нужного значения резонансной частоты. Для того чтобы уменьшить резонансные явления внутри оформления, можно рекомендовать набивку его звукопоглощающим материалом. Наиболее доступным материалом является хлопчатобумажная вата, которую следует равномерно распределить по внутреннему объему оформления из расчета примерно 15 г на 1 л внутреннего объема. Если материал (вата) располагается только на задней стенке ящика с внутренней стороны, то достаточно применять его в количестве 2—3 г на 1 л внутреннего объема. Чтобы предохранить подвижную систему от попадания в нее волокон ваты, рекомендуется громкоговоритель перед его установкой заключить в чехол, например, из бязи.

Корпус с фазоинвертором

Стремление получить достаточно хорошее воспроизведение низких частот при умеренном объеме акустического оформления довольно хорошо достигается в так называемых фазоинверсных системах (зарубежное название бас-рефлекс). Их конструкция достаточно проста. В корпусе закрытой системы делается щель или отверстие. В последнее может быть вставлена трубка (рис. 6.29а). На рис. 6.29б приведена аналоговая электрическая схема фазоинверто-

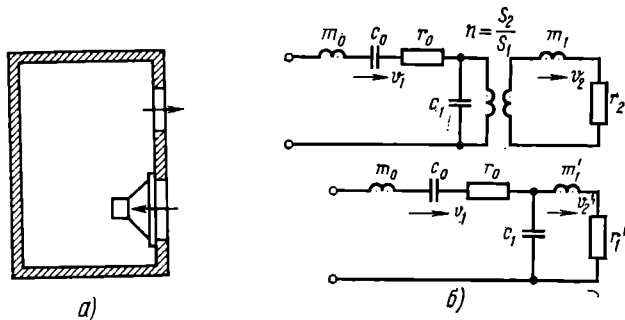


Рис. 6.29. Акустическая система с фазоинвертором:
а) устройство; б) исходная и приведенная аналоговые электрические схемы

ра. На ней m_0 , c_0 , r_0 — масса, гибкость и активное сопротивление подвижной системы громкоговорителя; c_1 — гибкость воздуха внутри корпуса системы; m_1 , r_1 — масса и активное сопротивление (в том числе сопротивление излучения) щели, отверстия или трубки фазоинвертора. Упругость объема воздуха в оформлении резонирует на какой-то частоте с массой воздуха в отверстии или трубке. Эта частота называется резонансной частотой фазоинвертора. Таким образом, акустическая система в целом становится состоящей как бы из двух резонансных систем — подвижной системы громкоговорителя и оформления с отверстием. При этом подвижная система громкоговорителя ведет себя как электрический последовательный резонансный контур, а фазоинвертора — как параллельный. При правильно выбранном соотношении резонансных частот этих систем воспроизведение низких частот значительно улучшается по сравнению с закрытыми и открытыми акустическими системами с таким же объемом оформления. Это объясняется тем, что на частотах выше резонансной частоты фазоинвертора скорость колебаний частот в отверстии (или трубке) сдвинута по фазе от скорости колебаний задней стороны диффузора подвижной системы. Это, конечно, более благоприятно для излучения звука, чем в случае открытой системы, когда от передней и задней сторон ее проходят колебания, сдвинутые по фазе на 180° друг относительно друга.

Несмотря на очевидные преимущества акустических систем с фазоинвертором, очень часто такие системы, изготовленные даже опытными людьми, не дают ожидаемых от них результатов. Причина этого заключается в том, что для получения необходимого эффекта фазоинвертор должен быть правильно рассчитан и настроен. Для правильного выбора соотношений параметров фазоинвертора можно пользоваться рис. 6.30. На нем нанесены кривые отношения резонансной частоты фазоинвертора $f_{\text{в}}$ к резонансной частоте громкоговорителя f_0 , кривая добротности головки громкоговорителя на резонансной частоте Q и кривая отношения частоты f_3 , на которой получается спад к низким частотам частотной характеристики в 3 дБ, к резонансной частоте громкоговорителя f_0 . Все эти величины даны в зависимости от величины отношения V_0/V эквивалентного объема громкоговорителя к объему оформления.

Пример. Пусть дан громкоговоритель с эквивалентным объемом 17 л, резонансной частотой 40 Гц и добротностью 0,375. Восстанавливаем перпендикуляр из точки на оси ординат (слева) с отметкой 0,375; этой точке соответствует абсцисса $V_0/V=1,4$. Отсюда объем оформления $V=V_0/1,4=17/1,4=12$ л. По кривым f_3/f_0 и $f_{\text{в}}/f_0$ аналогично отсчитываем (по правой шкале ординат) $f_3/f_0=1$ и $f_{\text{в}}/f_0=1$. Таким образом, спад частотной характеристики на 3 дБ будет на частоте $f_3=f_0$, т. е. на 40 Гц. Резонансная частота фазоинвертора будет также равна 40 Гц (в данном частном случае). Сделаем фазоинвертор с трубкой. Максимальное значение диаметра трубки ограничивается тем, что определенная по формуле ее длина должна быть не больше $1/12$ длины волны на резонансной частоте. Кроме того, трубка своим другим концом не должна упираться в стенку, противоположную той, в которой она укреплена. Этот конец должен отстоять от стенки не менее чем на 4 см. Трубка (если она применяется) конструктивно может быть выполнена проще всего из картона или пресс-шпана, накрученного на клею на какой-то круглый стержень в несколько слоев. Можно сделать трубку и квадратной так, чтобы площадь квадрата равнялась площади круга выбранного диаметра. В этом случае ее можно собрать из толстой фанеры также на клею и врезать в оформление.

Размеры трубки определяются по формуле

$$\frac{4l + 3,4d}{d^2} = \frac{c^2}{4\pi V f_0^2},$$

где, помимо введенных выше обозначений, d — диаметр отверстия или трубки; l — длина трубки (или толщина стенки в случае отверстия).

При расчете по этой формуле нельзя забывать, что все величины следует подставлять в единицах одних и тех же систем. Например, все в линейных, квадратных, кубических метрах или сантиметрах, объем соответственно в кубических метрах или кубических сантиметрах, скорость звука в метрах в секунду или сантиметрах в секунду. Как видно из формулы, диаметр трубки (или отверстия) и ее длина могут находиться в разных соотношениях, удовлетворяя при этом написанной формуле. Если делается не трубка, а отверстие, то рекомендуется делать его диаметр возможно больше и никак не меньше половины диаметра громкоговорителя.

Вычислим размеры трубки. Для нашего объема 12 л и резонансной частоты 40 Гц $(4l + d)/d^2 = 343^2/(4\pi 12 \cdot 10^{-3} \cdot 40^2) = 4,9 \cdot 10^2$. Зададимся диаметром трубки 0,05 м (5 см). Тогда длина ее будет $l = (4,9 \cdot 10^2 \cdot 25 \cdot 10^{-4} - 3,4 \cdot 5 \cdot 10^{-2}) = 0,262$ м. Такая длина трубки существенно меньше $1/12$ длины волны на 40 Гц (8,6 м).

Рупорные системы

Применение рупора, нагружающего подвижную систему громкоговорителя, очень сильно (в добрый десяток раз) улучшает коэффициент полезного действия последнего и таким образом дает возможность получить достаточную вели-

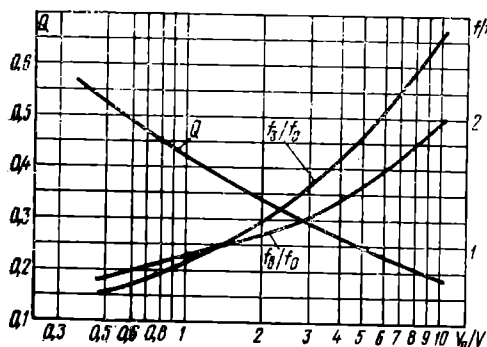


Рис. 6.30. График для расчета фазоинвертов

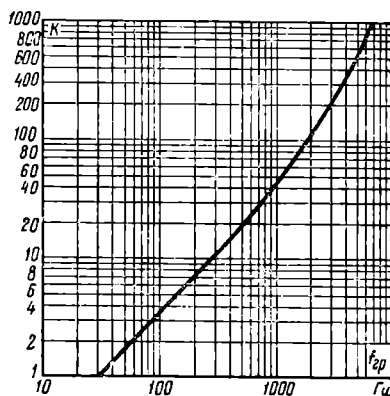


Рис. 6.31. Зависимость величины процентного приращения площади поперечного сечения рупора на 1 см осевой длины его

чину звукового давления и, следовательно, и громкость при сравнительно небольшой мощности усилителя. Формой рупора, обеспечивающей наилучшее воспроизведение низких частот, является так называемая экспоненциальная. При этой форме поперечное сечение рупора увеличивается на одинаковую процентную величину через каждую единицу его осевой длины. Величина этого процентного приращения определяет нижнюю граничную частоту рупора. На рис. 6.31 представлена зависимость величины процентного приращения поперечного сечения на 1 см осевой длины от нижней граничной частоты. Так, например, чтобы получить нижнюю граничную частоту 60 Гц, площадь поперечного сечения рупора должна увеличиваться на 2% через каждый сантиметр его осевой длины. Эту зависимость можно представить и в виде формулы $f_{гp} = 6,25 \cdot 10^3 \lg(0,01\kappa + 1)$, где κ — величина приращения площади поперечного сечения в процентах. Для процентных приращений κ , меньших 20%, и следовательно для граничных частот, меньших 500 Гц, формула может быть представлена в очень простом виде: $f_{гp} = 27\kappa$. Если рупор делается круглого или квадратного сечения, то сторона квадрата или диаметр круга должны увеличиваться на каждый сантиметр длины рупора на $\sqrt{\kappa}$ процентов. Если же он делается прямоугольного сечения с постоянной высотой, то ширина сечения должна увеличиваться на $\kappa\%$ на каждый сантиметр длины рупора.

Однако выдержать необходимую величину процентного увеличения сечения еще недостаточно для хорошего воспроизведения низких частот. Нужно еще иметь достаточную величину выходного отверстия рупора — устья. Его диаметр (или диаметр равновеликого сечения устья круга) должен быть не менее $\lambda_{гp}/\pi$. Отсюда для нижней граничной частоты 100 Гц, для которой длина волны составляет 3,4 м, диаметр устья составит около 110 см. Для более низких граничных частот размеры устья рупора будут еще больше. Кроме того, рупорный громкоговоритель, хорошо воспроизводя низкие частоты (выше граничной частоты), плохо воспроизводит высшие, в связи с чем рупорный громкоговоритель для воспроизведения низших частот приходится дополнять специальным громкоговорителем для воспроизведения высших частот. Применение рупорных оформлений в помещениях очень ограничено хотя бы потому, что разместить их в обычном помещении затруднительно. В случае же если такая возможность имеется, то расчет рупора следует начинать, задавшись размерами устья по выбранной нижней граничной частоте, уменьшая сечение на $\kappa\%$ на каждый сантиметр осевой длины до тех пор, пока не приходят к сечению, равному площади диффузора или диафрагмы. Но при этом для того что-

бы сопрячь головку громкоговорителя с рупором, последний должен иметь сечение той же формы, что и диффузор или диафрагма, т. е. круглое или эллиптическое. Если же по какой-либо причине сечение рупора делают другой формы, то его сечение в узкой части — горле — делают меньшим поверхности диффузора или диафрагмы и сопрягают с последним с помощью камеры.

Неоднократно предлагались конструкции, в которых стенками рупора являлись бы стенки помещения. Такими конструкциями являются, например, громкоговорители, устанавливаемые в угол комнаты так, что между стенками оформления и стенками помещения образуется звукопровод расширяющегося сечения, играющий роль рупора.

Насколько спорным является применение рупорного оформления для воспроизведения низких частот, настолько же оправданным является его использование в громкоговорителях, служащих для воспроизведения высоких частот, что имеет место в многочисленных конструкциях ряда зарубежных фирм. Само собой разумеется, применение рупорных громкоговорителей для озвучения на открытом воздухе вполне оправдано.

6.6. ВКЛЮЧЕНИЕ ГРОМКОГОВОРИТЕЛЕЙ В АКУСТИЧЕСКИЕ СИСТЕМЫ

Задачей правильного включения громкоговорителей является обеспечение того, чтобы на каждый громкоговоритель поступало напряжение только тех частот, которые он должен воспроизводить. Достигается это путем включения громкоговорителей через фильтры, которые носят название разделительных. Наиболее распространенной схемой фильтра является изображенная на рис. 6.32а. Она дает увеличение затухания частот за своей границей 9 дБ/окт. Ве-

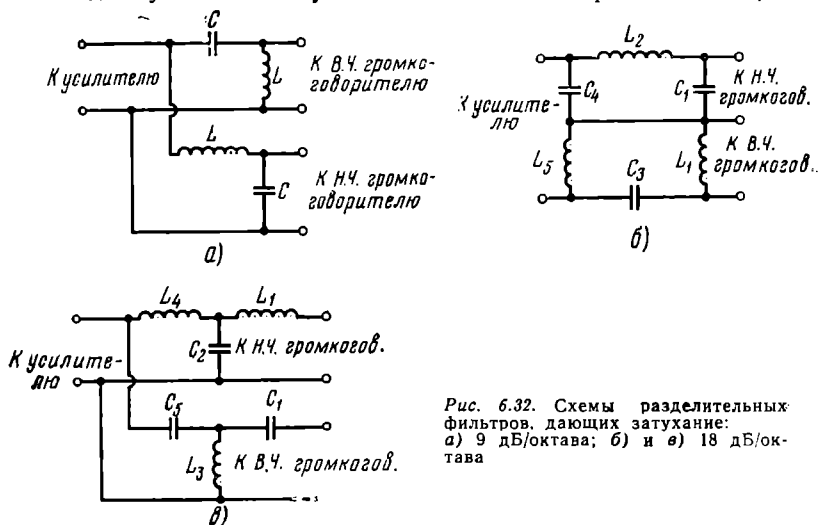


Рис. 6.32. Схемы разделительных фильтров, дающих затухание: а) 9 дБ/октава; б) и в) 18 дБ/октава

личины индуктивностей и емкостей, применяемых в ней, могут быть вычислены по формулам $L = 224R/f_{гр}$, мГ и $C = 112 \cdot 10^3/(f_{гр}R)$, мкФ, где R — сопротивление громкоговорителя (предполагается, что высокочастотный и низкочастотный громкоговорители имеют одинаковое сопротивление); $f_{гр}$ — частота разделения. Для более резкого разделения можно применить фильтр по схемам рис. 6.32б и в. Они обеспечивают увеличение затухания за своей границей 18 дБ/окт. Величины емкостей и индуктивностей, применяемых в этих схемах, можно определить по формулам: $L_1 = 0,707L$; $L_2 = 1,41L$; $L_3 = 0,35L$; $L_4 = 1,05L$; $L_5 = 0,47L$;

$C_1=1,41C$; $C_2=2,82C$; $C_3=0,7C$; $C_4=2,1C$; $C_5=0,94C$. Под L и C здесь понимаются величины, определенные для схемы рис. 6.32б.

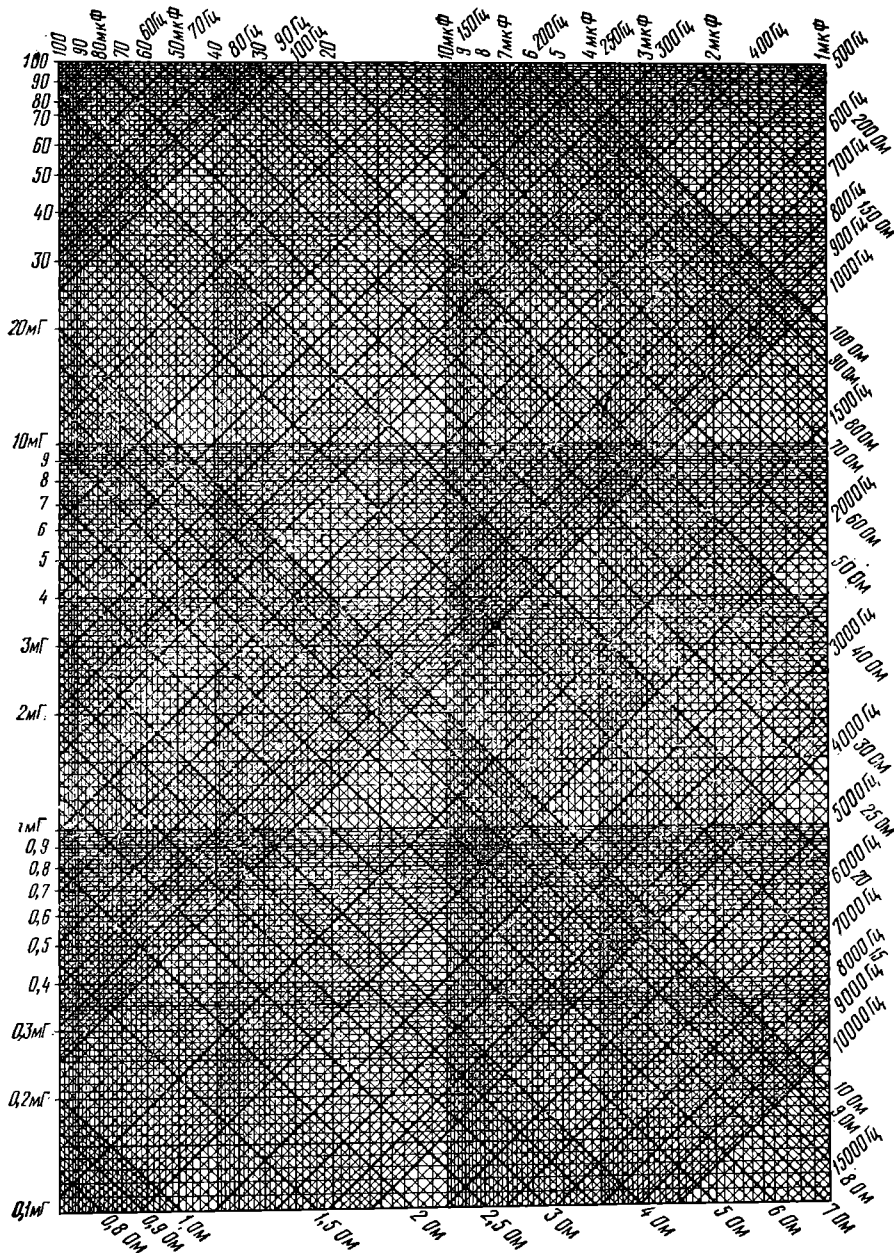


Рис. 6.33. Номограмма для определения параметров фильтра по схеме 6.48

Иногда можно определить элементы разделительного фильтра и по графику рис. 6.33.

Пример. Найти параметры разделительного фильтра, рассчитанного на частоту раздела 1000 Гц, если низкочастотный и высокочастотный громкоговорители имеют сопротивление 15 Ом каждый. Справа графика находим по отметке 15 Ом ниспадающую слева вниз диагональную прямую. Находим далее точку ее пересечения с диагональной прямой, имеющей отметку 1000 Гц и ниспадающей справа вниз. Проводя из этой точки горизонтальную прямую влево и вертикальную вверх, отсчитываем по осям соответственно 3,37 мГ и 7,5 мкФ, что приблизительно и является искомыми величинами. Если заданы такие величины, которые отсутствуют на графике, то они могут быть определены с помощью следующих множителей:

R	$f_{гр}$	L	C
1	10	0,1	0,1
10	1	10	0,1
10	10	1	0,01

Так, если бы вместо заданных выше величин задаться величинами 500 Гц и 600 Ом, то искомые величины индуктивности и емкости определились бы следующим образом.

Сначала ищем ответ для значений 500 Гц и 60 Ом. Подобно предыдущему находим для этого случая значения $L=27$ мГ и $C=3,75$ мкФ. Поскольку величину исходного сопротивления (60 Ом) надо умножить на 10, чтобы прийти к заданной величине 600 Ом, пользуемся второй строкой таблички и получаем соответственно для величин индуктивности и емкости значения: $L=27 \times 10 = 270$ мГ; $C=3,75 \times 0,1 = 0,375$ мкФ. Остается указать на способ конструктивной реализации параметров индуктивности и емкости. Для получения заданной величины емкости подбирают набор конденсаторов, обеспечивающих требуемую величину. Что касается индуктивности, то ее получают путем намотки катушек без железного сердечника, во избежание искажений, обусловленных перемагничиванием сердечника. Практически оптимальная в смысле максимума отношения индуктивности катушки к ее активному сопротивлению конструкция получается, когда внутренний диаметр цилиндрической обмотки вдвое больше ее высоты h , а внешний диаметр в 4 раза больше h и в 2 раза больше внутреннего диаметра. При этих условиях величина $h = \sqrt{L/R}$; 0,866 мм, где L — в микрогенри; R — в омах; длина провода $l = 187,3 \sqrt{Lh}$; число витков $N = 19,88 \sqrt{L/h}$; диаметр провода (без изоляции) $d = 0,84 h / \sqrt{N}$ мм; масса провода $m = h^3 \cdot 10^{-3} / 21,4$ кг.

Пример. Определить данные катушки с индуктивностью 3,37 мГ, или 3370 мкГ, разделительного фильтра, нагруженного громкоговорителем сопротивлением 15 Ом. Активное сопротивление рассчитываемой катушки выбираем в 5% от сопротивления громкоговорителя. Это соотношение можно считать вполне приемлемым. Тогда $R=0,05 \cdot 15 = 0,75$ Ом, откуда $L/R = 3370/0,75 = 4500$. Высота обмотки $h = \sqrt{4500/8,66} = 22,9$ мм; длина провода $l = 187,3 \sqrt{3370 \cdot 22,9} = 5,2 \cdot 10^4$ мм = 52 м; число витков $N = 19,88 \sqrt{L/h} = 19,88 \sqrt{3370/22,9} = 246$ в; диаметр провода $d = 0,84 l / \sqrt{N} = 0,84 \cdot 22,9 / \sqrt{246} = 1,22$ мм; масса провода $m = h^3 \cdot 10^{-3} / 21,4 = 22,9^3 \cdot 10^{-3} / 21,4 = 0,56$ кг. Естественно, полученные числа должны быть округлены, и в первую очередь диаметр провода, до ближайшего стандартизованного. Окончательные значения индуктивности подгоняют путем измерения на мостике, отматывая по несколько витков обмотки, намотанной с некоторым превышением числа витков сравнительно с рассчитанным.

Размещение акустических систем

Надо сказать, что даже для монофонических систем размещение оказывает существенное влияние на качество звучания. Так, неправильно размещение акустической системы в углу, если он не используется в качестве стенок рупо-

ра. Лучшее звучание получается, если акустическая система располагается не-симметрично относительно стен и других отражающих поверхностей. Если система устанавливается все же в углу, то рекомендуется части стен против акустической системы закрывать звукопоглощающим материалом, например поропластом. На пол под акустической системой и перед ней желательно класть ковер.

Что касается стереофонических систем, то следует иметь в виду, что для получения максимально возможного стереофонического эффекта здесь следует обратить особое внимание еще на взаимное расположение акустических систем. Если не делать этого, то стереофонический эффект может стать «расплывчатым» и проявляющимся совсем не в том месте помещения, где это желательно. Акустические системы должны располагаться у одной из стен помещения на расстоянии 2—2,5 м друг от друга. Акустические оси систем должны пересекаться под углом 90—100°, т. е. на расстоянии 0,8—1,5 м от линии, на которой расположена база системы. При этом зона, где будет получаться наибольший стереоэффект, будет находиться сразу же за точкой пересечения осей (если идти от громкоговорителей). Рекомендуется, чтобы за этой точкой располагался один слушатель, за ним — второй и за вторым рядом — еще два. Слушатели, располагающиеся вне этой зоны, будут находиться в несколько худших условиях слушания.

Для упрощения конструкции стереофонических установок их делают в ряде случаев, по крайней мере, двухполосными. При этом ниже частоты 300 Гц звуки могут воспроизводиться общим для обоих каналов низкочастотным громкоговорителем, поскольку звуки низких частот мало влияют на образование стереофонического эффекта. А громкоговорители, предназначенные для воспроизведения частот выше 300 Гц, могут иметь небольшие габариты и размещаться в акустических оформлениях небольшого объема, что делает расстановку их более легкой.

Применение двух отдельных акустических систем в стереофонических установках, о чем шла речь выше, позволяет путем подбора места их установки и взаиморасположения получать наилучшее стереофоническое звучание.

Раздел 7

АКУСТИКА ПОМЕЩЕНИЙ

7.1. ХАРАКТЕРИСТИКИ ПОМЕЩЕНИЙ

Волновая теория

Волновая теория разработана только для помещений простой формы. Для помещений прямоугольной формы собственные частоты

$$f_r = \frac{\omega_r}{2\pi} = \frac{c}{2} \sqrt{\left(\frac{k}{l}\right)^2 + \left(\frac{m}{b}\right)^2 + \left(\frac{n}{h}\right)^2}$$

где k , m и n — целые числа от нуля до бесконечности; l , b и h — соответственно длина, ширина и высота помещения. При выключении источника звука, создававшего звуковые колебания в этом помещении, процесс затухания колебаний в нем происходит на всех собственных частотах помещения, причем на каждой из них он имеет вид

$$p_r = p_{rm} e^{(-\alpha_r + j\omega_r) t},$$

где α_r — показатель затухания, определяемый из условия отражения волн на границах помещения для r -й собственной частоты; p_{rm} — начальная амплитуда колебаний, например, звукового давления, определяемая из условия распределения амплитуд колебаний в помещении для r -й собственной частоты.

Процесс затухания колебаний в помещении носит название реверберации. Кривая затухания звука не имеет монотонной формы из-за биений между собственными частотами.

Статистическая теория

Условие применимости статистической теории — близкий к единице коэффициент отражения звуковых волн от ограничивающих поверхностей помещения и предметов, находящихся в нем (не менее 0,9 по интенсивности), и небольшие линейные размеры помещения (не более 5—7 м).

При этом условии в любой точке помещения при установившемся режиме плотность энергии

$$\epsilon_m = \frac{4P_a}{cA} = 1,17 \cdot 10^{-2} \frac{P_a}{A},$$

где P_a — акустическая мощность источника звука, Вт; A — общее поглощение¹, м²; c — скорость звука (343 м/с).

Для того же условия квадрат звукового давления

$$p_m^2 = 16\pi \frac{p_1^2}{A \Omega_r} = 50,3 \frac{p_1^2}{A \Omega_r}$$

и уровень звукового давления (в децибелах)

$$L_m = 10 \lg \frac{P_a}{A} + 126,1 = 10 \lg \frac{p_1^2}{A \Omega_r} + 111;$$

p_1 — звуковое давление, Па, развиваемое источником звука на оси в 1 м от него; Ω_r — коэффициент осевой концентрации источника звука. Общее поглощение для однородной поглощающей поверхности $A = \alpha S$, где S — величина поглощающей поверхности; α — коэффициент поглощения. Коэффициентом поглощения называют отношение поглощенной энергии I звуковой волны к энергии $I_{\text{пад}}$ волны, падающей на отражающую поверхность, т. е. $\alpha = I/I_{\text{пад}}$. Если длина волны значительно превосходит линейные размеры отражающей поверхности, т. е. нет явления дифракции, то коэффициент поглощения $\alpha = 1 - \alpha_{\text{отр}}$, где $\alpha_{\text{отр}}$ — коэффициент отражения звука от рассматриваемой поверхности.

Если коэффициент поглощения ограничивающих поверхностей помещения неодинаковый, то общее поглощение $A = \sum \alpha_k S_k$, где S_k — площадь k -й поверхности помещения; α_k — коэффициент ее поглощения.

Если в помещении находятся различные предметы с звукопоглощающими поверхностями, то общее поглощение $A = \sum_{(k)} \alpha_k S_k + \sum_{(n)} \alpha_n N_n$, где N_n — число предметов n -го типа; α_n — приведенный² коэффициент поглощения (в м²) в расчете на один предмет. Средний коэффициент поглощения $\alpha_{\text{ср}} = A/S$, где S — суммарная площадь ограничивающих поверхностей помещения.

Все эти формулы для реальных помещений справедливы как средние. Если ограничивающие поверхности имеют резко отличающиеся коэффициенты погло-

¹ За единицу поглощения, называемую сэби, принят 1 м² абсолютно поглощающей поверхности (приблизительно 1 м² открытого окна, если длина звуковой волны много меньше размеров окна).

² То есть эквивалентный коэффициент поглощения поверхности с площадью 1 м², создающей то же поглощение, что и данный предмет.

щения, то вблизи хорошо отражающих поверхностей плотность энергии, звуковое давление и уровень его будут больше среднего значения, а вблизи сильно поглощающих поверхностей — меньше его. Их точные значения могут быть найдены только путем эксперимента, приближенные — см. ниже.

Звуковое поле в помещении состоит из двух составляющих: составляющей поля прямого звука, приходящей в рассматриваемую точку помещения прямо от источника звука, т. е. не претерпевая ни одного отражения, и составляющей отраженных звуковых волн. Эту составляющую часто называют диффузной составляющей звукового поля в помещении. Диффузная составляющая звукового поля в помещении по плотности энергии

$$\epsilon_d = \frac{4P_a(1-\alpha_{cp})}{c\alpha_{cp}S} = 1,17 \cdot 10^{-2} \frac{P_a(1-\alpha_{cp})}{\alpha_{cp}S};$$

по квадрату звукового давления

$$p_d^2 = 16\pi \frac{p_1^2(1-\alpha_{cp})}{\alpha_{cp}S\Omega_r} = 50,3 \frac{p_1^2(1-\alpha_{cp})}{\alpha_{cp}S\Omega_r};$$

по уровню

$$L_d = 10 \lg \frac{P_a(1-\alpha_{cp})}{\alpha_{cp}S} + 126,1, \text{ или } L_d = 10 \lg \frac{p_1^2}{\alpha_{cp}S\Omega_r} + 111,$$

где P_a — акустическая мощность источников звука, Вт; α_{cp} — средний коэффициент поглощения; S — общая площадь ограничивающих поверхностей помещения, m^2 ; p_1 — звуковое давление на оси источника на расстоянии 1 м от него, Па; Ω_r — коэффициент осевой концентрации источника звука.

Для одиночного источника звука, излучающего сферическую волну, составляющая поля прямого звука по плотности энергии

$$\epsilon_{пр} = \frac{P_a K^2(\theta)}{4\pi r^2 c} = 2,32 \cdot 10^{-4} \frac{P_a K^2(\theta)}{r^2};$$

по звуковому давлению

$$p_{пр} = \frac{p_1}{r} K(\theta)$$

и по уровню (в децибелах)

$$L_{пр} = 10 \lg \frac{P_a K^2(\theta)}{r^2} + 109,1, \text{ или } L_{пр} = 20 \lg \frac{p_1}{r} K(\theta) + 94,$$

где r — расстояние от центра источника звука, м; $K(\theta)$ — коэффициент направленности под углом θ к оси источника звука (т. е. в направлении на рассматриваемую точку); p_1 — звуковое давление на расстоянии 1 м от источника звука на его оси, Па. Составляющую прямого звука для нескольких источников звука с расстояниями между ними более λ_{\max} определяют следующим образом: плотность энергии и квадрат звукового давления, создаваемые каждым из них, суммируются арифметически: $\epsilon_{пр} = \sum_{(k)} \epsilon_{пр k}$ и $p_{пр}^2 = \sum_{(k)} (p_{пр k}^2)$.

Уровень звукового давления при этом $L_{пр} = 20 \lg p_{пр} + 94$, где $\epsilon_{пр k}$ и $p_{пр k}$ — плотность энергии и звуковое давление, создаваемые k -м одиночным источником звука (пример расчета см. в конце § 9.4).

Если источники звука находятся близко друг от друга (в пределах $0,5\lambda_{\min}$), то звуковые давления, создаваемые каждым из источников звука, суммируются с учетом разности хода звукового луча от каждого из источников и сдвигов фаз между ними. Этот расчет очень сложен, поэтому практически его не делают или вводят сильно упрощающие предположения (синфазность

работы всех источников звука, параллельность их звуковых осей, однотипность источников и удаленность рассматриваемой точки от источников звука). В этом случае $p_{\text{пр}} = \sum_{(k)} p_{\text{пр } k}$.

Составляющие поля прямого звука для промежуточных случаев (когда расстояние между источниками звука находится в пределах рабочих длин волн) рассчитывают по еще более сложным зависимостям.

Одним из характерных параметров помещения является *акустическое отношение* — отношение плотности энергии отраженных звуковых волн (диффузной составляющей звукового поля) к плотности энергии прямого звука или, что то же самое, отношение квадратов звуковых давлений диффузного поля и поля прямого звука: $R = e_d/e_{\text{пр}} = p_d^2/p_{\text{пр}}^2$.

Акустическое отношение в децибелах $\Delta L_R = 10 \lg R = L_d - L_{\text{пр}}$, где $L_d = 20 \lg p_d + 94$ и $L_{\text{пр}} = 20 \lg p_{\text{пр}} + 94$ — соответственно уровни поля отраженных звуков и прямого звука.

Акустическое отношение определяют для характерных точек помещения, в которых находятся слушатели (наиболее удаленных от источников звука, наиболее близких к ним, для точек с минимальным уровнем прямого звука и максимальным уровнем диффузного поля). Акустическое отношение для одиночного источника звука в заданной точке помещения для сферической волны

$$R = 16\pi \frac{r^2 (1 - \alpha_{\text{ср}})}{\alpha_{\text{ср}} S_{\Omega} K^2(\theta)} = 50,3 \frac{r^2 (1 - \alpha_{\text{ср}})}{\alpha_{\text{ср}} S_{\Omega} K^2(\theta)},$$

где r — расстояние рассматриваемой точки от центра источника звука; $\alpha_{\text{ср}}$ — средний коэффициент поглощения; S — общая площадь ограничивающих поверхностей помещения, м²; S_{Ω} — коэффициент осевой концентрации источника звука; $K(\theta)$ — коэффициент его направленности под углом θ к акустической оси по отношению к направлению в рассматриваемую точку.

Величины акустического отношения и уровня прямого звука для ряда конкретных случаев расположения громкоговорителей и их расчет см. в разд. 9.

Оптимальное значение акустического отношения для передачи речи находится в пределах 0,5—4, а для музыкальных передач — в пределах 2—8. Если акустическое отношение ниже этого предела, то передача звучит отрывисто, сухо. Если оно больше верхнего предела, то речь становится плохо разборчивой, а музыкальная передача — «загрязненной».

Введено понятие радиуса гулкости. Радиусом гулкости называют расстояние от центра источника звука, для которого акустическое отношение равно единице, т. е. в этих точках уровни прямого и диффузного звуков равны друг другу. Для одиночного источника звука (см. выше) радиус гулкости

$$r_{\text{гул}} = \sqrt{\frac{\alpha_{\text{ср}} S_{\Omega} K^2(\theta)}{50,3 (1 - \alpha_{\text{ср}})}}$$

Согласно статистической теории процессы нарастания и затухания звука в помещении имеют следующий вид: по объемной плотности

$$e_n = e_m (1 - e^{-bt}) \text{ и } e_z = e_m e^{-bt},$$

по звуковому давлению

$$p_n^2 = p_m^2 (1 - e^{-bt}) \text{ и } p_z = p_m e^{-0,5bt},$$

где e_m и p_m — установившиеся значения соответственно плотности энергии и звукового давления; $b = c\alpha'/4V = 85,8\alpha'/V$ — показатель затухания звука; V — объем помещения, м³; $\alpha' = -\ln(1 - \alpha_{\text{ср}})$ — реверберационный коэффициент поглощения; $\alpha_{\text{ср}}$ — средний коэффициент поглощения; S — общая площадь ограничивающих поверхностей помещения; c — скорость звука (343 м/с).

В реальных помещениях кривые затухания и нарастания могут быть немонотонными (рис. 7.1а). Нарастание и затухание уровня звукового давления в помещениях подчиняются соответственно следующим закономерностям:

$$L_p = L_m + 10 \lg(1 - e^{-bt}); \quad L_m = 10 \lg \varepsilon_m + 145,2 = 20 \lg p_m + 94;$$

$$L_p = L_m - 10 \lg e = L_m - 37,2 \alpha' St/V.$$

Идеализированная кривая затухания уровня для помещения представляет собой прямую линию 1. В реальных случаях кривая затухания 2 отклоняется от прямой (рис. 7.1б).

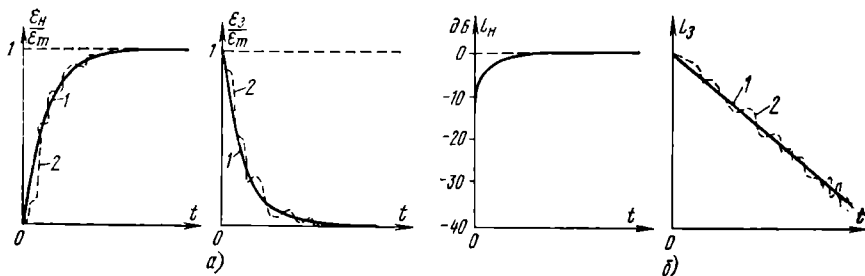


Рис. 7.1. Кривые нарастания и затухания:

а) плотности энергии в помещении; б) уровня звукового давления в них: 1 — в идеальном поле; 2 — в реальном

Другим характерным параметром помещения является *стандартное время реверберации* (его для краткости часто называют просто временем реверберации) — время, в течение которого плотность энергии уменьшается в 10^6 раз, звуковое давление — в 10^3 раз, а уровень звукового давления на 60 дБ по сравнению с их начальными значениями:

$$T = \frac{60}{10 \lg e b} = \frac{13,8}{b} \quad \text{или} \quad T = \frac{0,161V}{\alpha' S},$$

где V — объем помещения, m^3 ; S — площадь ограничивающих поверхностей помещения, m^2 ; α' — реверберационный коэффициент поглощения.

Эту формулу для T называют формулой Эйринга. Реверберационный коэффициент поглощения по среднему коэффициенту и обратно определяют по табл. 7.1, в которой приведены разности $\Delta\alpha = \alpha' - \alpha_{cp}$ для наиболее употребительных значений α' и α_{cp} .

Пример. Дано значение $\alpha_{cp} = 0,385$, найти величину реверберационного коэффициента α' . Из левых столбцов табл. 7.1 находим для $\alpha_{cp} = 0,385$ поправку $\Delta\alpha = 0,101$. Следовательно, искомое значение $\alpha' = \alpha_{cp} + \Delta\alpha = 0,385 + 0,101 = 0,486$. Задано значение $\alpha' = 0,235$, найти величину среднего коэффициента поглощения. Из правых столбцов табл. 7.1 для $\alpha' = 0,235$ находим поправку $\Delta\alpha = 0,026$. Следовательно, искомое значение $\alpha_{cp} = \alpha' - \Delta\alpha = 0,235 - 0,026 = 0,209$.

Для небольших коэффициентов поглощения (менее 0,2) реверберационный коэффициент поглощения равен среднему коэффициенту поглощения, т. е. $\alpha' = \alpha_{cp}$. В этом случае стандартное время реверберации вычисляют по формуле

$$T = \frac{0,161V}{\alpha_{cp} S} = \frac{0,161V}{A}$$

где $A = \alpha_{cp} S$ — общее поглощение. Остальные данные те же, что и для предыдущей формулы. Эту формулу называют формулой Сэбина.

Для учета затухания звука в воздухе (в помещениях с объемом более 1000 m^3) пользуются обобщенной формулой Эйринга

$$T = \frac{0,161V}{\alpha' S + 4\mu V},$$

где μ — коэффициент затухания звука из-за вязкости, $1/m$ (см. табл. 7.2).

ТАБЛИЦА 7.1

Поправки $\Delta\alpha$ для перехода от α' к $\alpha_{\text{ср}}$ и обратно

$\alpha' = \alpha_{\text{ср}} + \Delta\alpha$				$\alpha_{\text{ср}} = \alpha' - \Delta\alpha$			
$\alpha_{\text{ср}}$	$\Delta\alpha$	$\alpha_{\text{ср}}$	$\Delta\alpha$	α'	$\Delta\alpha$	α'	$\Delta\alpha$
0,03	0,001	0,22	0,029	0,04	0,001	0,28	0,036
0,04	0,001	0,23	0,031	0,05	0,001	0,29	0,038
0,05	0,001	0,24	0,034	0,06	0,002	0,30	0,041
0,06	0,002	0,25	0,038	0,07	0,002	0,31	0,043
0,07	0,003	0,26	0,041	0,08	0,003	0,32	0,046
0,08	0,003	0,27	0,045	0,09	0,004	0,33	0,049
0,09	0,004	0,28	0,049	0,10	0,005	0,34	0,052
0,10	0,005	0,29	0,053	0,11	0,006	0,35	0,055
0,11	0,007	0,30	0,057	0,12	0,007	0,36	0,058
0,12	0,008	0,31	0,061	0,13	0,008	0,37	0,061
0,13	0,009	0,32	0,066	0,14	0,009	0,38	0,064
0,14	0,011	0,33	0,071	0,15	0,011	0,39	0,067
0,15	0,013	0,34	0,076	0,16	0,012	0,40	0,070
0,16	0,014	0,35	0,081	0,17	0,014	0,41	0,074
0,17	0,016	0,36	0,086	0,18	0,015	0,42	0,077
0,18	0,019	0,37	0,092	0,19	0,017	0,43	0,081
0,19	0,021	0,38	0,098	0,20	0,019	0,44	0,084
0,20	0,023	0,39	0,104	0,21	0,021	0,45	0,088
0,21	0,026	0,40	0,111	0,22	0,023	0,46	0,091
				0,23	0,025	0,47	0,095
				0,24	0,027	0,48	0,099
				0,25	0,029	0,49	0,103
				0,26	0,031	0,50	0,107
				0,27	0,033	0,51	0,112

ТАБЛИЦА 7.2

Коэффициент затухания звука в воздухе

η , %	10	20	30	40	50	60	70	80	90
$\mu (1/\text{м}) \cdot 10^{-3}$ на частоте, Гц:									
1000	6	2	1	0,5	0,45	0,4	0,35	0,3	0,25
2000	12	5	3,4	3,5	3	2,5	2,3	2	1,8
4000	22	18,5	12	8,5	7	6	5,5	5	4,5
6000	30	31	18	14,5	13,5	12,5	11,5	11	10

Эту поправку учитывают только для частот выше 1000 Гц. Если пользоваться величиной стандартного времени реверберации, то кривые затухания звука в помещении имеют следующий вид:

для плотности энергии $\epsilon_a = \epsilon_{m0} e^{-13,8t/T}$;

для звукового давления $p_z = p_{m0} e^{-6,9t/T}$;

для уровня звукового давления $L_a = L_m - 60t/T$.

Оптимальным временем реверберации называют такое стандартное время реверберации, при котором звучание данной музыкальной передачи в данном помещении будет наилучшим или при котором разборчивость речи будет наибольшей.

Если первичный источник звука и слушатель находятся в одном и том же помещении, величина оптимальной реверберации определяется по рис. 7.2. Кри-

вые даны для частоты 500 Гц для различных типов музыкальных и речевых передач в зависимости от объема помещения. Эти значения оптимальной реверберации можно найти по следующим приближенным формулам (точность около 10%):

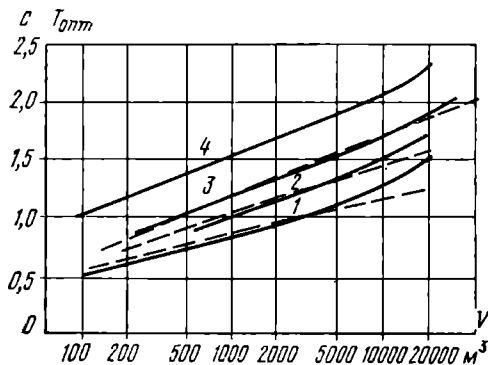


Рис. 7.2. Зависимость величины оптимальной реверберации от объема помещения:
1 — для речевых передач; 2 — для малых музыкальных форм и оперных театров; 3 — для концертных залов (симфоническая музыка); 4 — для органной музыки (пунктиром даны приближенные аналитические зависимости)

для речевых передач $T_{0пт} = 0,3 \lg V - 0,05$;

для малых музыкальных форм и оперных театров $T_{0пт} = 0,4 \lg V - 0,15$;

для симфонической музыки $T_{0пт} = 0,5 \lg V - 0,3$ (здесь $T_{0пт}$ — в секундах; V — в кубических метрах).

Если в помещении будут исполняться различные программы, то выбирают или среднее значение реверберации для всех видов программ, или такое значение, которое соответствует наиболее важной или наиболее частой программе. Например, для учрежденческого клуба, который в основном используется для докладов и лекций, оптимальное время реверберации должно быть близким к речевому; в концертном зале, используемом в основном для музыкальных передач, время реверберации выбирается близким к времени музыкальных передач и т. п.

Иногда в универсальных залах применяют переменное поглощение или устройства искусственной реверберации, включая амбиофонические системы (см. разд. 8). Фактическое время реверберации при этом не должно отличаться от оптимального более чем на 10%. Оптимальное время реверберации в зависимости от частоты имеет разную величину. На рис. 7.3 приведены пределы,

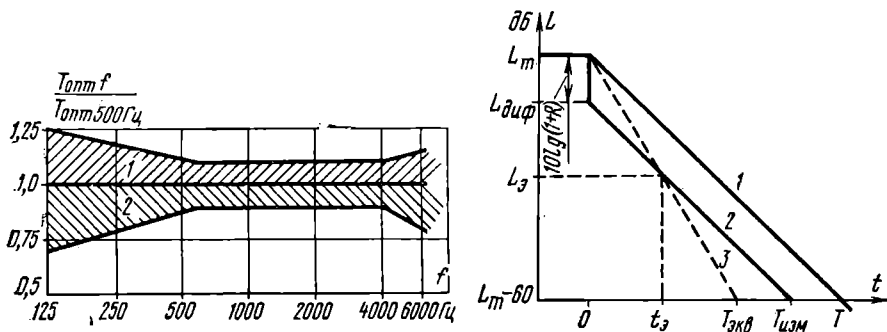


Рис. 7.3. Частотная зависимость времени оптимальной реверберации:

1 — для музыкальных программ; 2 — для речевых передач

Рис. 7.4. К определению эквивалентной реверберации:

1 — затухание уровня при наличии диффузного поля; 2 — фактический ход кривой затухания уровня (при измерении времени реверберации); 3 — эквивалентная реверберация, воспринимаемая слухом

в которые должно укладываться относительное время реверберации для музыкальных (1) и речевых (2) передач (за единицу принято время реверберации на частоте 500 Гц).

Акустические расчеты помещения начинают с определения объема помещения и оптимального времени реверберации. Затем подсчитывают имеющийся фонд поглощения на всех средних октавных частотах от 125 до 8000 Гц (иногда заменяют 8000 Гц на 6000 Гц, так как для 8000 Гц часто неизвестны коэффициенты поглощения). Затем подбирают дополнительные поглощающие материалы так, чтобы время реверберации на всех расчетных частотах укладывалось в заданные пределы рис. 7.3 с точностью до 10%.

Кроме стандартного времени реверберации, введено понятие *эквивалентного времени реверберации*. Под ним подразумевают ощущаемое на слух время реверберации. Оно зависит от акустического отношения R . На рис. 7.4 приведен график, иллюстрирующий эквивалентную реверберацию. Приближенно время эквивалентной реверберации можно найти по формуле

$$\frac{1}{T_{\text{эв}}} = \frac{1}{T} + \frac{1}{1,2} \lg \frac{1+R}{R}.$$

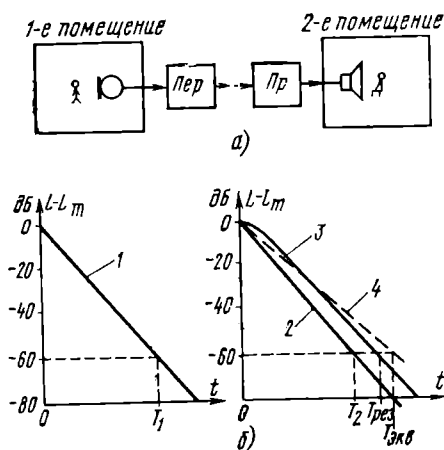
Кроме акустического отношения, введено понятие четкости реверберации, под которой подразумевают отношение суммы плотностей энергии (или квадрата звукового давления) прямого звука и отраженных звуковых волн, приходящих к слушателю через время менее 60 мс по сравнению с приходом прямого звука, к общей плотности энергии (или квадрату звукового давления): $D_R = (\epsilon_{\text{пр}} + \epsilon_{\text{отр}} (t \leq 60 \text{ мс})) / \epsilon_{\text{т}}$. Это отношение ближе к субъективному ощущению, чем акустическое отношение.

Связанные помещения

Связанными помещениями называют помещения, в одном из которых находится первичный источник звука (это помещение называют первичным), в другом — слушатели (это помещение называют вторичным). Связанные помещения могут иметь обратную связь, когда звуковые колебания из вторичного помещения могут переходить в первичное (обычно по акустическому каналу, например, через отверстия в смежной стене), и без обратной связи, когда звуковые колебания передаются только в одном направлении из первичного помещения во вторичное (например, по электрическому каналу, см. рис. 7.5а).

Рис. 7.5. Связанные помещения без обратной связи:

а) схема; б) кривые затухания уровня в связанных помещениях: 1 — в первичном помещении при условии его независимости; 2 — во вторичном помещении при передаче звука из первичного помещения; 3 — результирующая кривая во вторичном помещении при передаче звука из первичного помещения; 4 — эквивалентная реверберация во вторичном



На рис. 7.5б приведены идеализированные кривые затухания уровня звукового давления в первичном и вторичном помещениях при условии их независимости и кривая затухания уровня во вторичном помещении при передаче в не-

го из первичного. Кривая во вторичном помещении идет всегда выше наиболее медленно затухающей кривой.

Результирующее время стандартной реверберации во вторичном помещении приблизительно определяется по формуле $T_{\text{рез}}^3 = T_1^3 + T_2^3$, а эквивалентное время — по формуле $T_{\text{экв}}^{5/2} = T_1^{5/2} + T_2^{5/2}$, где T_1 и T_2 — стандартное время реверберации в первичном и вторичном помещениях. При наличии акустической обратной связи расчет времени реверберации может быть выполнен, как и для обычных связанных систем с обратной связью.

Акустические шумы в помещениях

Акустические шумы являются одной из характеристик помещения. Эти шумы складываются из шумов от источников шума, находящихся в данном помещении, и из шумов, проникающих из других помещений и с улицы. (О величинах проникающих шумов см. § 7.3.) Шумы первого типа создаются людьми и аппаратурой, находящимися в данном помещении. На рис. 7.6 (кривые 1, 2)

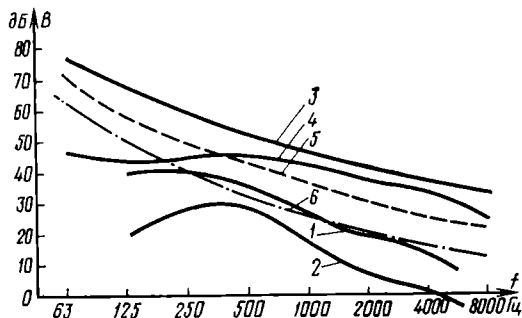


Рис. 7.6. Спектральные уровни шумов в помещениях:

а) речевые шумы: 1 — в большом помещении; 2 — в жилой комнате; б) шумы на предприятиях связи: 3 — цех сортировки посылок; 4 — стативный зал АТС; 5 — цех обработки периодической печати; 6 — операционный зал

приведены спектральные уровни шумов, создаваемых людьми (речевой шум). В табл. 7.3 приведены уровни звукового давления в октавных полосах, создаваемых в производственных помещениях связи. Некоторые из этих данных пересчитаны в спектральные уровни и также приведены на рис. 7.6 (кривые 3—6).

Если эти шумы превышают допустимые санитарные нормы (см. табл. 2.6), то стремятся снизить их. Одним из методов снижения уровня шумов является увеличение общего поглощения в помещении путем покрытия стен, потолка и пола материалами, эффективно поглощающими звук.

Пример. В цехе сортировки лисем и посылок (уровни шумов см. в табл. 7.3) необходимо снизить шумы. Посмотрим, насколько можно снизить их путем обработки поверхностей помещения. До обработки средний коэффициент поглощения на всех частотах составлял 0,03 (типовая облицовка поверхностей помещений). Применяя специальные материалы, можно легко повысить средний коэффициент поглощения на всех частотах до 0,3.

Уровень звукового давления в установившемся режиме $L_m = 10 \lg (P_a / a_{cp} S) + 126,1 = 10 \lg (P_a / S) + 126,1 - 10 \lg a_{cp}$. До обработки он был $L_{m1} = 10 \lg (P_a / S) + 126,1 - 10 \lg 0,03$, после обработки $L_{m2} = 10 \lg (P_a / S) + 126,1 - 10 \lg 0,3$. Вычитая из первого второе, получим $\Delta L = 10 \lg (a_{cp2} / a_{cp1}) = 10 \lg \frac{0,3}{0,03} = 10 \lg 10 = 10$ дБ. Таким образом, уровень шумов снизится на 10 дБ.

Следовательно, уровни шумов будут около предельного спектра ПС-65 (см. табл. 2.5), а именно:

Средняя частота, Гц	63	125	250	500	1000	2000	4000	8000
ПС-65, дБ	87	78	73	68	65	62	60	59
Фактические уровни, дБ	84	77	72	68	65	63	61	60

ТАБЛИЦА 7.3

Уровни шумов в производственных помещениях

Помещение	Уровень звукового давления в октавной полосе, дБ, для средней частоты полосы, Гц							
	63	125	250	500	1000	2000	4000	8000
Операционный зал	70	70	63	58	55	52	50	49
Коммутационный зал	59	53	63	66	63	58	54	42
Залы с аппаратурой уплотнения	72	72	68	65	63	62	60	50
Опорная усилительная станция	66	69	66	66	64	57	55	45
Цех обработки периодической печати	87	78	73	68	65	62	60	59
Стативный зал МТС	62	61	65	67	67	64	62	62
Аппаратный зал радиостанции	76	73	73	71	68	64	56	50
Радиобюро	67	68	69	67	69	69	69	64
Стативный зал АТС	63	63	67	71	70	69	68	62
Аппаратный цех телеграфа	71	71	72	72	71	70	69	64
Перфораторная МТС	70	68	73	79	75	71	69	67
Цех сортировки писем и цех сортировки посылок	94	87	82	78	75	73	71	70

Сравнение фактических уровней и уровней предельного спектра показывает, что на частоте 63 Гц уровень получился на 3 дБ ниже предельного, на частотах 500—1000 Гц — равный предельному и на частоте 8000 Гц — на 1 дБ выше его. Поэтому вполне можно взять такой поглощающий материал, который будет иметь на частоте 63 Гц коэффициент поглощения в 2 раза меньше (т. е. около 0,15), а на частотах выше 1000 Гц — в 1,25 раза больше (т. е. около 0,30). В этом случае фактические уровни совпадут с уровнями ПС-65.

7.2. ПОГЛОЩАЮЩИЕ МАТЕРИАЛЫ И ИХ КОНСТРУКЦИИ

Коэффициентом поглощения материала α называют отношение поглощенной энергии звуковой волны I к падающей энергии $I_{\text{пад}}$ на поверхность этого материала: $\alpha = I/I_{\text{пад}}$.

Если размеры поверхности поглощающего материала велики в сравнении с длиной падающей звуковой волны и толщина его практически бесконечна, то коэффициент поглощения $\alpha = 1 - \alpha_{\text{отр}}$, где $\alpha_{\text{отр}}$ — коэффициент отражения звуковой волны. Коэффициент поглощения в этом случае

$$\alpha = 1 - \left| \frac{pc - 413}{pc + 413} \right|^2$$

где pc — удельное акустическое сопротивление поглощающего материала, кг/м²с (реактивной составляющей обычно пренебрегают из-за ее малости); 413 — удельное акустическое сопротивление воздуха.

Если $pc > 413$, то около поглощающей поверхности получаются узел скорости колебаний и пучность звукового давления, а если $pc < 413$ — пучность скорости колебаний и узел звукового давления. Коэффициенты поглощения зависят от угла падения звуковой волны на поглощающий материал. Различают нормальный коэффициент поглощения (для угла падения 90°) и диффузный

(для всевозможных углов падения). В таблицах обычно приводят только диффузный коэффициент поглощения.

Коэффициенты поглощения материалов зависят от частоты. Одни материалы имеют большее поглощение на низких частотах, другие — на высоких, третьи — на средних. Ряд материалов имеет немонотонную зависимость коэффициента поглощения от частоты. Все это позволяет подбирать общее поглощение в помещении оптимальной величины во всем диапазоне передаваемых частот.

Поглощающие материалы делят на сплошные и пористые. Все сплошные материалы имеют акустическое сопротивление почти всегда больше, чем у воздуха, а пористые — в большинстве случаев меньше его. Пористые материалы всегда комбинируют со сплошными, располагая сплошные позади пористых. При этом наименьшее поглощение у пористого материала получается при его расположении вплотную к стене из хорошо отражающего (сплошного) материала, а наибольшее — при расположении его на расстоянии четверти длины звуковой волны (в воздухе) от поверхности хорошо отражающего материала. Несколько меньшая разница в поглощении получается при расстояниях $3/4$ и $5/4$ длины волны. При большем удалении от отражающей стены коэффициент поглощения остается постоянным.

Для поглощающего материала с размером, сравнимым с длиной звуковой волны, коэффициент поглощения зависит от соотношения между ними. Так, например, открытое окно имеет коэффициент поглощения больше единицы, особенно на низких частотах (энергия звуковых волн, падающих рядом с окном, уходит в него из-за явления дифракции). Коэффициент поглощения портьеры с небольшими размерами по сравнению с длиной звуковой волны больше, чем портьеры с большими размерами, поэтому лучше иметь ряд узких портьер, чем одну широкую (при равной общей ширине).

Одна из распространенных конструкций пористых поглощающих материалов — облицовочная. Такие материалы изготавливают в виде плоских плит или рельефных (объемных, т. е. пирамид, клиньев и т. п.), располагаемых или вплотную, или на небольшом расстоянии от сплошной толстой стены. Пирамиды или клинья устанавливают на небольшом расстоянии от стены, основаниями вплотную друг к другу, в помещение они обращены острыми углами. Такие конструкции создают большее поглощение, чем плоские плиты. Величина коэффициента поглощения зависит от толщины материала.

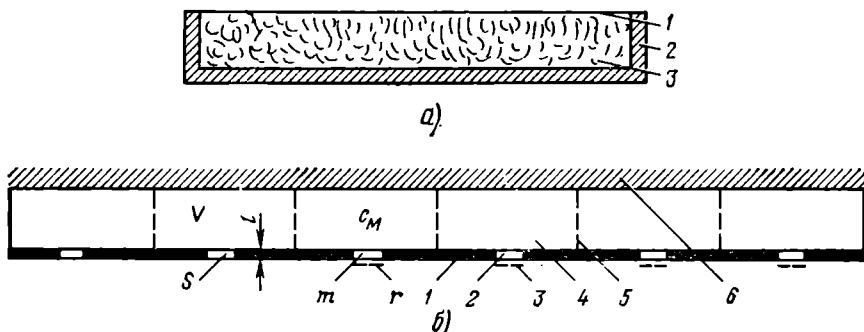


Рис. 7.7. Резонансные поглотители:

а) щиты Бекеша: 1 — холст (с лицевой стороны); 2 — рама; 3 — войлок; б) резонансные поглотители: S — площадь отверстия; l — толщина листа; m — масса воздуха отверстия; r — радиус отверстия; V — объем одной секции; c_m — гибкость этого объема; 1 — лист (обычно металлический); 2 — отверстие резонатора; 3 — металлическая сетка для внесения активного сопротивления в резонатор; 4 — объем резонатора; 5 — фактическая граница одиночного резонатора; 6 — потолок

Другой распространенной конструкцией поглощающего материала являются резонансные поглотители. Они делятся на мембранные и резонаторные. Мембранные поглотители представляют собой натянутый холст или тонкий фанерный лист, под которым располагают хорошо демпфирующий материал (материал с большой вязкостью, например некоторые сорта губчатой резины, поролоновые коврики, строительный войлок и др.). Щиты с натянутым холстом (рис. 7.7а) называют щитами Бекеша. Максимум поглощения получается на резонансных частотах. Для натянутого холста с силой F резонансные частоты

$$f_k = \frac{k}{2l} \sqrt{\frac{F}{\rho tb}},$$

где ρ — плотность материала холста; l , b и t — длина, ширина и толщина полотна; k — порядок резонансной частоты.

Пример. Полотно размерами 2×1 м и толщиной $2 \cdot 10^{-4}$ м плотностью 200 г/м^2 натянуто с силой $1,6 \text{ Н}$. Найти первую резонансную частоту

$$f_1 = \frac{1}{2 \cdot 2} \sqrt{\frac{1,6 \cdot 10^3}{200 \cdot 2 \cdot 10^{-4} \cdot 1}} = 50 \text{ Гц}.$$

Следовательно, первый максимум поглощения будет на частоте 50 Гц , следующий — на частоте 100 Гц и т. д.

Величину коэффициента поглощения можно рассчитать, если знать вязкость материала, расположенного под фанерой, но практически такой расчет очень неточен.

Для фанерного листа с соотношением длина/ширина=2, опертого по границам, резонансные частоты по длине листа определяются из выражения $f_k = 3,45 \cdot 10^3 (t/l^2)$, где l и t — длина и толщина листа, м.

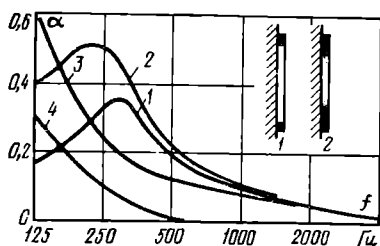
Пример. Дан фанерный лист длиной 2 м и толщиной $4 \cdot 10^{-3} \text{ м}$, найти первую резонансную частоту.

Имеем $f_1 = 3,45 \cdot 10^3 \cdot 4 \cdot 10^{-3} / 2^2 = 3,5 \text{ Гц}$.

Если такой лист расположен близко от твердой стены, то его упругость будет повышена и собственная частота также повысится. На рис. 7.8 приведе-

Рис. 7.8. Коэффициент поглощения для щитов:

1 — фанера 3 мм с воздушным промежутком 5 см ; 2 — то же, края демпфированы стекловатой; 3 — фанера 6 мм с воздушным промежутком 10 см , края задемпфированы минеральной ватой; 4 — оконное стекло



ны коэффициенты поглощения для фанерных щитов, расположенных близко от стены с заполнением промежутка между ними демпфирующим материалом. Для сравнения дано поглощение оконного стекла.

Резонаторные поглотители (см. рис. 7.7б) представляют собой систему воздушных резонаторов, например резонаторов Гельмгольца, в устье которых расположен демпфирующий материал (табл. 4.4и).

Резонансная частота резонатора

$$f_0 = \frac{c}{2\pi} \sqrt{\frac{S}{lV}},$$

где S — поперечное сечение горла резонатора; l — длина горла; V — объем полости резонатора.

Пример. Резонатор имеет размеры: длину горла 10^{-2} м, поперечное сечение его 10^{-4} м² и объем 10^{-3} м³. Его резонансная частота равна

$$f_0 = \frac{343}{2\pi} \sqrt{\frac{10^{-4}}{10^{-2} \cdot 10^{-3}}} = 171,5 \text{ Гц } (c=343 \text{ м/с}).$$

Наиболее распространенная конструкция резонаторных поглотителей — перфорированный лист (обычно металлический), расположенный на некотором расстоянии от твердой стены. Такая конструкция может рассматриваться как ряд резонаторов. Если перфорация равномерно распределена по поверхности листа, то такой поглотитель будет иметь типичную резонансную кривую поглощения, а если она распределена неравномерно, то можно получить равномерную кривую поглощения. Для равномерного распределения отверстий резонансная частота

$$f_0 = \frac{c}{2\pi} \sqrt{\frac{S}{l_3 d^2 h}},$$

где S — сечение отверстия; $l_3 = t + 0,5 \sqrt{\pi S}$ — эффективная толщина листа; t — толщина листа; h — расстояние от стены (потолка); d — расстояние между отверстиями.

Пример. Лист толщиной 10^{-3} м перфорирован отверстиями площадью 10^{-4} м² с расстояниями между отверстиями 0,1 м и расстоянием от потолка, равным 0,1 м, найти резонансную частоту. Эффективная толщина листа $l_3 = 10^{-3} + 0,5 \sqrt{\pi \cdot 10^{-4}} = 1,9 \cdot 10^{-2}$ м. Резонансная частота

$$f_0 = \frac{343}{2\pi} \sqrt{\frac{10^{-4}}{1,9 \cdot 10^{-2} \cdot 0,1 \cdot 0,01}} = 125 \text{ Гц.}$$

Вместо ряда отверстий применяют щели в таких листах. Резонансная частота в этом случае

$$f_0 = \frac{c}{2\pi} \sqrt{\frac{b}{l_3 d h}},$$

где b — ширина щели; d — расстояние между щелями (остальные данные, как и в предыдущем случае).

Величина коэффициента поглощения резонатора определяется активным акустическим сопротивлением демпфирующего материала, находящегося в горле резонатора. В качестве такого сопротивления обычно применяют металлическую сетку. Коэффициент поглощения зависит от числа и размеров ячеек такой сетки. Такую сетку располагают под листом с перфорациями. Реже применяют для этого ткани, так как они негигиеничны.

В табл. 7.4—7.7 приведены коэффициенты поглощения для ряда наиболее часто встречающихся материалов.

Пример. Определить требуемое поглощение и время реверберации для аудитории на 250 человек (рис. 7.9). Пол паркетный, парты деревянные, потолок и большая часть стен (300 м²) пока обработаны гипсовой штукатуркой. Аудитория имеет две двери размерами по 3 м², окон нет.

Общая кубатура помещения составляет 1440 м³. Из этого объема следует вычесть объем, находящийся под покатым частью пола. Он составляет $0,5 \times 16 \times 12 = 288$ м³. Парты и люди занимают объем 115 м³. Объем выступа на передней стене 36 м³. Следовательно, чистый объем аудитории составляет около 1000 м³.

Площадь потолка равна $20 \times 12 = 240$ м², площадь передней стены $12 \times 6 = 72$ м², площадь задней стены $12 \times 3 = 36$ м², площадь пола под партами $12 \times 4 = 48$ м², площадь парт и площадь проходов $12 \times 16,5 = 198$ м², площадь бо-

ТАБЛИЦА 7.4

Коэффициент звукопоглощения основных поглотителей

Поглотитель	α в зависимости от частоты, Гц						
	125	250	500	1000	2000	4000	6000
Слушатели	0,33	0,41	0,44	0,46	0,46	0,46	0,47
Слушатели на деревянных стульях	0,17	0,36	0,47	0,52	0,50	0,46	0,44
Кресло деревянное	0,02	0,02	0,02	0,04	0,04	0,03	0,03
» обитое кожей	0,10	0,12	0,17	0,17	0,12	0,10	0,10
» обитое кожей и поролоном	0,05	0,09	0,12	0,13	0,15	0,16	0,15
» обитое бархатом	0,14	0,22	0,31	0,40	0,52	0,60	0,62
Стул мягкий	0,05	0,09	0,12	0,13	0,15	0,16	0,15
» полумягкий	0,05	0,08	0,18	0,15	0,17	0,15	0,05
» жесткий	0,02	0,02	0,02	0,02	0,02	0,02	0,02
Публика на 1 м ²	0,28	0,40	0,45	0,49	0,47	0,45	0,44
Паркет по асфальту	0,04	0,04	0,07	0,06	0,06	0,07	0,07
» на шпонках	0,20	0,15	0,12	0,10	0,08	0,07	0,07
Пол на деревянных балках	0,15	0,11	0,10	0,07	0,06	0,07	0,06
Резина 5 мм на полу	0,04	0,04	0,08	0,08	0,08	0,10	0,06
Релин	0,04	0,05	0,07	0,07	0,08	0,08	0,06
Линолеум на твердой основе	0,02	0,02	0,03	0,03	0,04	0,04	0,04
Стена оштукатуренная и окрашенная краской клеевой	0,02	0,02	0,02	0,03	0,04	0,04	0,04
То же, масляной	0,01	0,01	0,02	0,02	0,02	0,02	0,02
Стена оштукатуренная известкой с металлической сеткой	0,04	0,05	0,06	0,08	0,04	0,06	0,06
То же, с деревянной обрешеткой	0,03	0,05	0,06	0,09	0,04	0,06	0,06
Деревянные плиты	0,12	0,11	0,1	0,03	0,08	0,11	0,12
Стена песочно-известковая	0,04	0,05	0,06	0,09	0,04	0,06	0,06
Обычная гипсовая штукатурка	0,04	0,04	0,04	0,06	0,06	0,03	0,07
Бетонная поверхность железненная	0,01	0,01	0,01	0,02	0,02	0,02	0,02
Штукатурка АЦП	0,27	0,31	0,31	0,31	0,33	0,4	0,13
Мрамор, гранит и другие шлифы	0,01	0,01	0,01	0,01	0,01	0,01	0,02
Кирпичная кладка без расшивки	0,15	0,19	0,29	0,28	0,38	0,46	0,46
То же, с расшивкой швов	0,03	0,03	0,03	0,04	0,05	0,06	0,06
Метлахская плитка	0,01	0,01	0,02	0,02	0,02	0,03	0,03
Проем сцены	0,20	0,30	0,30	0,30	0,30	0,30	0,20
Вентиляционные решетки	0,30	0,42	0,50	0,50	0,50	0,51	0,52
Окно (стекло ординарное)	0,35	0,25	0,18	0,12	0,07	0,04	0,03
Двери лакированные	0,03	0,02	0,05	0,04	0,04	0,04	0,04
» сосновые	0,10	0,11	0,10	0,08	0,08	0,11	0,11

ковых стен от потолка до парт $2 \times 4 \times 6 = 48$ м², площадь боковых стен вдоль парт $2 \times 4 \times 16 = 144$ м². Таким образом, общая площадь ограничивающих поверхностей помещения составляет 786 м². Из нее деревянные покрытия составляют 246 м², штукатурка 540 м².

Из рис. 7.2 (кривая 1) находим оптимальное время реверберации на частоте 500 Гц для объема 1000 м³. Оно равно 0,8 с.

Находим реверберационный коэффициент поглощения

$$\alpha' = \frac{0,161V}{T_{\text{опт}}S} = \frac{0,161 \cdot 1000}{786 \cdot 0,8} = 0,274,$$

Определяем средний коэффициент поглощения по формуле

$$\alpha_{\text{ср}} = 1 - e^{-\alpha'} = 1 - e^{-0,274} = 0,24$$

или по табл. 7.1: для $\alpha' = 0,274$ $\Delta\alpha = 0,034$, откуда $\alpha_{\text{ср}} = \alpha' - \Delta\alpha = 0,24$.

Требуемый фонд поглощения на частоте 500 Гц $A_{\text{тр}} = \alpha_{\text{ср}}S = 0,24 \cdot 786 = 188$ м².

Подсчитаем имеющийся фонд поглощения на той же частоте из расчета 250 слушателей. Коэффициенты поглощения берем из табл. 7.4. Люди вносят поглощение $A_{\text{л}} = 0,44 \cdot 250 = 110$ м², гипсовая штукатурка на потолке и части

ТАБЛИЦА 7.5

Коэффициент звукопоглощения пористых поглотителей
(b — зазор между отражателем и поглотителем)

Материал	b	α в зависимости от частоты, Гц						
		125	250	500	1000	2000	4000	6000
Минераловатные ПП-80	—	0,08	0,30	0,64	0,89	0,95	0,81	0,73
То же	50	0,21	0,40	0,72	0,98	0,97	0,79	0,75
«Стилит»	—	0,43	0,98	0,89	0,99	0,95	0,87	0,75
Древесно-волоконистые	50	0,22	0,30	0,34	0,32	0,41	0,42	0,42
«Фибролит» 30 мм	—	0,06	0,16	0,25	0,38	0,59	0,63	0,59
То же	150	0,13	0,42	0,53	0,35	0,53	0,63	0,56
Акустические ПА/Д	—	0,05	0,59	0,52	0,53	0,25	0,11	0,08
То же	100	0,34	0,62	0,52	0,52	0,26	0,15	0,14
Акустические ПА/О	—	0,01	0,17	0,68	0,98	0,86	0,45	0,23
То же	100	0,20	0,52	0,98	0,85	0,80	0,45	0,28
Акустические ПА/С	100	0,18	0,64	0,99	0,93	0,90	0,83	0,76
«Тарвертон»	—	0,02	0,14	0,65	0,90	0,87	0,86	0,88
То же	100	0,28	0,81	0,86	0,87	0,89	0,86	0,88
«Акмигран»	100	0,29	0,70	0,68	0,68	0,75	0,74	0,70
«Брекчия»	50	0,33	0,44	0,69	0,88	0,92	0,69	0,66
Маты из стеклохолста:								
«Атимс»	50	0,08	0,26	0,64	0,89	0,75	0,78	0,80
АТМ 1-50 П	—	0,36	0,76	0,98	0,89	0,88	0,58	0,47
Маты из минеральной ваты	—	0,17	0,59	0,99	0,98	0,96	0,87	0,84
Тарная ткань в сборку	50	0,10	0,28	0,46	0,60	0,58	0,60	0,68
Репс	800	0,14	0,40	0,80	0,97	0,99	0,99	0,99
«Маркиза»	—	0,04	0,23	0,40	0,57	0,53	0,62	0,60
Ковры:								
артикул 1346	—	0,02	0,05	0,26	0,47	0,54	0,70	0,71
артикул 15103	—	—	0,04	0,21	0,45	0,55	0,62	0,64
латексный	—	—	0,01	0,15	0,31	0,63	0,72	0,63
безворсовый	—	0,02	0,05	0,07	0,11	0,29	0,48	0,50

ТАБЛИЦА 7.6

Коэффициент звукопоглощения мембранных поглотителей
(d — толщина заполнителя)

Материал	d	b	α в зависимости от частоты, Гц						
			125	250	500	1000	2000	4000	6000
Фанера на «стилите»	100	—	0,47	0,39	0,18	0,14	0,13	0,12	0,10
Древесно-стружечный	—	—	0,01	0,09	0,09	0,08	0,09	0,14	0,14
То же	100	—	0,30	0,24	0,08	0,07	0,10	0,13	0,14
— » —, с пластиком	100	—	0,34	0,28	0,22	0,11	0,11	0,12	0,14
Бумажно-слоистый	150	—	0,52	0,38	0,22	0,14	0,02	—	—
Дюралюминиевый	50	50	0,40	0,34	0,16	0,08	0,02	—	—
Плиты «Ацэнд»	—	—	0,03	0,03	0,09	0,08	0,08	0,03	0,03
То же	100	—	0,38	0,28	0,21	0,12	0,05	0,05	0,04
Сухая гипсовая штукатурка	—	50	0,23	0,31	0,13	0,09	0,06	0,13	0,04
То же	100	—	0,65	0,34	0,23	0,17	0,17	0,11	0,10
Пенопласт	—	—	0,02	0,09	0,19	0,16	0,14	0,12	0,12
То же	100	—	0,51	0,38	0,28	0,16	0,16	0,16	0,16
Панели из «волниста»	—	50	—	0,10	0,22	0,21	0,08	—	—
То же	50	—	0,16	0,72	0,93	0,20	0,14	0,02	—
Щиты Бекеши	150	—	0,76	0,67	0,50	0,24	0,13	0,15	0,07
То же	150	100	0,70	0,86	0,50	0,26	0,12	0,10	0,09
Полицилиндры	—	—	0,41	0,30	0,35	0,16	0,10	0,14	0,18
То же	50	—	0,51	0,44	0,39	0,19	0,13	0,22	0,28

ТАБЛИЦА 7.7

Коэффициент звукопоглощения резонаторных поглотителей с покровным листом из перфорированных материалов

Материал	d	b	α в зависимости от частоты, Гц						
			125	250	500	1000	2000	4000	6000
Фанера 5 мм	—	50	0,06	0,42	0,20	0,07	0,07	0,06	0,06
То же	100	100	0,80	0,52	0,27	0,14	0,12	0,10	0,10
Фанера 20 мм	—	50	0,06	0,08	0,17	0,16	0,10	0,08	0,08
То же	100	100	0,78	0,98	0,95	0,50	0,32	0,27	0,28
Слоистый пластик, подклеенный марлей	—	50	0,06	0,32	0,35	0,12	0,07	—	—
Дюралюминий 5 мм	50	50	0,26	0,89	0,99	0,47	0,15	0,04	—
	100	100	—	—	—	—	—	—	—
Асбоцементные плиты	—	—	0,71	0,95	0,86	0,53	0,18	0,04	—
Асбоцементные плиты:									
№ 1	50	50	0,21	0,50	0,99	0,64	0,39	0,25	0,20
№ 2	50	50	0,24	0,72	0,96	0,77	0,57	0,34	0,20
№ 3	50	50	0,56	0,62	0,52	0,35	0,18	0,08	0,05
№ 4	50	50	0,62	0,59	0,51	0,42	0,27	0,20	0,06
№ 5	50	50	0,45	0,79	0,67	0,44	0,25	0,07	0,03
№ 6	50	50	0,34	0,81	0,70	0,54	0,35	0,26	0,06
№ 7	50	50	0,40	0,97	0,75	0,52	0,31	0,16	0,06
№ 8	50	50	0,38	0,87	0,77	0,70	0,51	0,31	0,17
№ 9	50	50	0,28	0,79	0,98	0,70	0,47	0,23	0,20
№ 10	50	—	0,31	0,69	0,91	0,75	0,60	0,35	0,30
Акустические плиты АГШ (штампованные)	50	—	0,23	0,47	0,98	0,73	0,44	0,41	0,41
АГШБ	50	—	0,28	0,69	0,94	0,76	0,51	0,43	0,42

Примечание. Коэффициенты поглощения для слушателей, кресел и стульев приведены на 1 единицу, а остальные — на 1 м².

ТАБЛИЦА 7.8

Расчет среднего коэффициента поглощения и времени реверберации

Поглотитель	Количество	α	A	α	A	α	A	α	A	α	A	α	A
		Для частот, Гц											
		250		500		1000		2000		4000		6000	
Люди	250 чел.	0,41	103	0,44	110	0,46	112	0,46	112	0,46	112	0,46	112
Деревянные панели	246 м ²	0,11	27	0,10	25	0,03	7	0,08	21	0,11	27	0,12	30
Гипсовая штукатурка	420 м ²	0,04	17	0,04	17	0,06	25	0,06	25	0,03	13	0,07	30
Штукатурка АЦП	120 м ²	0,27	32	0,31	37	0,31	37	0,33	40	0,40	48	0,13	52
Сумма ¹	786 м ²	—	179	—	189	—	181	—	198	—	200	—	224
$\alpha_{cp} = \Sigma A / \Sigma S$		0,227		0,240		0,230		0,250		0,253		0,283	
$\alpha' = -\ln(1 - \alpha_{cp})$		0,258		0,276		0,261		0,286		0,293		0,332	
$T = 0,161 V / \alpha' \Sigma S^*)$		0,79		0,74		0,78		0,72		0,69		0,62	

¹ Суммируются только площади поглотителей и поглощение А.

* Поглощением в воздухе пренебрегаем из-за малой величины.

7.3. ЗВУКОИЗОЛЯЦИЯ ПОМЕЩЕНИЙ

Основные пути прохождения звука через перегородки следующие: прохождение через поры, щели и т. п. (воздушный перенос), прохождение через материал стены или по трубам отопления, газа и водопровода в виде продольных колебаний его частиц (материальный перенос) и передача колебаний посредством поперечных колебаний перегородки (мембранный перенос). В реальных случаях звуковые колебания передаются через перегородку всеми тремя способами.

Для уменьшения переноса через перегородки необходимо делать их слоистыми, подбирая материалы слоев перегородки с резко отличающимися акустическими сопротивлениями (бетон—поролон). Стены делают двойными с поглощением между ними.

Для уменьшения мембранного переноса стены делают массивными (чтобы их резонанс обычно был на очень низких частотах).

Для уменьшения шума, создаваемого вибрациями, перегородки устанавливают на виброизолирующие прокладки.

При падении звуковых волн с интенсивностью $I_{\text{пад}}$ на какую-либо перегородку больших размеров в сравнении с длиной волны интенсивность звука с другой стороны перегородки $I_{\text{пр}}$ в условиях отсутствия отражения звука в пространстве за перегородкой будет определяться только звукопроводностью перегородки. Коэффициент звукопроводности $\alpha_{\text{пр}} = I_{\text{пр}}/I_{\text{пад}} = p_{\text{пр}}^2/p_{\text{пад}}^2$ или в логарифмических единицах (звукоизоляция перегородки) $Q_{\text{пер}} = L_{\text{пад}} - L_{\text{пр}} = 20 \lg (p_{\text{пад}}/p_{\text{пр}})$, где $L_{\text{пр}}$ и $L_{\text{пад}}$ — уровни звукового давления с внутренней и внешней сторон перегородки.

Для стен с поверхностной плотностью $\rho < 200 \text{ кг/м}^2$ коэффициент звукоизоляции перегородки в децибелах (с учетом только мембранного переноса) может быть определен по формуле $Q_{\text{пер}} = 12,5 \lg \rho + 14$. Это значение совпадает с истинным для частот 500—1000 Гц, для частот 50—100 Гц звукоизоляция будет на 6 дБ меньше, а для частот около 4000 Гц — на 6 дБ больше.

Пример. Найти звукоизоляцию стены с поверхностной плотностью 60 кг/м^2 . Она будет $Q_{\text{пер}} = 12,5 \lg 60 + 14 = 33,5 \text{ дБ}$.

Для стен с плотностью более 200 кг/м^2 можно пользоваться формулой $Q_{\text{пер}} = 14,5 \lg \rho + 15$.

Пример. Найти звукоизоляцию стены поверхностью 20 м^2 и общей массой 6000 кг . Находим $Q_{\text{пер}} = 14,5 \lg (6000/20) + 15 = 51 \text{ дБ}$. На частотах 50—100 Гц она будет около $51 - 6 = 45 \text{ дБ}$, а на частотах около 4000 Гц $Q_{\text{пер}} = 51 + 6 = 57 \text{ дБ}$.

Для двойных жестких перегородок с воздушной прослойкой между ними звукоизоляция может быть определена из формулы $Q_{\text{пер}} = 14,3 \lg (\rho_1 \rho_2) + 20 \lg \delta - 13$, где ρ_1 и ρ_2 — поверхностная плотность первой и второй перегородок; δ — толщина воздушного слоя между ними. Формула дает хорошее совпадение с экспериментом для перегородок с поверхностной плотностью 30—100 кг/м^2 для частот 500—1000 Гц.

В табл. 7.9 приведены величины звукоизоляции для некоторых конструкций и материалов перегородок.

Если шум проникает в помещение извне через перегородку, то разность уровней с внешней стороны перегородки L_1 и в помещении L_2 называют звукоизоляцией помещения: $Q_{\text{пом}} = L_1 - L_2 = 20 \lg (p_1/p_2)$, где p_1 и p_2 — звуковые давления вне помещения и внутри его, соответствующие уровням L_1 и L_2 .

Уровень звукового давления в помещении $L_2 = L_{\text{прн}} + 10 \lg (S_{\text{пр}}/A) = L_1 - Q_{\text{пер}} + 10 \lg (S_{\text{пер}}/A)$, где $Q_{\text{пер}}$ — звукоизоляция перегородки; $L_{\text{прн}}$ — уровень проникающего шума; $S_{\text{пр}}$ — площадь перегородки; A — общее поглощение в помещении.

Если перегородка состоит из нескольких смежных участков, то общая звукопроводность равна сумме звукопроводностей: $A_{\text{пр}} = \sum_{(k)} \alpha_{\text{пр} k} S_{\text{пер} k}$, где $\alpha_{\text{пр} k}$ —

ТАБЛИЦА 7.9

Среднее значение звукоизоляции $Q_{\text{пер}}$ для обычно встречающихся материалов и конструкций (опытные данные)

Материал или конструкция	Толщина, см	Поверхностная плотность, кг/м ²	$Q_{\text{пер}}$, дБ
1	2	3	4
Бумага оберточная грубая	—	0,08	1,5
Брезент	0,06	4,40	5
»	0,06	3,42	4
Волосяной войлок:			
в один слой	2,5	3,66	6
в два слоя по 1,5 см	3	5,65	9
в три слоя	4,5	8,51	13
в четыре слоя	6	10,3	17
Одеяло из минеральной шерсти, покрытое с обеих сторон бумагой	1,3	1,5	16
Спрессованный картон	0,5	3	16
Картон в несколько слоев	2,0	12,0	20
Асбестовый картон	0,25	2,25	18
Шевелин 50×50 см	1,25	1,75	14
То же	2,50	3,50	28
Доска сплошная:			
сосновая	3,0	19,5	12
дубовая	4,5	33,5	27
Фанера трехслойная	0,32	2,54	19
То же	0,64	3,56	21
Плиты из прессованной пробки	5	30	20
Фибролит магнезиальный (в плитах) размером 50×50 см	7	24,5	19
То же, оштукатуренный с одной стороны (толщина штукатурки 1 см), со стороны не-оштукатуренной	8	34,3	38
То же, с оштукатуренной стороны	8	34,3	42
То же, без штукатурки, но с оклейкой с двух сторон фанерой толщиной 3 мм	7,6	28,7	42
Торфоплита 50×50 см	3	7,5	25
То же, оклеенная с двух сторон на животном клее фанерой толщиной 3 мм	3,6	11,5	45
Железо листовое	0,2	15,6	33
Свинец	0,16	19	30
»	0,32	38,1	32
Стекло:			
зеркальное	0,63	17,5	30
двойное с промежутком 3,8 см	0,63	—	40
то же 19 см	0,63	—	45
» 40 см	0,63	—	48
Прессованная солома 9 см, оштукатуренная с обеих сторон	12	72	39
Соломитовые плиты 2×5 см и между ними битуминизированный пергамин	14,5	100	42
Шлакогипсовые стальные плиты:			
2×5 см	13	120	40
2×6 см	17	150	42
Пемзобетонные стальные плиты:			
2×6 см	15	135	40
2×8,5 см	20	185	43
Стены из пемзобетона	14	150	42
То же	23	250	50
Стена из шлакобетона	14	150	42
» железобетона	10	240	49
» пустотелых пемзобетонных блоков	19	190	43
То же	29	270	50
Стена из кирпичной кладки в 0,5 кирпича без штукатурки (из красного кирпича)	12	204	48
То же, в 1 кирпич	25	425	53
» в 1,5 кирпича	38	646	56
» 2 »	52	884	58
» 2,5 »	64	1088	59

Окончание табл. 7.9

1	2	3	4
Перегородка одинарная из досок толщиной 2 см, оштукатуренная с обеих сторон, с оклейкой обоями	6	70	37
Перегородка одинарная из досок толщиной 2,5 см, оштукатуренная с обеих сторон по войлоку	7	76	39
Перегородка двойная из брусков 10 см, обшитых с двух сторон досками толщиной 2,5 см и оштукатуренная с двух сторон	18	95	45
То же, с оштукатуркой по войлоку	19	96	47
Перегородка двойная из фанерных листов толщиной 3 мм с промежутком 2,5 см, заполненным шлаковой	3	8	26
То же, с промежутком 5 см	5,5	12	29
То же, с промежутком 6,5 см	7	14	34
Гипсовые пустотелые камни толщиной 1 см с двумя стенками толщиной по 1,5 см и промежутком 8 см, с засыпкой шлаком	11	117	41
Окно двойное, совершенно плотно пригнанное и плотно закрытое	—	—	25
Окно одинарное, плохо закрытое	—	—	8,5
Дверь обычного типа с филенкой из 2,5 см досок (с двумя панелями), с обвязкой толщиной 4,5 см	—	—	18
То же, с обвязкой толщиной 2,5 см и филенкой из 3 мм фанеры	—	—	10
То же, оклеенная фанерой, размером 90×200 см	—	—	22
Горячая дубовая дверь размером 90×210 см, плотно пригнанная	—	—	25
Металлическая дверь (герметичная)	—	—	30

Примечание. Приводимые значения $Q_{\text{пер}}$ представляют средние значения для частот 128–2048 Гц и могут отклоняться в ту или иную сторону на 2–3 дБ. Для массивных конструкций звукоизоляция $Q_{\text{пер}}$ определена теоретически, для прочих материалов — из опыта.

коэффициент звукопроводности k -го участка перегородки; $S_{\text{пер } k}$ — площадь его.

Для сложной перегородки изоляция помещения

$$Q_{\text{пом}} = 10 \lg \left[\left(\sum_{(n)} \alpha_n S_n \right) / \sum_{(k)} \alpha_{\text{пр } k} S_{\text{пер } k} \right] = 10 \lg (A/A_{\text{пр}}),$$

где $A = \sum_{(n)} \alpha_n S_n$ — общее поглощение в помещении; $A_{\text{пр}} = \sum_{(k)} \alpha_{\text{пр } k} S_{\text{пер } k}$ — общая звукопроводность перегородок.

Средний коэффициент звукопроводности в этом случае

$$\alpha_{\text{пр.ср}} = A_{\text{пр}}/S_{\text{пер } \Sigma} = A_{\text{пр}} / \sum_{(k)} S_{\text{пер } k},$$

где $S_{\text{пер } \Sigma}$ — общая площадь перегородки.

Пример. Перегородка площадью 10 м² имеет отверстие 10⁻³ м². Звукоизоляция перегородки равна 50 дБ. Чему будет равна звукоизоляция перегородки с учетом проводимости отверстия?

Общая звукопроводность $A_{\text{пр}} = 10^{-5} \cdot 10 + 1 \cdot 10^{-3} = 1,1 \cdot 10^{-3}$. Средний коэффициент звукопроводности $\alpha_{\text{пр.ср}} = 1,1 \cdot 10^{-3} / 10 = 1,1 \cdot 10^{-4}$ м². Звукоизоляция перегородки $Q_{\text{пер}} = 10 \lg (1/1,1 \cdot 10^{-4}) = 39,5$ дБ. Следовательно, круглое отверстие в стене размером 10 см² дало снижение звукоизоляции на 10,5 дБ. При этом не

было учтено то, что в силу явления дифракции звукопроводимость отверстия будет в несколько раз больше, особенно на низких частотах.

Из этого примера следует, что надо тщательно следить за тем, чтобы в стенах не было щелей.

Пример. Помещение отделено от другого (шумного) перегородкой со звукоизоляцией 50 дБ. Определить звукоизоляцию помещения, если общее поглощение в помещении составляет 40 м², площадь перегородки составляет 100 м²:

$$Q_{\text{пом}} = 50 + 10 \lg (100/40) = 54 \text{ дБ.}$$

Раздел 8

РАДИОВЕЩАТЕЛЬНЫЕ И ТЕЛЕВИЗИОННЫЕ СТУДИИ

8.1. ТИПЫ СТУДИЙ

Радиовещательные студии делятся на большие, средние и малые концертные, камерной музыки, речевые и литературно-драматические. Последние обычно бывают в виде комплекса (блока) студий. Кроме того, в больших радиодомах есть еще радиотеатры. Телевизионные студии делятся на такие же типы, включая и телетеатры, но вместо литературно-драматического блока в телевизионных центрах есть комплекс постановочных студий с высотой потолков не менее 10—12 м.

В табл. 8.1 приведены примерные объемы и площади пола для всех типов студий.

ТАБЛИЦА 8.1

Размеры студий

Студия	Объем, м ³	Площадь пола, м ²
Большая концертная	6000—3000	500—400
Средняя концертная	3000—1500	300—250
Малая концертная	1500—750	200—150
Камерная	500—200	80—50
Речевая	100—50	20—15
Студии литературно-драматического блока:		
основные (от одной до трех)	800—500	200—100
гулкая	150—80	30—15
заглушенная	80—50	15—10
Постановочные студии	6000—3000	—

8.2. ОПТИМАЛЬНАЯ РЕВЕРБЕРАЦИЯ В СТУДИИ¹

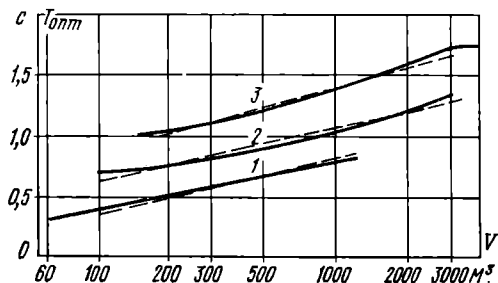
В концертных студиях время реверберации должно быть в пределах от 1 с в малых студиях до 1,7 с в студиях с объемом более 3000 м³. В зависимости от стиля и характера исполнения оптимальное время реверберации получается разным. Например, для одного и того же помещения исполнение классической симфонической музыки требует времени реверберации 1,54 с, симфо-

¹ Студия является первичным помещением, входящим в систему студия — электрический тракт — помещение для слушания, поэтому оптимальные характеристики для студий отличаются от оптимальных для обычных помещений.

нической музыки романтического стиля — 2,07 с, а современной симфонической музыки — 1,48 с, причем отклонение от этих данных в среднем на 0,1 с уже замечается экспертами. Для органный музыки время реверберации должно быть в пределах от 1,5 до 2,5 с в зависимости от объема зала. Для джазовой музыки оптимальное время реверберации получается менее определенным, чем для симфонической, но большинство слушателей склоняются к большему времени реверберации. Для исполнения камерной музыки, для сольных и хоровых программ, небольших ансамблей optimum реверберации получается при меньшем времени реверберации, чем для симфонической музыки, и тоже зависит от объема студии. Для художественной передачи речи оптимальное время реверберации студии с объемом 500 м³ получается в пределах 0,7—0,8 с. В основных студиях литературно-драматического блока время реверберации берут в пределах 0,5—0,6 с, в гулкой студии — не менее 3 с, в заглушенной — в пределах 0,2—0,25 с, в постановочных студиях телевизионного вещания — 0,7—0,8 с. В речевых студиях для передачи информационных программ время реверберации не должно быть более 0,5 с (0,4—0,5). Оптимальное время реверберации для радио- и телетеатров берут, как и для обычных театров и концертных залов (см. рис. 7.3). Рекомендуется небольшое снижение, но не более чем на 10%.

На рис. 8.1 приведены величины оптимальной реверберации студий в зависимости от объема (для частоты 500 Гц).

Рис. 8.1. Зависимость оптимальной реверберации от объема студии: 1 — для речевых передач; 2 — для малых музыкальных форм; 3 — для концертных программ (пунктиром дана приближенная аналитическая зависимость)



Эти величины следует рассматривать как минимальные, так как увеличить время реверберации, если это требуется для создания оптимума звучания того или иного вида музыкального исполнения, гораздо легче, чем уменьшить его.

Оптимальное время реверберации для студий можно определить с помощью следующих формул: для концертных $T_{\text{опт}} = 0,5 \lg V - 0,10$, для малых музыкальных $T_{\text{опт}} = 0,45 \lg V - 0,30$, для речевых $T_{\text{опт}} = 0,4 \lg V - 0,40$. Эти зависимости дают ошибку не более 10% (см. рис. 8.1). Допускается отклонение от оптимального времени не более $\pm 10\%$. Для концертных студий допустимые

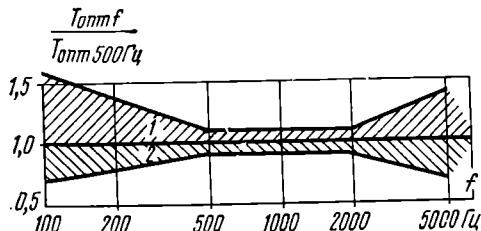


Рис. 8.2. Частотная зависимость оптимальной реверберации: 1 — для музыкальных программ; 2 — для речевых передач

пределы отклонений времени реверберации в основном частотном диапазоне приведены на рис. 8.2 в виде ограничивающих рамок (за единицу принято время реверберации на частоте 500 Гц). Предпочтительно повышение времени ре-

верберации в сторону низких частот до соотношения $T_{125 \text{ Гц}}/T_{500 \text{ Гц}} = 1,5 \div 1,6$. Снижения времени реверберации в сторону низких частот не допускается. В сторону высоких частот от 500 Гц рекомендуется подъем до 40% на частотах 2000—3000 Гц. Для больших студий фактическое время реверберации с учетом затухания в воздухе (по полной формуле Эйринга — см. § 7.2) на частоте 8000 Гц не должно быть менее 1 с. Оптимальной частотной характеристикой времени реверберации для речевых студий является частотнонезависимая во всем диапазоне частот. Допускается спад в сторону высоких частот (не более 30% на частоте 5000 Гц) и в сторону низких частот. Подъем в сторону низких частот не допускается (см. ограничивающие рамки на рис. 8.2).

Учитывая необходимость изменения времени реверберации для получения оптимального звучания различных программ, приходится в каждой концертной студии, а также в основных студиях литературно-драматического блока предусматривать возможность изменения времени реверберации. С аналогичным требованием приходится сталкиваться и при проектировании универсальных залов. Одним из решений задачи является создание фонда переменного поглощения в таких помещениях, а это приводит к использованию различных звукопоглощающих конструкций, которые могут сравнительно легко и быстро вводиться в действие или выводиться из него. Есть много различных конструктивных решений этой задачи. Например, применяются щиты с хорошо поглощающим материалом, закрываемые специальными щитами с хорошо отражающей поверхностью; различного типа жалюзи; вращающиеся колонны с различным поглощающим материалом (при этом половина колонны всегда оказывается утопленной в стене) и т. п. Все эти методы очень громоздки и требуют довольно сложной механизации, иначе они просто не под силу персоналу студий. Теперь широко применяются устройства искусственной реверберации и амбиофонии (о них см. в § 8.4).

В распоряжении звукорежиссера есть еще один метод изменения ощущения времени реверберации, основанный на использовании эквивалентной реверберации. Путем приближения микрофонов к исполнителю и удаления от него можно изменять эквивалентную реверберацию в довольно широких пределах. Величина эквивалентной реверберации определяется из выражения

$$\frac{1}{T_{\text{эвб}}} = \frac{1}{T} + \frac{1}{1,2} \lg \frac{R+1}{R},$$

где T — измеряемое время реверберации: $T \approx \frac{V}{6\alpha_{\text{ср}} S}$; $R = 50,3r^2 (6ST - V)/VS\Omega_{\text{и}}$ — акустическое отношение; r — расстояние от исполнителя; $\Omega_{\text{и}}$ — коэффициент осевой концентрации источника звука; V и S — объем и ограничивающая поверхность помещения; $\alpha_{\text{ср}}$ — средний коэффициент поглощения.

Пример. Определить эквивалентную реверберацию в двух точках помещения $r_1 = 0,5$ м и $r_2 = 5$ м для следующих его параметров: $V = 1000$ м³, $S = 700$ м², $T = 1,2$ с, $\Omega_{\text{и}} = 2$. Акустическое отношение получается соответственно равным 0,036 и 3,6, а эквивалентная реверберация — 0,49 и 1,08 с.

8.3. ЗВУКОИЗОЛЯЦИЯ СТУДИЙ

Студии располагают на тихих улицах, возможно дальше от проездов. Не допускается расположение студий в смежных помещениях — между ними должны располагаться помещения с низким уровнем шумов (склады, архивы и т. п.). Студии предпочтительно располагать в единичных местах здания, как можно дальше от шумных помещений. Для большинства студий предпочтительны цокольный и первый этажи. Фундаменты студий должны быть изолированы от общего фундамента звукоизолирующими прокладками и засыпкой пространства между общим и индивидуальным фундаментами (засыпка песком, прокладки из демпфирующих виброизоляционных материалов: резина, строительный войлок, различные синтетические материалы).

Стены радиодомов, и особенно студий (рис. 8.3), должны быть двойными, без жесткой связи между ними и с расположением поглощающих материалов между стенами, фундамент здания изолируют от остального грунта. Каждая

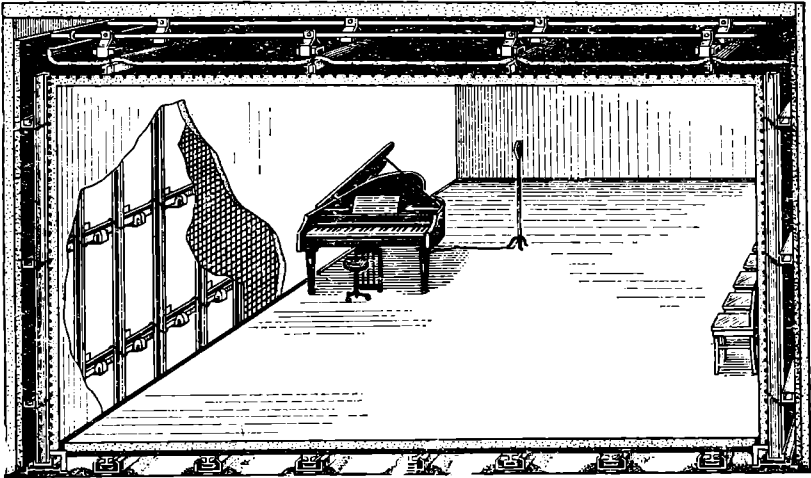


Рис. 8.3. Иллюстрация вибро- и шумоизоляции студий

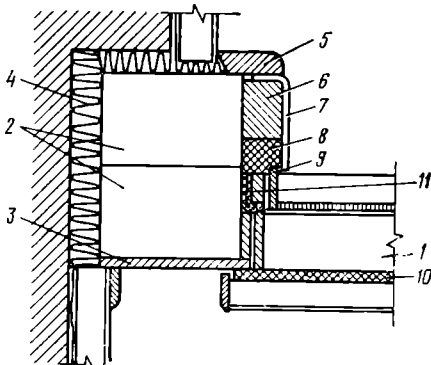


Рис. 8.4. Конструкция студийных дверей: 1 — дверное полотно; 2 — бруски коробки; 3 — дубовая облицовка; 4 — минеральный войлок; 5 — наличник; 6 — наклад; 7 — скоба; 8 — наклад; 9, 10 — губчатая резина; 11 — прорезиненная ткань

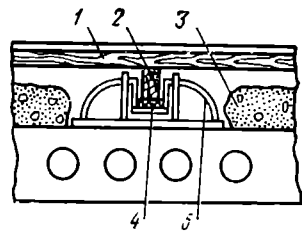


Рис. 8.5. Конструкция плавающих полов: 1 — дощатый пол; 2 — деревянная лага; 3 — шлаковата; 4 — упругая прокладка; 5 — пружина

из стен должна опираться на свой изолированный фундамент и устанавливаться на вибропрокладки. В студиях применяют специальные двойные двери с уплотнителями (рис. 8.4), плавающие полы (рис. 8.5) и подвесные потолки (рис. 8.6). Все студии снабжаются тамбурами для прохода в них коридоров и других помещений (рис. 8.7). Полы покрывают мягкими коврами.

Аппаратные должны быть отделены от студий просмотровым окном из трех рам с непараллельным расположением стекол (рис. 8.8).

Допустимый уровень шумов в студиях 20—25 дБ, т. е. немного выше уровня собственных шумов конденсаторных микрофонов. Наибольший уровень шумов создается, вообще говоря, из-за проникновения шумов из аппаратной в

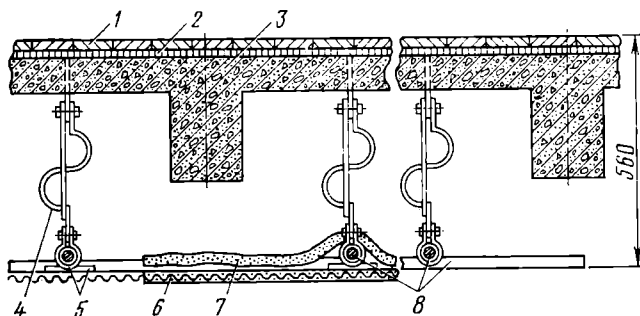


Рис. 8.6. Конструкция подвесных потолков:

1 — паркет; 2 — асфальт; 3 — монолитное железобетонное покрытие; 4 — пружинная подвеска; 5 — прокладка, штукатурка по сетке Рабицы; 6 — мат из асбестовой крошки (отходы) в марле; 7 — каркас из круглого железа $\varnothing 25$ мм

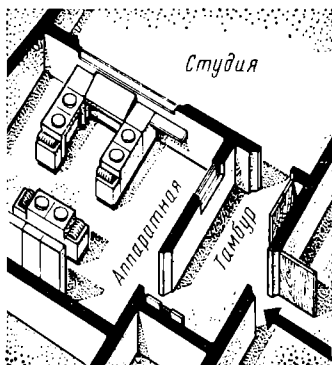


Рис. 8.7. Тамбуры для входа в студию

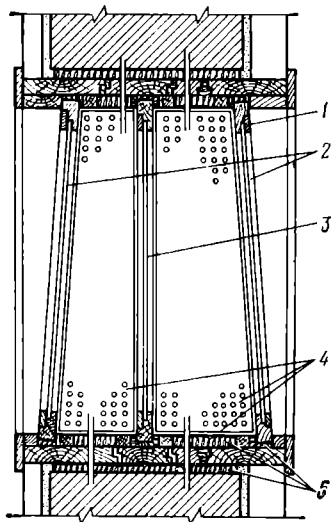


Рис. 8.8. Конструкция смотровых окон: 1 — пористо-губчатая резина; 2 — стекло зеркальное толщиной 8 мм; 3 — то же, 10 мм; 4 — звукопоглощающая конструкция; 5 — минеральный войлок

студию, так как уровень передачи в ней довольно высок, а изоляция окна (даже с тройной рамой) невелика. Но в данном случае это не так важно, так как такая помеха ощущается как один из отраженных звуковых лучей.

Пример. Рассчитать уровень акустических шумов, проникающих в студию извне (кроме шумов вентиляции). Размеры студии $15 \times 15 \times 8$ м. Внешняя стена 15×8 м кирпичная толщиной в 2,5 кирпича ($Q_1 = 59$ дБ), уличный шум 75 дБ.

Стена, отделяющая студию от коридора, 15×8 м кирпичная в 1 кирпич ($Q_2 = 53$ дБ), дверь в ней размером 4 м^2 металлическая двойная (считаем, что одна дверь в тамбуре приоткрыта) ($Q_3 = 30$ дБ). Шум в коридоре 65 дБ. Две стены, отделяющие студию от склада, $2 \times 15 \times 8$ м из пенобетона ($Q_4 = 42$ дБ). Шум на складе — не более 50 дБ. Потолок имеет звукоизоляцию $Q_5 = 55$ дБ, шум наверху 65 дБ. Студия находится на первом этаже, и шум через пол не проникает. Окно в аппаратную размером 2 м^2 двойное с промежутком 40 см ($Q_6 = 48$ дБ). Посторонний шум в аппаратной не превышает 75 дБ. Общее звукопоглощение в студии $A = 200 \text{ м}^2$.

Шум: от наружной стены $L_1 = 75 - 59 + 10 \lg (120/200) = 14$ дБ; из коридора через стену $L_2 = 65 - 53 + 10 \lg (120/200) = 10$ дБ; из коридора через дверь $L_3 = 65 - 30 + 10 \lg (4/200) = 18$ дБ; через боковые стены $L_4 = 50 - 42 + 10 \lg (240/200) = 9$ дБ; через потолок $L_5 = 65 - 55 + 10 \lg (225/200) = 9$ дБ; через окно $L_6 = 75 - 48 + 10 \lg (2/200) = 7$ дБ.

Общий уровень шума $L_{\text{об}} = 14(+) 10(+) 18(+) 9(+) 9(+) 7$, где знак (+) означает суммирование уровней по их интенсивности. Переводим уровень в относительную интенсивность (см. § 1.4) и складываем последние: $I_{\text{об}}/I_0 = 25,1 + 10 + 63,1 + 8 + 8 + 5 = 119,2$. Общий уровень шумов $L_{\text{об}} = 10 \lg 119,2 = 20,8$ дБ, т. е. находится в норме.

Особое внимание необходимо уделять снижению уровня шумов от вибраций машин, от работы вентиляционных устройств и устройств кондиционирования.

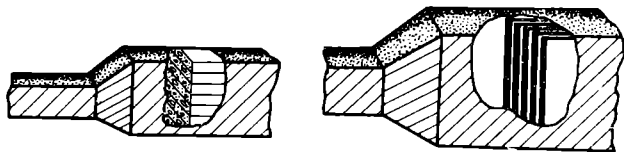
Шумы от вибрации машин снижают прокладками между опорами машин и их фундаментом. Шум от вентилятора и устройств кондиционирования снижают с помощью акустических фильтров. Простейший фильтр представляет собой трубу, облицованную поглощающим материалом. Затухание уровня шума (в децибелах) пропорционально длине трубы l , ее периметру p и обратно пропорционально сечению S , т. е. $\Delta L = \alpha nl/S$, где α — коэффициент пропорциональности, зависящий от материала стенок: для металлических 0,01; для шлакобетонных и деревянных 0,08; при облицовке их войлоком толщиной 1 см 0,5. Он приблизительно равен коэффициенту поглощения облицовочного материала.

Пример. Найти затухание звука в вентиляционной трубе длиной 5 м, диаметром 0,3 м, облицованной войлоком:

$$\Delta L = 0,5 \frac{\pi \cdot 0,3 \cdot 5}{\pi \cdot 0,3^2 / 4} = 33 \text{ дБ.}$$

Для большей эффективности вентиляционные каналы делают из составных труб: часть из них облицовывают войлоком, а промежутки между ними делают шлакобетонными или деревянными. Еще более высокую эффективность снижения уровня шумов получают при использовании сложных акустических фильтров, которые состоят из отрезков труб разного диаметра (см. табл. 4.4 р. с. т.), или ячеек и пластин (см. рис. 8.9), или камерного типа (см. рис. 8.10).

Рис. 8.9. Глушители ячейечного и пластинчатого типов



Для фильтров, состоящих из отрезков труб, величина затухания определяется (без учета поглощения стенками трубы) из формулы

$$\Delta L = 10n \lg \frac{1+A}{1-A}, \quad A = \frac{\sqrt{1-4\omega_0^2/\omega^2}}{1-2\omega_0^2/\omega^2}, \quad \omega_0 = c \sqrt{\frac{S_1}{S_2 l_1 l_2}},$$

где S_1 и S_2 — поперечные сечения труб; $S_1 \ll S_2$; l_1 и l_2 — длины отрезков труб; n — число звеньев фильтра.

Пример. Рассчитать затухание, вносимое акустическим фильтром, состоящим из 5 звеньев, если поперечные сечения отрезков труб соответственно рав-

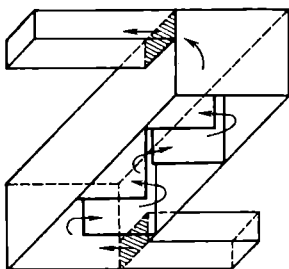


Рис. 8.10. Камерный глушитель

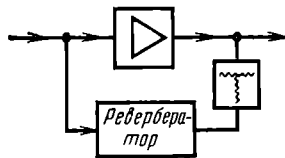


Рис. 8.11. Схема включения искусственного ревербератора в основную цепь

ны 0,001 и 0,1 м², а длины отрезков 0,3 и 0,3 м. Подставляя в формулу, получаем на частоте 100 Гц затухание 54 дБ. К этой величине следует добавить затухание из-за звукопоглощения стенками труб.

8.4. ЭЛЕКТРОАКУСТИЧЕСКОЕ ОБОРУДОВАНИЕ СТУДИЙ И КОМНАТ ПРОСЛУШИВАНИЯ

Общие сведения

В электроакустическое оборудование входят микрофоны, громкоговорящие агрегаты в аппаратной (аналогичные агрегатам в комнатах прослушивания), устройства регулировки времени реверберации в студиях, искусственные ревербераторы и амбиофонические системы.

Количество микрофонов определяет звукорежиссер. В комплекте должны быть микрофоны с разными характеристиками направленности (ненаправленные, двунаправленные, кардиоидные, с переменной характеристикой направленности, остронаправленные) и с разными частотными характеристиками; речевые (с подъемом 6 дБ/октава) и концертные (с равномерной характеристикой).

Кроме того, сейчас наряду с монофоническими широко применяют стереофонические микрофоны. В больших студиях их число (с учетом резервирования) доходит до 15—20 шт. Акустические громкоговорящие агрегаты используют обычно только такие, которые удовлетворяют требованиям высшего или первого класса качества. Для прослушивания речевых передач целесообразно использовать громкоговорители бытовой аппаратуры также высшего или первого класса. Так как ряд передач идет в стереофоническом варианте, то в аппаратных устанавливаются агрегаты для стереозвучания. В речевых студиях у диктора должны быть резервный микрофон и устройство для прослушивания передач.

К устройствам регулировки времени реверберации относятся различные поворачивающиеся щиты, экраны и т. п.

К наиболее употребительным устройствам искусственной реверберации относятся магнитные и листовые ревербераторы и эхо-камеры. Сигнал, подаваемый на вход устройств искусственной реверберации, подвергается обработке, в результате которой получается сигнал, в той или иной степени похожий на сигнал, получаемый в помещении с определенным временем реверберации. Этот сигнал подмешивается в основной, идущий по параллельной цепи (рис. 8.11).

Эффект соответствующего времени реверберации создается или путем изменения соотношения между основным и подмешиваемым сигналами, или путем изменения времени реверберации в самом устройстве. В этих случаях эквивалентное время реверберации может быть вычислено по следующей приближенной формуле:

$$\frac{1}{T_{\text{экв}}} = \frac{1}{T_{\text{рев}}} + \frac{1}{1,2} \lg \left(1 + \frac{\rho_{\text{осн}}^2}{\rho_{\text{рев}}^2} \right).$$

Она дает достаточно близкие к истине результаты при условии, что время реверберации самого ревербератора $T_{\text{рев}}$ на 30—40% больше времени реверберации помещения, и при соотношении звуковых давлений реверберирующего и основного сигналов, равного единице и больше.

Пример. Найти эквивалентное время реверберации при равенстве уровней основного и реверберирующего сигналов $\rho_{\text{осн}} = \rho_{\text{рев}}$ для времени реверберации ревербератора $T_{\text{рев}} = 6$ с и $T_{\text{рев}} = 2$ с. Подставляя данные в формулу, получим

$$\frac{1}{T_{\text{экв}}} = \frac{1}{T_{\text{рев}}} + \frac{1}{1,2} \lg 2.$$

Для $T_{\text{рев}} = 6$ с $T_{\text{экв}} = 2,4$ с; для $T_{\text{рев}} = 2$ с $T_{\text{экв}} = 1,33$ с. Найти то же самое при соотношении $\rho_{\text{осн}}^2/\rho_{\text{рев}}^2 = 0,1$.

Получаем

$$\frac{1}{T_{\text{экв}}} = \frac{1}{T_{\text{рев}}} + \frac{1}{1,2} \lg 1,1,$$

откуда для $T_{\text{рев}} = 6$ с $T_{\text{экв}} = 5$ с; для $T_{\text{рев}} = 2$ с $T_{\text{экв}} = 1,88$ с.

Магнитный ревербератор

На рис. 8.12 приведена схема магнитного ревербератора. В этой схеме используют несколько магнитных звуковоспроизводящих головок, расположенных по длине бесконечной петли магнитной ленты. На ленту все время записывают текущий вещательный сигнал. Этот сигнал считывается звуковоспроизводящими головками и затем стирается. С последней головки сигнал перезаписывается по линии обратной связи. Сигналы от каждой из звуковоспроизводящих головок смешиваются с уменьшением их уровня от 1-й головки к последней. На схеме показаны четыре воспроизводящие головки, каждая из которых дает сигнал, запаздывающий по отношению к основному на время, соответствующее сдвигу головки. Получаются многократно повторяемые сигналы с запаздыванием по отношению к основному. Если, например, подать на устройство один импульс, то он будет повторяться бесконечно долго, постепенно уменьшаясь по уровню. Недостаток этого метода — наличие тональной окраски отзвуков, обусловленных точной повторяемостью запаздывающих сигналов. Магнитный ревербератор позволяет изменять время ре-

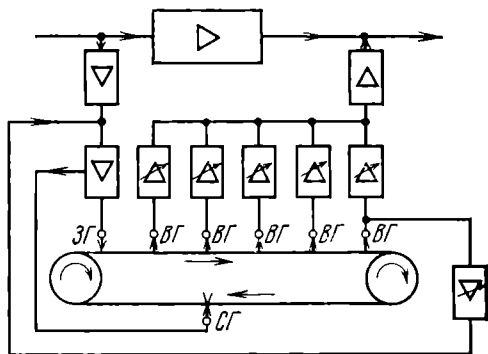


Рис. 8.12. Магнитный ревербератор:
ЗГ — записывающая головка; ВГ — воспроизводящая головка; СГ — стирающая головка

верберации от 0,5 до 5 с. Более высокие значения времени реверберации могут приводить к появлению генерации.

Этот вид ревербератора применяется только для речевых передач и в случаях создания эффекта от действия шумов в гулком помещении.

Листовой ревербератор

На рис. 8.13 показано устройство листового ревербератора. Для ревербератора используют стальной лист толщиной 0,4—0,5 мм размерами 1×2 м. Лист подвешен вертикально и закреплен в углах рамы. Сигнал подается к электроди-

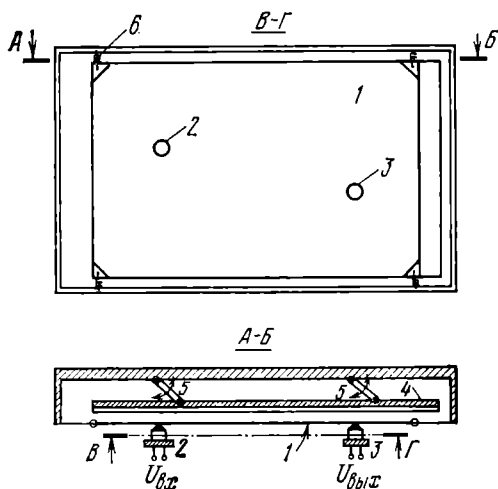


Рис. 8.13. Листовой ревербератор:
1 — тонкий стальной лист; 2 — двигатель (головка громкоговорителя); 3 — приемник (звукосниматель); 4 — панель со звукопоглощающим материалом; 5 — поворотное устройство для изменения расстояния панели от листа; 6 — подвеска листа

намическому возбудителю (он похож на электродинамический громкоговоритель, у которого вместо диффузора к звуковой катушке прикреплен металлический лист). Колебания от точки крепления возбудителя расходятся к краям листа, отражаются от них, и в результате на листе образуется сложная картина поперечных колебаний, аналогичных колебаниям мембраны. В одной из точек, удаленных от возбудителя (для уменьшения действия прямого звука), к листу прикреплен звукосниматель, аналогичный звукоснимателю у проигрывателя грампластинок. Он превращает механические колебания в электрические, которые усиливаются и подаются в основной канал с соответствующей амплитудой. Для регулирования времени реверберации (времени затухания колебаний листа мембраны) позади листа расположен демфирующий материал. В зависимости от расстояния между листом и материалом изменяется величина затухания, вносимого в колебания листа. Время реверберации меняется от 0,6—0,7 с до 5,5—6 с в области средних частот. При большом расстоянии листа от поглотителя время реверберации увеличивается на низких частотах до 16 с, в то же время на высоких частотах оно доходит только до 2 с. Если на средних частотах оно равно 4 с, то на низких будет 5 с, а на высоких — 2 с. Эта зависимость от частоты является существенным недостатком листового ревербератора. Но по качеству звучания листовой ревербератор приближается к звучанию в помещении, хотя в данном случае мы имеем дело только с двумерным распределением собственных частот, а не с трехмерным, как это требуется для помещений.

Листовой ревербератор используют и при передаче некоторых художественных программ (например, литературно-драматических).

Эхо-камера

На рис. 8.14 дана схема включения эхо-камеры. Эхо-камеры имеют обычно постоянное время реверберации, и поэтому эффект гулкости в передачу можно вводить только путем изменения соотношения между основным и реверберирующим сигналами. Правда, в некоторых случаях в эхо-камерах имеется возможность создавать два времени реверберации. Наибольшее время реверберации не получается больше 7 с. Камеры имеют объем около 80—100 м³. Стены их делают бетонными, возможно более гладкими, с полным отсутствием пор. Стены должны быть массивными во избежание резонансных явлений. Для диффузности звука стены располагают непараллельно друг другу. В больших радиодомах бывает до двух-трех эхо-камер, но этот способ считается дорогим и громоздким.

Из всех устройств искусственной реверберации все же этот способ дает звучание, более близкое к натуральному.

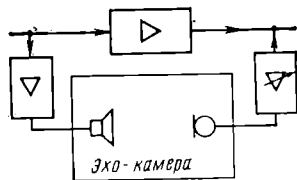


Рис. 8.14. Схема включения эхо-камеры

Амбиофонические системы

Эти системы используют акустическую обратную связь в регенеративном режиме в том же помещении, откуда ведется передача, поэтому ее действие ощущают и сами исполнители. На рис. 8.15 показана схема амбиофонической системы. Кроме основных микрофонов, в студии устанавливают не менее двух дополнительных микрофонов, удаленных от исполнителей. Сигнал от них подается в отдельные каналы звуковоспроизведения с громкоговорителями, находящимися в той же студии в различных ее точках, иногда вводят в каналы временные задержки. Громкоговорители имитируют отраженные лучи, которые воспринимаются дополнительными микрофонами и вновь подаются на громкоговорители. Многократное повторение отзвуков создает увеличение времени реверберации по отношению к собственному времени реверберации студии. Если студия была сильно заглушена, то с помощью амбиофонической системы время реверберации увеличивается до 5—7 с. Правда, получение большего времени реверберации может приводить к неустойчивому режиму и даже к генерации, поэтому время реверберации более 3—4 с не увеличивают, но этого и не требуется даже для создания эффекта гулкого помещения, в котором воспроизводится музыка (например, органные залы).

В амбиофоническом оборудовании очень жесткие требования предъявляют к равномерности частотной характеристики. Даже такая

неравномерность, как 6 дБ, в передаваемом частотном диапазоне не позволяет получить время реверберации, заметно отличающееся от времени реверберации самого помещения. Конденсаторные микрофоны удовлетворяют этим требованиям, тогда как даже лучшие серийные громкоговорители не удовлетворяют им. Необходимо применять специально изготовленные громкоговорители.

Амбиофонический тракт возбуждается от диффузной составляющей звукового поля. Генерация наступает, когда усиление по всей петле амбиофонической

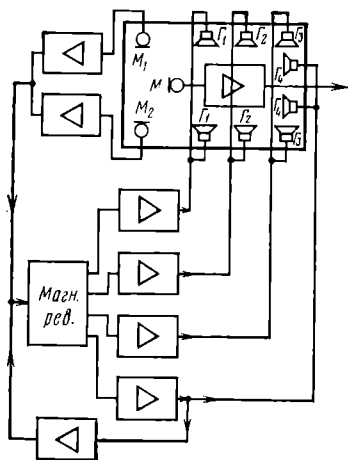


Рис. 8.15. Схема амбиофонической системы с магнитным ревербератором и обратной акустической связью

системы равно единице, т. е. когда усиление усилителя достигает критического значения

$$K_{yc} = \frac{U_{гр}}{U_m} = \frac{1}{E_m} \frac{1}{E_{гр}} \frac{p_1}{p_{диф}},$$

Здесь E_m — чувствительность микрофона, В/Н; $E_{гр}$ — чувствительность громкоговорителя, Н/В; $U_{гр}$ — напряжение на входе громкоговорителя; U_m — на-

пряжение на выходе микрофона; $\frac{p_{диф}}{p_1} = \sqrt{\frac{16\pi n(1-\alpha_{ср})}{\alpha_{ср} S \Omega_r}}$ — отношение звукового давления диффузной составляющей, создаваемой амбиофонической системой из n громкоговорителей, к звуковому давлению, развиваемому одним громкоговорителем на расстоянии 1 м от его центра; $\alpha_{ср}$ — средний коэффициент поглощения помещения ограничивающих поверхностей; S — их площадь.

Пример. Определим критическое значение усиления усилителя для следующих данных: чувствительность микрофона $1,26 \cdot 10^{-3}$ В/Н; чувствительность громкоговорителя 0,126 Н/В; число громкоговорителей 10; $\alpha_{ср} = 0,2$; $S = 700$ м²; коэффициент концентрации громкоговорителей $\Omega_r = 4$. Подставляя эти данные в формулы, получаем критическую величину усиления усилителя

$$K_{yc} = \frac{1}{1,26 \cdot 10^{-3}} \frac{1}{0,126} \sqrt{\frac{7}{5}} = 7500, \quad \frac{p_{диф}}{p_1} = \sqrt{\frac{16\pi 10(1-0,2)}{0,2 \cdot 700 \cdot 4}} =$$

$$= \sqrt{\frac{5}{7}}$$

Чтобы устройство не стало генерировать, необходимо уменьшить его усиление не менее чем в 1,4 раза, т. е. на 3 дБ. Время реверберации, получаемой при использовании амбиофонической системы, зависит от отношения величин рабочего усиления к критическому: $T_{амб} = T_{осв} / (1 - \beta^2)$, где $\beta = K_{раб} / K_{кр}$.

Пример. Найти время реверберации при работе амбиофонической системы, если основное время реверберации равно 1 с, для следующих соотношений величин усиления: $\beta = 0,7$; 0,5 и 0,63 (т. е. на 3, 6 и 4 дБ меньше критического).

Для первого случая $T_{амб} = 1 / (1 - 0,7^2) = 2$ с; для второго $T_{амб} = 1 / (1 - 0,5^2) = 1,33$ с; для третьего $T_{амб} = 1 / (1 - 0,63^2) = 1,67$ с.

Таким образом, если для максимума чувствительности громкоговорителя время реверберации равно 2 с, то при снижении чувствительности на 3 дБ время реверберации уменьшится до 1,33 с, а при снижении на 1 дБ — до 1,67 с. Поэтому неравномерность частотной характеристики громкоговорителя, равная 6 дБ, приводит к неравномерности частотной зависимости времени реверберации в $2/1,33 = 1,5$ раза, что больше допустимой нормы. А при неравномерности частотной характеристики, равной 4 дБ, это соотношение будет равно $2/1,67 = 1,2$ раза, т. е. в пределах нормы. Для уменьшения возможности возникновения генерации применяют отдельные амбиофонические устройства для разных участков частотного диапазона. Устройство получается громоздким. Иногда для уменьшения числа громкоговорителей применяют комбинацию акустической системы с магнитным ревербератором (с подачей обратной связи через помещение).

Аналогичные системы применяют для регулирования времени реверберации в залах. В СССР такая универсальная амбиофоническая система применена во Дворце съездов.

Комнаты прослушивания и аппаратные оборудуют как высококачественными громкоговорящими агрегатами, так и нормальной аппаратурой вещания. Комнаты прослушивания вещательных передач по акустике должны соответствовать среднему жилому помещению ($V = 50 \div 100$ м³; $T = 0,8 \div 1$ с).

ОЗВУЧЕНИЕ И ЗВУКОУСИЛЕНИЕ

9.1. ОСНОВНЫЕ ПОКАЗАТЕЛИ СИСТЕМ ОЗВУЧЕНИЯ

Озвучение — громкоговорящее воспроизведение акустических сигналов (вещания, звукозаписи, различной информации, в том числе сигналов гражданской обороны и др.) в заданных местах расположения слушателей в помещении или на открытом воздухе.

Максимальный и минимальный уровни поля — максимальная и минимальная величины уровня прямого звука (т. е. без учета интенсивности отраженного звука), создаваемые системой озвучения на озвучиваемой поверхности при подведении номинальной мощности к громкоговорителям, входящим в систему озвучения. Озвучиваемой поверхностью называют поверхность, проходящую на уровне голов слушателей. Для сидящих слушателей считают, что эта поверхность находится на высоте 1 м от пола, а для стоящих — на 1,5 м от поверхности, на которой стоят слушатели. Величины этих уровней зависят от назначения системы озвучения. В табл. 9.1 приведены рекомендуемые расчетные величины минимальных уровней поля для музыкальных передач и ориентировочные величины этих уровней для речевых передач в условиях невысоких уровней акустических шумов (не выше 50 дБ).

ТАБЛИЦА 9.1

Уровни поля и неравномерность озвучения

Назначение установки	Минимальный уровень поля, дБ	Максимальная неравномерность озвучения, дБ
Воспроизведение музыки и театральных эффектов	100	6
Воспроизведение музыкальных программ	94—96	6
Воспроизведение специальных программ (танцы, гимнастика и т. п.)	94—96	8
Усиление речи (для низких уровней шумов)	80—86	8

Неравномерность озвучения — разность между максимальной и минимальной величинами уровня поля в пределах озвучиваемой поверхности $\Delta L = L_{\text{макс}} - L_{\text{мин}}$. В табл. 9.1 приведены предельные значения этой неравномерности (с учетом интерференционной неравномерности).

Неравномерность частотной характеристики системы озвучения в основном определяется неравномерностью частотной характеристики электроакустической аппаратуры и частично затуханием в воздухе (при распространении звука на большие расстояния)¹.

Акустические шумы — шумы в пределах озвучиваемой поверхности, создаваемые публикой, различными агрегатами и т. п., и шумы, приходящие извне, например от транспорта. Обычно уровни и спектры этих шумов или бывают заранее заданы, или должны быть измерены в реальных условиях. Стремятся к их уменьшению, но в ряде случаев они неизбежны. На рис. 9.1 приведены типовые акустические шумы для помещений и открытых пространств. Большинство

¹ Подробнее см. гл. 11.

во из них имеет преобладание на низких частотах, но некоторые шумы, как, например, шумы в колоннах демонстрантов, имеют значительное преобладание в диапазоне частот выше 1000 Гц. Влияние шумов учитывают только при расчетах понятности речи.

Слитность звучания — отсутствие заметного или мешающего эха. Для музыкальных передач не должно быть заметного эха, т. е. следует стремиться к тому, чтобы уровень запаздывающих сигналов удовлетворял соотношениям, при-

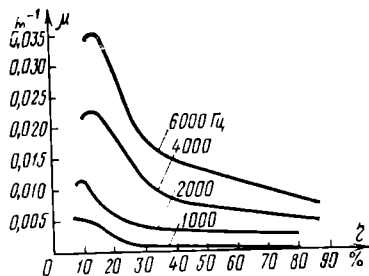
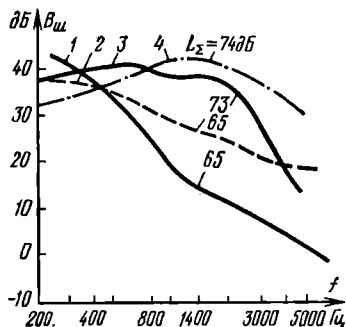


Рис. 9.1. Частотные зависимости спектральной плотности акустических шумов:

1 — речевые шумы в большом помещении; 2 — производственные шумы; 3 — шумы на площади при массовом гулянии; 4 — шумы демонстрации на Дворцовой площади Ленинграда (на кривых показан суммарный уровень шума)

Рис. 9.2. Зависимость коэффициента затухания звука в воздухе от влажности и частоты

веденным на кривой 1 рис. 2.21. Для речевых передач эхо не должно снижать понятность речи, поэтому величина уровней запаздывающих звуковых волн должна удовлетворять соотношениям, приведенным на кривой 2 рис. 2.21.

По расположению громкоговорителей системы озвучения делятся на сосредоточенные (централизованные), зональные (децентрализованные) и распределенные.

К сосредоточенным системам относятся системы, имеющие размеры (расстояние между крайними громкоговорителями), в несколько раз меньшие расстояния от них до ближайших слушателей. При этом если расстояние между соседними громкоговорителями больше наиболее длинной звуковой волны в передаваемом диапазоне частот, то в каждой точке звукового поля складываются интенсивности или квадраты звуковых давлений, создаваемые каждым громкоговорителем: $p_{\Sigma}^2 = p_1^2 + p_2^2 + \dots$. При близком расположении одинаковых громкоговорителей друг к другу (почти вплотную) складываются звуковые давления: $p_{\Sigma} = p_1 + p_2 + \dots$

К зональным системам относятся системы озвучения, представляющие собой сосредоточенные системы, каждая из которых обслуживает в основном свою зону озвучения. Эти зоны, как правило, стыкуют между собой. На стыках зон складываются интенсивности от ближайших громкоговорителей. На линиях стыка, если громкоговорители создают одинаковые интенсивности, уровень увеличивается на 3 дБ, в углах зон — на 6 дБ (см. рис. 9.9).

К распределенным системам относятся системы озвучения, в которых громкоговорители распределены по всему озвучиваемому пространству или помещению и для которых уровни поля в каждой точке поля определяются суммарным действием всех или большинства громкоговорителей, входящих в систему.

9.2. ОСОБЕННОСТИ ОЗВУЧЕНИЯ ОТКРЫТЫХ ПРОСТРАНСТВ

К открытым пространствам относят: улицы и площади, спортивные площадки и стадионы, открытые перроны и сортировочные станции, зеленые театры и летние эстрады, парки и зоны гуляния и отдыха, открытые выставки и площадки показа и рекламы и т. п. Кроме того, к открытым пространствам относятся зоны оповещения и информации на открытом воздухе, например, для целей гражданской обороны.

Спецификой открытых пространств являются их зависимость от климатических факторов и атмосферных условий и необходимость учета затухания в воздухе, так как протяженность озвучиваемых зон доходит до нескольких сотен метров и даже километров. На рис. 9.2 приведены зависимости затухания звуковых волн в воздухе из-за вязкости среды от величины относительной влажности для разных частот колебаний. Из этих данных следует, что высокие частоты (выше 1000 Гц) затухают очень быстро, особенно при относительной влажности воздуха около 15%: на частоте 10 кГц затухание достигает 28 дБ на каждые 100 м. При нормальной влажности (около 50%) затухание получается вдвое меньше. Для больших расстояний (более 100 м) следует пользоваться графиками рис. 1.16. Кроме того, затухание из-за ветра, дождя и снега может достигать 8—10 дБ на каждые 100 м. Ветер и неравномерный нагрев поверхности земли вообще могут нарушить передачу, так как звуковые лучи из-за искривления траектории могут уходить вверх или круто вниз (см. также § 1.12).

К специфике открытых пространств можно также отнести и более высокий уровень акустических шумов, например, от транспорта и различных машин.

Применительно к озвучению открытых пространств введен дополнительный показатель системы озвучения — локализации звукового поля — величина уменьшения уровней поля при удалении от зоны озвучения. Стремится снизить уровень поля за пределами озвучиваемой зоны так, чтобы в зоне других объектов с людьми этот уровень не был выше определенных санитарных норм при условии подведения номинальной мощности к системе озвучения.

Для озвучения открытых пространств применяют сосредоточенные и зональные системы. Распределенные системы в них применяются в редких случаях, когда требуется озвучить небольшую площадку с достаточно высоким качеством звучания.

9.3. СОСРЕДОТОЧЕННЫЕ СИСТЕМЫ ОЗВУЧЕНИЯ

Для создания сосредоточенных систем озвучения используют в основном рупорные громкоговорители и звуковые колонки, гораздо реже — радиальные громкоговорители и очень редко (только для небольших объектов) — диффузорные громкоговорители.

Рупорные громкоговорители

Если длина озвучиваемой поверхности невелика (до 25 м), то чаще применяют рупорные громкоговорители с круглым рупором. Для более длинных узких объектов (например, улиц) целесообразнее применять рупорные громкоговорители с прямоугольным выходным отверстием рупора, устанавливая рупор на короткую базу. Два рупорных громкоговорителя (с круглым сечением рупора), установленные один над другим, эквивалентны рупорному громкоговорителю с прямоугольным сечением выходного отверстия. Если установить три или четыре рупорных громкоговорителя один над другим, то можно еще более увеличить направленность и дальность действия системы. Для озвучения широкой площади громкоговорители располагают или в одной точке веером, или по ширине площади на небольших расстояниях друг от друга. Заметим, что это только ориентировочные рекомендации, точные данные можно получить в результате расчета системы.

Характеристику направленности рупорного громкоговорителя для простоты расчетов аппроксимируют эллипсоидом, вершина которого находится в рабочем центре излучателя, т. е. в центре выходного отверстия рупора (рис. 9.3). Ось

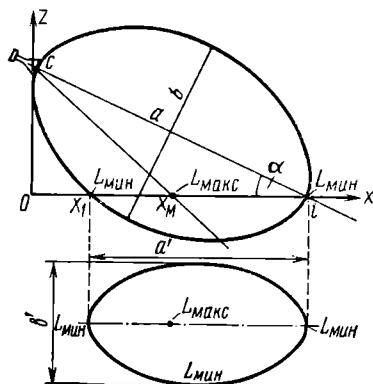


Рис. 9.3. Озвучение плоской поверхности рупорным громкоговорителем. На нижней проекции показан эллипс, ограничивающий ослуживаемую зону на озвучиваемой поверхности

рупора обычно направляют в удаленную точку озвучиваемой поверхности. Если озвучиваемая поверхность плоская и горизонтальная, то угол наклона оси рупора по отношению к горизонтальной определится из равенства $\operatorname{tg} \alpha = h_{г.с}/l$ или $\cos \alpha = l/a$, где $h_{г.с} = h_{г.р} - h_0$ — высота подвеса громкоговорителя над озвучиваемой плоскостью; h_0 — высота озвучиваемой плоскости; $h_{г.р}$ — высота подвеса громкоговорителя над наземной поверхностью; $a^2 = l^2 + h_{г.с}^2$ — расстояние удаленной точки озвучиваемой плоскости от громкоговорителя; l — проекция расстояния a на горизонтальную ось.

При таком расположении громкоговорителя диаграмма направленности в вертикальной плоскости будет пересекать плоскость озвучивания в точках x_1 и l , где

$$x_1 = \frac{h_{г.с} e_b^2 \operatorname{ctg} \alpha}{1 + (1 - e_b^2) \operatorname{ctg}^2 \alpha} = \frac{l e_b^2}{1 + (1 - e_b^2) l^2 / h_{г.с}^2},$$

а линия пересечения эллипсоида с озвучиваемой поверхностью имеет вид эллипса с осями $a' = l - x_1$ и $b' = a' \sqrt{1 - e_g^2 \cos^2 \alpha}$, где e_b и e_g — эксцентриситеты эллипсоида, т. е. диаграмм направленности в продольном и поперечном сечениях рупора. Их часто называют эксцентриситетами диаграмм направленности в вертикальной и горизонтальной плоскостях, проходящих через ось рупора. Величины эксцентриситетов для ряда громкоговорителей см. в табл. 9.2.

ТАБЛИЦА 9.2

Эксцентриситеты характеристик направленности громкоговорителей

Громкоговорители	$e_{в.ср}^*$		Громкоговорители	$e_{в.ср}^*$	
Звуковые колонки:					
2 КЗ	0,5	0,95	25 КЗ 4 и 50 КЗ 6	0,93	0,981
8 КЗ	0,71	0,973	25 КЗ 5 и 6	0,92	0,977
10 КЗ 1 и 2	0,9	0,97	25 КЗ 2Т	0,91	0,972
25 КЗ 1 и 2	0,9	0,976	Рупорные громкоговорители:		
50 КЗ 1 и 2	0,9	0,979	25 ГРД-1, 50 ГРД-9	0,77	0,945
100 КЗ 1 и 2	0,91	0,981	100 ГРД-1, 10 ГРД-5	0,77	0,77
25 КЗ 3 и 50 КЗ 3	0,93	0,983	P-100	0,94	0,94

* Среднее значение по частотному диапазону.

Звуковое давление на всем периметре эллипса, ограничивающего зону озвучения, будет одинаковым и равным звуковому давлению в удаленной точке, т. е. в этих точках везде будет уровень

$$L_{\min} = 20 \lg p_{\min}/p_0 = 20 \lg p_{\min} + 94 \quad (p_0 = 2 \cdot 10^{-5} \text{ Па}, p_{\min} = p_1/a),$$

где p_1 — номинальное звуковое давление, развиваемое громкоговорителем на расстоянии 1 м от рабочего центра.

Пример. Определим уровень поля в удаленной точке озвучиваемой поверхности на расстоянии 50 м от центра громкоговорителя, если для него $p_1 = 33,5$ Па; $p_{\min} = 33,5/50 = 0,67$ Па. По вышеприведенной формуле находим, что искомый уровень $L_{\min} = 90,5$ дБ.

Внутри эллипса уровень будет выше, чем по его периметру. Максимальный уровень L_{\max} будет в точке с координатой

$$x_m = h_{г.с} \operatorname{tg} \alpha \left[\frac{1 + \operatorname{ctg}^2 \alpha}{\sqrt{1 + (1 - e_b^2) \operatorname{ctg}^2 \alpha}} - 1 \right]$$

Заметим, что эта точка не лежит на середине между x_1 и l . Разность между уровнем в этой точке и в удаленной равна неравномерности озвучения в пределах эллипса. Если зона озвучения совпадает с этим эллипсом, то эта разность будет неравномерностью озвучения на озвучиваемой плоскости:

$$\Delta L = L_{\max} - L_{\min} = 20 \lg 0,5 \left[1 + \sqrt{1 + (1 - e_b^2) \operatorname{ctg}^2 \alpha} \right].$$

Эта неравномерность определяется эксцентриситетом в вертикальной плоскости и углом наклона оси громкоговорителя. Вне эллипса озвучения, в том числе и на участках, лежащих между этим эллипсом и проекцией точки подвеса на горизонтальную плоскость, уровень будет ниже, чем в удаленной точке, т. е. это будет необслуживаемая зона. При необходимости ее озвучения применяют дополнительные громкоговорители ближнего действия.

Чем ниже подвешен громкоговоритель (точнее, чем меньше угол подвеса), тем больше неравномерность озвучения, но меньше величина необслуживаемой зоны вблизи громкоговорителя ($0-x_1$).

Пример. Для рассмотренного выше расположения громкоговорителя ($a = 50$ м) найдем неравномерность и другие параметры озвучения, если эксцентриситеты диаграммы направленности в вертикальной и горизонтальной плоскостях $e_b = e_r = 0,77$, а высота подвеса над озвучиваемой плоскостью $h_{г.с} = 8$ м. Угол наклона оси громкоговорителя определится из формулы $\operatorname{tg} \alpha = h_{г.с}/l$:

$$\operatorname{tg} \alpha = 8/\sqrt{50^2 - 8^2} = 0,162, \text{ так как } l = \sqrt{a^2 - h_{г.с}^2}.$$

Следовательно, неравномерность озвучения

$$\Delta L = 20 \lg 0,5 [1 + \sqrt{1 + (1 - 0,77^2) \cdot 1/0,162^2}] = 8 \text{ дБ}.$$

Точка с максимальным уровнем

$$x_m = 8 \cdot 0,162 \left[\frac{1 + 1/0,162^2}{\sqrt{1 + (1 - 0,77^2) \cdot 1/0,162^2}} - 1 \right] = 11,2 \text{ м}.$$

Ближняя к громкоговорителю точка с минимальным уровнем

$$x_1 = \frac{8 \cdot 0,77^2 \cdot (1/0,162)}{1 + (1 - 0,77^2) \cdot 1/0,162^2} = 1,8 \text{ м}.$$

Расстояние $l = 8/0,162 = 49,4$ м. Длина эллипса озвучения $a' = 49,4 - 1,8 = 47,6$ м.

Ширина эллипса озвучения $b' = 47,6 \sqrt{1 - 0,77^2 \cdot \left(\frac{49,4}{50}\right)^2} = 30,9$ м.

Необходимую высоту подвеса громкоговорителя над озвучиваемой плоскостью при заданной координате удаленной точки и неравномерности находят из формулы

$$h_{г.с} = l \sqrt{(1 - e_B^2) / [(2 \cdot 10^{0,05 \Delta L} - 1)^2 - 1]}.$$

Пример. Для $\Delta L = 8$ дБ и $l = 50$ м

$$h_{г.с} = 50 \sqrt{(1 - e_B^2) / [(2 \cdot 10^{0,05 \cdot 8} - 1)^2 - 1]} = 12,82 \sqrt{1 - e_B^2}.$$

Если взять громкоговоритель с эксцентриситетом в вертикальной плоскости $e_B = 0,77$, то высота подвеса

$$h_{г.с} = 12,82 \sqrt{1 - 0,77^2} = 8,2 \text{ м}; h_{гр} = 8,2 + 1,5 = 9,7 \text{ м}.$$

Если уменьшить высоту подвеса громкоговорителя с h_1 до h_2 (рис. 9.4), то увеличится неравномерность озвучения, но при этом уменьшится необслуживаемая зона с $x_{1,1}$ до $x_{1,2}$ (см. кривые 1 и 2). Если уменьшить высоту подвеса, но одновременно взять громкоговоритель с большей направленностью в вертикальной плоскости (см. кривую 3), то можно сохранить величину обслужи-

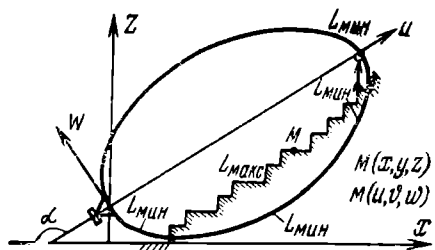
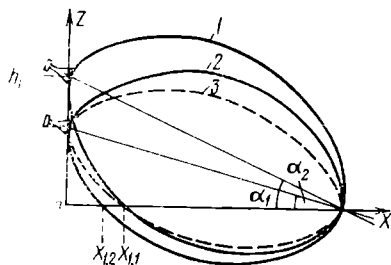


Рис. 9.4. Влияние высоты подвеса и направленности рупорного громкоговорителя на величину неравномерности озвучения необслуживаемой зоны:

1 и 2 — влияние высоты при одинаковой направленности 2 и 3 — влияние направленности при одинаковой высоте подвеса

Рис. 9.5. Озвучение сложной поверхности (стадион)

живаемой зоны и уменьшить неравномерность озвучения. Если поставить громкоговоритель один над другим, то такой системой можно обслужить вдвое большую длину и ширину площади (т. е. вчетверо большую площадь), а неравномерность озвучения и высота подвеса при этом будут примерно такими же, как для одного громкоговорителя с одинарными размерами. Поясним это на примере.

Пример. Возьмем два одинаковых громкоговорителя из предыдущего примера и поставим их один над другим. Так как они имеют общее номинальное звуковое давление вдвое больше, чем один, то дальность действия можно увеличить вдвое, т. е. $l = 100$. Эксцентриситет диаграммы направленности в вертикальной плоскости для двоянного громкоговорителя вычисляется по следующей формуле¹: $e_{B2} = \sqrt{1 - (1 - e_{B1}^2)/4}$, где e_{B1} — эксцентриситет для одиночного громкоговорителя. Поэтому для нашего случая $e_{B2} = \sqrt{1 - (1 - 0,77^2)/4} = 0,95$.

Высота подвеса $h_{г.с} = 100 \sqrt{\frac{1 - 0,95^2}{(2 \cdot 10^{0,05 \cdot 20} - 1)^2 - 1}} = 8$ м. Но так как дальность

¹ Эксцентриситет эллипса для n громкоговорителей, поставленных один над другим, $e_{\Sigma} = \sqrt{1 - (1 - e_{B1}^2)/n^2}$.

увеличена вдвое, то площадь озвучения увеличилась вчетверо при такой же неравномерности озвучения и примерно той же высоте подвеса. Необслуживаемая зона в этом случае увеличится

$$x_1 = \frac{100 \cdot 0,95^2 \cdot 8^2}{8^2 + (1 - 0,95^2) \cdot 100^2} = 5,6 \text{ м.}$$

Если поверхность озвучения имеет криволинейную образующую, например, в случае озвучения больших стадионов (рис. 9.5), то в таком случае ось громкоговорителя также направляют в удаленную точку на границе зоны озвучения, а неравномерность озвучения определяют методом координат. Для этого центр координат располагают в рабочем центре излучателя (в центре выходного отверстия рупора), ось u совмещают с рабочей осью излучателя, ось w — с продольной осью плоскости излучателя, а ось v — с поперечной осью (см. рис. 9.5). В точке с координатами u , v и w звуковое давление

$$p = \frac{p_1 u}{u^2 + v^2 / (1 - e_r^2) + w^2 / (1 - e_b^2)},$$

где p_1 — звуковое давление на расстоянии 1 м от центра координат, т. е. от рабочего центра излучателя.

В тех случаях, когда есть характеристика направленности громкоговорителя и видно, что она отклоняется от идеализированной (эллипсоидальной), пользуются следующей формулой:

$$p = \frac{p_1}{\sqrt{u^2 + v^2/R_r(\theta_r)} + \sqrt{u^2 + w^2/R_b(\theta_b)} - u},$$

где $R_b(\theta_b)$ и $R_r(\theta_r)$ — радиусы-векторы диаграмм направленности в продольной (вертикальной) и поперечной (горизонтальной) плоскостях, проходящих через рабочую ось громкоговорителя;

$$\theta_b = \arctg w/u \text{ и } \theta_r = \arctg v/n.$$

Пример. Заданы координаты точки $u=1$ м, $v=2$ м и $w=5$ м, $p_1=50$ Па, а также диаграммы направленности в продольной и поперечной плоскостях. Надо найти звуковое давление в заданной точке. Имеем $\tg \theta_r = 2:1=2$; $\tg \theta_b = 5:1=5$, откуда $\theta_r = 63,4^\circ$ и $\theta_b = 78,7^\circ$. По этим углам из диаграмм направленности находим $R_r = 0,2$ и $R_b = 0,05$. Звуковое давление в заданной точке

$$p = \frac{50}{\sqrt{1 + 2^2/0,2} + \sqrt{1 + 5^2/0,05} - 1} = 0,446 \text{ Па,}$$

что соответствует уровню $L = 20 \lg 0,446 + 94 = 87$ дБ.

А если рассчитать p для этого громкоговорителя (для $e_r = 0,77$ и $e_b = 0,95$) по эллипсоидальной характеристике, то получим уровень, равный 80 дБ, т. е. меньший (получился запас в уровне).

Для удобства расчетов обычно задают координаты озвучиваемой поверхности в прямоугольной системе x , y и z (x — по длине поверхности, y — по ширине и z — по высоте ее, рис. 9.6). Для перехода к координатам u , v и w используют следующие формулы:

$$u = x \cos \alpha + (h_{rp} - z) \sin \alpha; \quad v = y;$$

$$w = x \sin \alpha - (h_{rp} - z) \cos \alpha,$$

где $\tg \alpha = h_{r.c}/l = (h_{rp} - h_{y.c})/l$; h_{rp} — координата точки рабочего центра излучателя (громкоговорителя); $h_{r.c}$ — высота рабочего центра излучателя над головами удаленного слушателя; $h_{y.c}$ и $l = x_{\max}$ — координаты удаленной точки озвучиваемой поверхности.

Пример. Заданы форма и размеры озвучиваемой поверхности (см. рис. 9.5). Координаты: высота подвеса громкоговорителя $h_{rp} = 6$ м, высота озвучиваемой

поверхности для удаленного слушателя $h_{y.c}=z_{y.c}=15$ м и $x_{y.c}=50$, то же самое для ближнего слушателя $z_{б.c}=1,5$ м и $x_{б.c}=10$ м и для слушателя, находящегося на середине между громкоговорителем и удаленным слушателем, $z_{с.c}=6$ м и $x_{с.c}=25$ м. Координату v везде возьмем равной нулю, т. е. расчет ведем только для вертикальной плоскости излучателя. Угол между осью громкоговорителя с горизонталью определится из формулы

$$\operatorname{tg} \alpha = (6 - 15)/50 = -0,18, \quad \alpha = -10,2^\circ$$

(отрицательный угол означает направление оси вверх от горизонтали). Для этого угла $\sin \alpha = -0,177$, $\cos \alpha = 0,984$. Возьмем громкоговоритель с направленностью в вертикальной плоскости, определяемой эксцентриситетом $e_v = 0,945$, и развивающим звуковое давление на расстоянии 1 м от излучателя, равное 48 Па. Вычисленные данные для координат u и w по формулам

$$u = 0,984x - (6 - z) \cdot 0,177 \quad \text{и} \quad w = -0,177x - (6 - z) \cdot 0,984$$

и для звукового давления

$$p = \frac{48u}{u^2 + w^2 / (1 - 0,945^2)}$$

сводим в табл. 9.3. По звуковому давлению находим уровни поля (в децибелах)

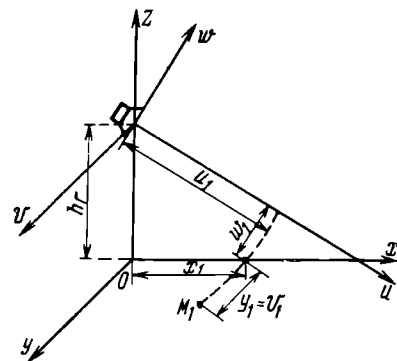


ТАБЛИЦА 9.3

Данные расчета звукового поля в продольной плоскости

	$z, \text{ м}$	$u, \text{ м}$	$w, \text{ м}$	$p, \text{ Па}$	$L, \text{ дБ}$
10	1,5	9,04	-6,2	0,984	93,8
25	6	24,6	-4,42	1,5	97,5
50	15	50,8	0	0,945	93,5

← Рис. 9.6. Преобразование системы координат для расчета звуковых полей

В продольном направлении по оси громкоговорителя неравномерность получилась равной 4 дБ. По величине уровня громкоговоритель обеспечивает передачу музыкальных программ.

Если задаться координатой y , то можно вычислить уровни и в точках сбоку от оси громкоговорителя. Уровни получатся меньше, чем по оси, но если стадион широкий, то его озвучивают несколькими громкоговорителями. Для каждого из них следует подсчитать уровни и просуммировать квадраты давлений.

Пример. Пусть второй громкоговоритель находится на расстоянии 20 м от первого. Определим суммарный уровень от обоих громкоговорителей в точке первого ряда ($x=10$ м и $z=1,5$ м) на середине между громкоговорителями ($y=10$ м)

$$p = \frac{48 \cdot 9,04}{9,04^2 + 10^2 / (1 - 0,77^2) + 6,2^2 / (1 - 0,945^2)} = 0,63 \text{ Па},$$

где $e_r = 0,77$.

Суммарное давление $p = \sqrt{2 \cdot 0,63^2} = 0,895$ Па.

Это давление соответствует 93 дБ. Следовательно, неравномерность озву-

чения будет равна 4,5 дБ, так как в точках на удаленном ряду от действия двух громкоговорителей уровень повысится и будет около 96,5 дБ.

Если будет несколько громкоговорителей, то неравномерность озвучения можно определить только путем постепенного поиска, т. е. путем определения уронеи в ряде точек, в которых наиболее возможны максимальные и минимальные уровни.

Озвучение рупорными громкоговорителями из-за их низких качественных показателей применяют только для передачи речевой информации. Их используют и для передачи музыкальных программ во время демонстраций, митингов и т. п., когда уровень акустических шумов большой и другие искажения незаметны. Рупорные громкоговорители имеют высокое номинальное звуковое давление, поэтому ими можно озвучивать большое пространство с одной точки. (Рупорный громкоговоритель 100 ГРД имеет номинальное звуковое давление 48 Па, т. е. на расстоянии 240 м создает давление около 0,2 Па, что соответствует уровню звука 80 дБ, равному уровню очень громкой речи на расстоянии 1 м.) Озвучение рупорными громкоговорителями дает плохую локализацию звукового поля во фронтальной полусфере.

Пример. Определим уровень, создаваемый громкоговорителем 100 ГРД на расстоянии 500 м от его центра. Звуковое давление $p_{500} = 48/500 = 0,096$ Па.

Давление 0,96 соответствует 93,6 дБ, а полученное нами, следовательно, на 20 дБ меньше, т. е. 73,6 дБ. Это очень высокий уровень, превышающий санитарные нормы. Поэтому широкое использование сосредоточенных систем из рупорных громкоговорителей, например, для железнодорожных товарных станций недопустимо, если близко к ним расположена жилая зона (в пределах 500 м).

Рупорные громкоговорители имеют хорошую осевую концентрацию излучения, и поэтому их излучение в тыльную полусферу невелико, что дает возможность хорошей локализации поля в этой полусфере (можно располагать громкоговорители близко к жилым помещениям без опасности превышения санитарных норм). Одним из недостатков систем озвучения рупорными громкоговорителями является подчеркивание ими низких частот (бубнение) в зоне под громкоговорителями, что обусловлено резким уменьшением направленности на частотах ниже 300 Гц.

Звуковые колонки

Акустическую (рабочую) ось звуковой колонки направляют в удаленную точку озвучиваемой поверхности с наклоном α , где $\operatorname{tg} \alpha = h_{к.с}/l$ (l — расстояние проекции точки подвеса колонки на горизонтальную плоскость от удаленной точки; $h_{к.с}$ — высота подвеса колонки над озвучиваемой поверхностью). Характеристику направленности звуковой колонки во фронтальной полусфере аппроксимируют полуэллипсоидом, центр которого совпадает с рабочим центром излучателя, т. е. колонки (рис. 9.7), а оси полуэллипса направлены следующим образом: большая — по рабочей оси колонки, а малые — по продольной и по поперечной осям выходного отверстия. Соответственно малые оси эллипсов в диаграммах направленности в продольной и поперечной плоскостях, проходящих через акустическую ось, будут определять эксцентриситеты этих эллипсов. $e_b = \sqrt{1 - b_b^2/a^2}$ и $e_r = \sqrt{1 - b_r^2/a^2}$. Эти эксцентриситеты для ряда колонок даны в табл. 9.2.

Звуковую колонку можно расположить так, что уровень под колонкой будет меньше, чем в удаленной точке (см. рис. 9.7а), равный ему (см. рис. 9.7б) и больше его (см. рис. 9.7в). При этом во всех точках, находящихся внутри эллипса озвучения, уровень будет выше, чем в точках, лежащих на самом эллипсе. Первый вариант применяют, когда под излучателем находится первичный источник звука (см. звукоусиление), второй вариант наиболее часто используется в системах озвучения. Третий вариант применяют, если нет воз-

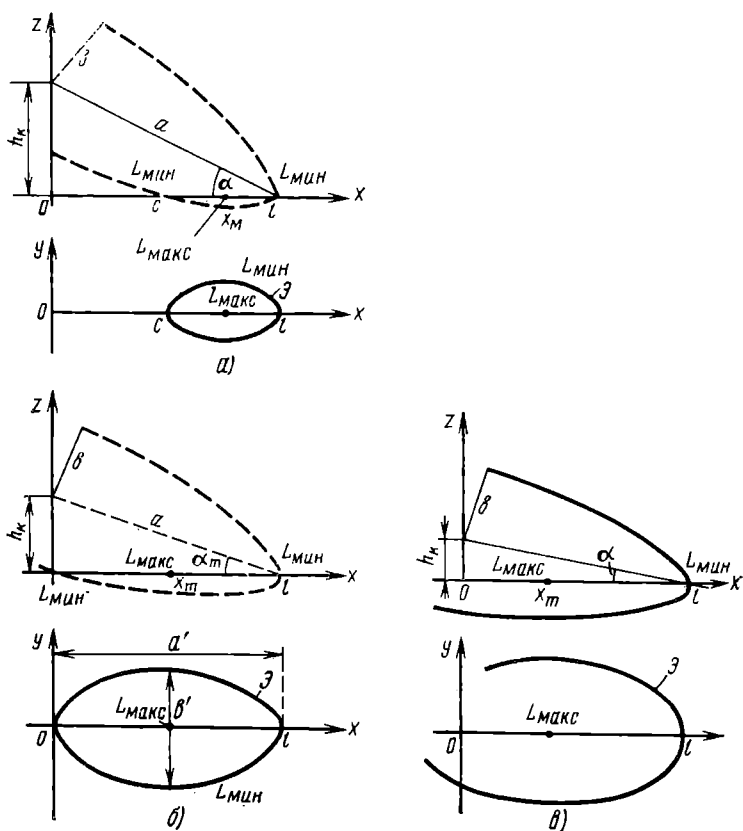


Рис. 9.7. Озвучение плоской поверхности звуковой колонкой:

а) при высоком подвесе; б) при оптимальной высоте подвеса для озвучения (Э — эллипс озвучения); в) при низком подвесе

возможности применения второго варианта (например, когда ограничена или задана высота подвеса громкоговорителя).

Для второго варианта $a' = l = a \cos \alpha$, а точка с максимальным уровнем находится в середине эллипса озвучения. При этом неравномерность уровней $\Delta L = 10 \lg(2e^2)$. Ширина эллипса озвучения, т. е. величина малой оси этого эллипса, $b' = a \cos \alpha \sqrt{1 - e^2}$. Зона озвучения должна вписываться в этот эллипс.

Высота подвеса колонки над озвучиваемой плоскостью в этом случае

$$h_{к.с} = l \sqrt{(1 - e^2) / (2e^2 - 1)}$$

Если $e = 0,97$, то $h_{к.с} = 0,26$, а неравномерность озвучения составит $\Delta L = 10 \lg(2 \cdot 0,97^2) = 2,75$ дБ.

Если колонка имеет большую направленность, то соответственно второму варианту ее следует подвешивать ниже (рис. 9.8а). При этом неравномерность озвучения почти не изменяется (стремится к 3 дБ) (см. рис. 9.8а). Применение сдвоенных колонок (поставленных одна над другой) позволяет увеличить направ-

ленность (диаграмма направленности в вертикальной плоскости сжимается вдвое) и одновременно повысить звуковое давление на оси вдвое. Поэтому получается возможность увеличить длину озвучиваемой зоны почти при той же неравномерности озвучения. При этом ширина озвучиваемой зоны также расширится почти вдвое (см. рис. 9.8б), а площадь озвучиваемой зоны — почти вчетверо.

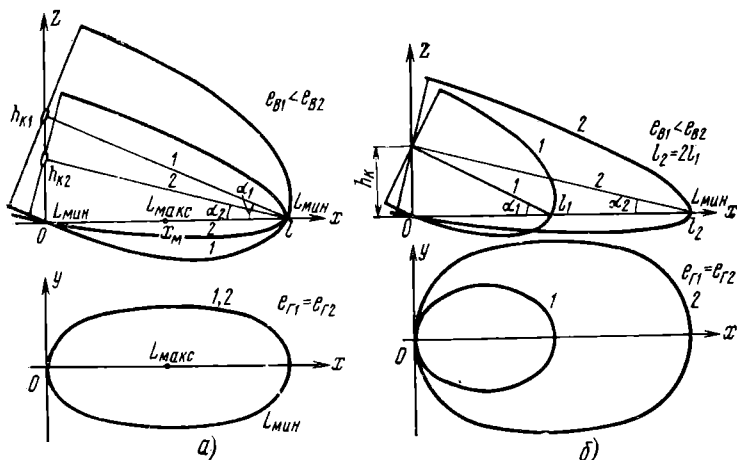


Рис. 9.8. Влияние остроты направленности колонки на неравномерность озвучения (а) и сравнение величины озвучиваемой поверхности при использовании одной колонки (кривая 1) и двоянной (кривая 2), работающих на полную мощность (б)

Если озвучиваемая поверхность имеет сложную форму, то расчет уровней на ней и определение неравномерности озвучения могут быть сделаны методом координат. Для этого оси координат совмещают с осями эллипсоида, аппроксимирующего характеристики направленности. При этом условия звуковое давление в точке с координатами u , v и w будет определяться выражением

$$p^2 = p_1^2 / \left(u^2 + \frac{v^2}{1 - e_r^2} + \frac{w^2}{1 - e_b^2} \right),$$

а уровень $L = 10 \lg(p^2) + 94$ дБ.

В тех случаях, когда есть характеристика направленности колонки и видно, что она отклоняется от эллипсоидальной, пользуются следующей формулой:

$$p^2 = p_1^2 / \left(\frac{u^2 + v^2}{R_r^2(\theta_r)} + \frac{u^2 + w^2}{R_b^2(\theta_b)} - u^2 \right),$$

где $R_b(\theta_b)$ и $R_r(\theta_r)$ — радиусы-векторы диаграмм направленности в продольной (вертикальной) и поперечной (ошибочно называемой горизонтальной) плоскостях, проходящих через рабочую ось колонки и соответствующих оси излучателя;

$\theta_b = \arctg(w/u)$ и $\theta_r = \arctg(v/u)$.

Для удобства, как и в случае рупорных громкоговорителей, точки на озвучиваемой поверхности задают в системе координат x , y и z и переходят от них к координатам u , v и w с помощью тех же формул, что и в рупорных системах, а именно: $u = x \cos \alpha + (h_k - z) \sin \alpha$; $v = y$; $w = x \sin \alpha - (h_k - z) \cos \alpha$, где α — угол подвеса, определяемый из формулы $\tg \alpha = h_{k.c}/l = (h_k - h_{y.c})/l$; h_k —

координата точки рабочего центра излучателя колонки; $h_{у.с}$ — координата удаленной точки озвучиваемой поверхности; $h_{к.с}$ — высота рабочего центра излучателя над головой удаленного слушателя.

ТАБЛИЦА 9.4

Данные расчетов уровня озвучиваемой поверхности

$x, м$	$z, м$	$u, м$	$w, м$	$L, дБ$
0	1,0	1,0	-9,95	79,7
15	6,0	14,3	-7,5	81,3
40	15,0	40,2	0	79,9

Пример. Определить уровни и неравномерность озвучения для озвучиваемой поверхности, приведенной на рис. 9.5. Расположим колонку над первым рядом, тогда длина озвучиваемой поверхности по горизонтали будет равна 40 м. Возьмем колонку, имеющую характеристику направленности с эксцентриситетами $e_v = 0,97$ и $e_r = 0,9$. Высоту озвучиваемой поверхности для первого ряда примем равной 1 м. В табл. 9.4 приведены координаты точек озвучиваемой поверхности для трех рядов: первого, среднего и удаленного.

Высоту подвеса звуковой колонки над головами ближайших слушателей определим для второго варианта подвеса (см. рис. 9.7б)

$$h_{к.б.с} = h_k - 1 = 41 \sqrt{\frac{1 - 0,97^2}{2 \cdot 0,97^2 - 1}} = 10 \text{ м}, \quad h_k = 11 \text{ м}.$$

Следовательно, $\operatorname{tg} \alpha = (11 - 15)/40 = -0,1$; $\cos \alpha = 0,995$ и $\sin \alpha = -0,1$. Переведем координаты x и z в координаты u и w :

$$u = 0,995x - 0,1(11 - z);$$

$$w = -0,1x - 0,995(11 - z),$$

а координату $v = y$ положим равной нулю (для точек, лежащих под осью излучателя). Вычисленные координаты сводим в табл. 9.4.

Если колонка развивает звуковое давление на расстоянии 1 м от излучателя, равное 7,9 Па, то звуковое давление и уровень поля в заданных точках определятся из выражений

$$p^2 = \frac{7,9^2}{u^2 + w^2 / (1 - 0,97^2)} \quad \text{и} \quad L = 10 \lg(p^2) + 94.$$

Вычисленные данные для уровня поля приведены в табл. 9.4. Из этих данных следует, что неравномерность озвучения $\Delta L = 81,3 - 79,7 = 1,6$ дБ.

Для нескольких звуковых колонок, стоящих не рядом, но все же на расстояниях, значительно меньших расстояний до ближайших слушателей, звуковое давление определяют по методу координат с последующим суммированием по интенсивности, т. е. $p_{\Sigma} = \sqrt{p_1^2 + p_2^2 + p_3^2 + \dots}$. Расстояние между ними определяют исходя из неравномерности озвучения по координате y . Если неравномерность ΔL_y для первого ряда не превышает заданной величины, то для более удаленных рядов она будет меньше этой величины. Расстояние между соседними одинаковыми колонками вычисляют по формуле

$$b = 2w \sqrt{(10^{0,1 \Delta L_y} - 1)(1 - e_r^2) / (1 - e_v^2)}.$$

Пример. Для предыдущего случая найдем расстояние между колонками для неравномерности 2 дБ и $e_r = 0,9$, $e_v = 0,97$:

$$b = 2 \cdot 9,95 \sqrt{(10^{0,1 \cdot 2} - 1)(1 - 0,9^2) / (1 - 0,97^2)} = 27 \text{ м}.$$

Следовательно, колонки можно расположить на расстоянии 25—30 м.

Вышеприведенные формулы дают возможность определения уровня во фронтальной полусфере излучения. Излучение в тыльную полусферу у звуковых колонок составляет около 20% излучения во фронтальную, поэтому локализация звукового поля для тыльной полусферы для них хуже, чем для рупор-

ных громкоговорителей. Для звуковых колонок уровень в тыльной полусфере вычисляют по формуле $L_m = L_\phi - 14$ (L_ϕ — уровень во фронтальной полусфере на таком же расстоянии от колонки). Звуковые колонки используют для передачи разнообразных программ, так как их качественные показатели достаточно высокие. Но они дают меньшую дальность озвучения (100 КЗ имеет номинальное давление не выше 24 Па, т. е. меньше рупорного 100 ГРД в 2 раза). Поэтому для озвучения больших площадей требуется большее число колонок, чем рупорных громкоговорителей, таким образом, озвучение стоит дороже.

9.4. ЗОНАЛЬНЫЕ СИСТЕМЫ ОЗВУЧЕНИЯ

Зональные системы бывают линейные и пространственные. Первые служат для озвучения длинных, но узких поверхностей (например, улиц), вторые — для озвучения больших площадей, когда их нельзя озвучить сосредоточенной системой.

Наиболее удобными для зонального озвучения широких площадей (рис. 9.9) являются радиальные громкоговорители или веерные групповые системы гром-

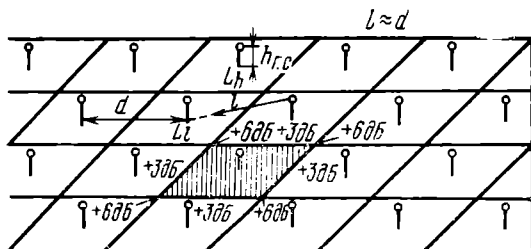


Рис. 9.9. Иллюстрация озвучения большой площади зональной системой

коговорителей (расположение нескольких звуковых колонок или рупорных громкоговорителей около центральных точек частных зон озвучения). При таком расположении громкоговорителей уровень поля на стыке границ соседних частных зон озвучения (по отношению к уровню от действия громкоговорителя своей зоны) повышается на 3 дБ, так как интенсивности от двух громкоговорителей складываются арифметически. В углах зон увеличение будет на 6 дБ (от четырех громкоговорителей). Уровень на всей границе зоны будет примерно один и тот же. Неравномерность озвучения для радиальных громкоговорителей можно определить, считая их характеристику направленности в нижней половине вертикальной плоскости близкой к сферической (на самом деле под громкоговорителем получается уменьшение на 5—7 дБ по сравнению с излучением под 50° к вертикальной оси), так как радиальный громкоговоритель излучает вниз несколько слабее, чем в сторону. Внутри каждой зоны уровень может быть определен по характеристике направленности своего громкоговорителя, так как громкоговорители других зон практически ничего не добавляют.

Для точки, находящейся под громкоговорителем, звуковое давление и уровень поля соответственно равны $p_{г.с} = p_1 / (h_{г.с} - h_{б.с})$ и $L_{г.с} = 20 \lg p_{г.с} + 94$, где p_1 — звуковое давление на расстоянии 1 м от громкоговорителя по его акустической оси; $h_{г.с}$ — высота подвеса громкоговорителя над землей; $h_{б.с}$ — вертикальная координата точки нахождения головы ближайшего слушателя.

Для точки, находящейся на расстоянии r в сторону от оси (под углом γ к ней), $p_{у.с} = k p_1 / \sqrt{(h_{г.с} - h_{б.с})^2 + r^2}$ и $L_{у.с} = 20 \lg p_{у.с} + 94$, $\lg \gamma = r / (h_{г.с} - h_{б.с})$, где k — коэффициент, учитывающий увеличение направленности излучателя. Под углом 50—70° его можно считать равным 2. Неравномерность озвучения для одного громкоговорителя

$$\Delta L_1 = L_{\text{г.с}} - L_{\text{у.с}} = 20 \lg \frac{\sqrt{(h_{\text{г.с}} - h_{\text{с.с}})^2 + r^2}}{h_{\text{г.с}} - h_{\text{с.с}}} = 20 \lg (k \cos \gamma).$$

А на стыке зон $\Delta L = \Delta L_1 - 3$.

Пример. Радиальные громкоговорители, подвешенные на высоте 8 м, находятся на расстоянии 40 м друг от друга. Звуковые давления и уровни поля на высоте 1,5 м под громкоговорителем и на стыках зон от одного громкоговорителя для $p_1 = 4$ Па будут:

$$p_{\text{с.с}} = 4 / (8 - 1,5) = 0,62 \text{ Па}, \quad p_{\text{у.с}} = 2 \cdot 4 / \sqrt{20^2 + 6,5^2} = 0,38 \text{ Па};$$

$$L_{\text{с.с}} = 20 \lg 0,62 = 89,8 \text{ дБ} \text{ и } L_{\text{у.с}} = 20 \lg 0,38 = 85,6 \text{ дБ}.$$

Добавляя к последнему 3 дБ от действия соседнего громкоговорителя, получаем 88,6 дБ. Поэтому неравномерность озвучения будет

$$\Delta L = 89,8 - 88,6 = 1,2 \text{ дБ}.$$

Подсчет неравномерности для углов зоны показывает, что если полагать $k=2$, то она будет менее 1 дБ, а с учетом уменьшения излучения (для угла $\gamma = 72^\circ$) неравномерность будет несколько больше.

В зональных системах появляется опасность возникновения эха из-за разности хода между соседними громкоговорителями. Эхо может прослушиваться под громкоговорителем, так как разность хода в этой точке получается максимальной ($\Delta r = l - h_{\text{г.с}}$, где $h_{\text{г.с}}$ — высота подвеса громкоговорителя над озвучиваемой поверхностью; $l \approx d$ — расстояние между громкоговорителями). Разность уровней определяется отношением расстояний и разностью в направленности (5—7 дБ), т. е. $\Delta L = L_h - L_l = 20 \lg (h_{\text{г.с}}/l) - (5 \div 7)$. Практически для радиальных громкоговорителей эхо не прослушивается, а в случае применения других громкоговорителей оно возможно и поэтому подлежит проверке (рис. 9.10а). Особенно эхо проявляется при одинаковой ориентации акустических

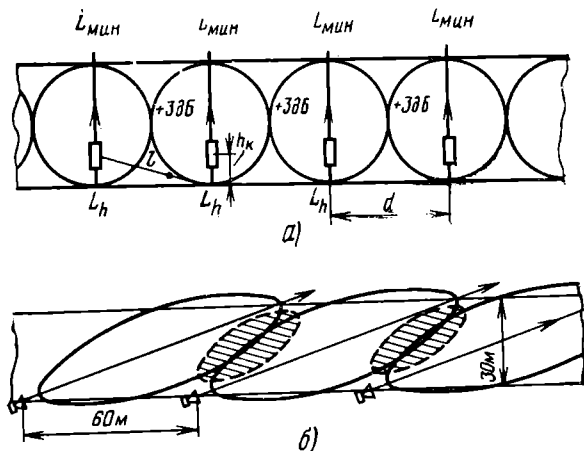


Рис. 9.10. Зональное озвучение улицы:
а) звуковыми колонками; б) рупорными громкоговори-
телями

осей рупорных громкоговорителей: разность хода волн получается очень большая, а уровни от громкоговорителей уменьшаются с расстоянием очень медленно. На рис. 9.10б показано такое расстояние громкоговорителей и указаны зо-

ны эха. Они получаются очень большими. Поэтому в таких случаях идут на расстыковку зон озвучения, т. е. заранее планируют необслуживаемые зоны. По существу, при этом имеет место несколько зон озвучения централизованными системами. Расчет этих зон ведут методами расчета сосредоточенных систем озвучения.

Преимущество рупорных громкоговорителей в зональных системах — их меньшая общая стоимость по сравнению с другими громкоговорителями. Зональные системы в сравнении с сосредоточенными и распределенными имеют лучшую локализацию звукового поля, так как размеры частных зон невелики, а за их пределами уровень быстро падает.

9.5. ОСОБЕННОСТИ ОЗВУЧЕНИЯ ПОМЕЩЕНИЙ

Кроме того что в помещениях обязательно присутствуют реверберационные помехи и помехи от диффузного звука, имеющего уровень выше уровня прямого звука, оно имеет ряд специфических черт, которые следует учитывать при озвучении помещений. К этим особенностям относятся:

1) наличие отражений от ограничивающих поверхностей с небольшим запаздыванием по отношению к прямому звуку, что повышает эффективность систем озвучения;

2) ограничение высоты подвеса из-за потолка;

3) как правило, меньшие размеры озвучиваемых площадей в сравнении с открытым пространством.

Для озвучения помещений используют сосредоточенные и распределенные системы. Зональные системы применяются редко, если не считать, что использование отдельной системы для озвучения балконов и лож представляет собой зональную систему. Правда, в очень больших помещениях, типа выставочных, иногда применяют зональную систему.

9.6. СОСРЕДОТОЧЕННЫЕ СИСТЕМЫ ОЗВУЧЕНИЯ ПОМЕЩЕНИЙ

Для озвучения помещений почти не используют рупорных громкоговорителей¹, так как они непригодны для передачи художественных программ, а помещения для речевых передач не так велики, чтобы применять в них мощные громкоговорители. Поэтому для сосредоточенных систем используют преимущественно звуковые колонки, располагаемые вблизи первичных источников звука, т. е. на сцене, около кафедр и т. п., а иногда и в центре зала. Для музыкальных передач необходимо, чтобы удовлетворялись условия локализации первичного источника звука. Для большинства помещений достаточно иметь одну звуковую колонку, чтобы обеспечить равномерное озвучение зала шириной не более 12 м. Часто приходится устанавливать две звуковые колонки по бокам сцены из-за невозможности установки одной колонки в середине сцены. Две колонки обеспечивают озвучение помещения шириной не менее 20 м. Более широкие залы озвучивают четырьмя колонками, но не более. Если помещение прямоугольной формы, то оси колонок целесообразно направлять параллельно друг другу. При круглой (полукруглой) форме помещения (в плане) оси целесообразно направлять по радиусам секторов.

Расчеты ведутся, как и для открытых пространств, но с учетом отражений от задней и частично от боковых стен. Если задняя стена имеет коэффициент отражения 0,6, то суммарная интенсивность звука у задней стены будет в 1,6 раза больше интенсивности прямого звука, поэтому в таких помещениях по сравнению с открытым пространством высоту подвеса следует брать меньше в 1,6 раза. Тогда уровни под громкоговорителем и в удаленной точке будут одинаковыми. В этом случае высота подвеса звуковой колонки над озву-

¹ Исключение составляют рупорные громкоговорители, входящие в агрегаты.

чаваемой поверхностью будет около $h_{к.с} = 0,7l\sqrt{1-e^2}$, где l — расстояние от колонки до удаленной точки; e — эксцентриситет диаграммы направленности по вертикали. В углах помещения уровень повышается от отражений от боковых стен, и поэтому он почти не отличается от уровня на оси помещения. Это повышение уровня ограничено расстояниями от стены не более 8 м, так как на больших расстояниях отраженные волны уже будут становиться помехами. Поэтому уровень звука в середине помещения рассчитывают без учета отражений от стен. Это приводит к уменьшению неравномерности озвучения по сравнению с открытыми пространствами. Если стены сильно заглушены, то тогда никакой поправки брать не следует.

Пример. Найти высоту подвеса звуковой колонки над озвучиваемой плоскостью для $e=0,97$ и расстояния колонки от задней стены $l=20$ м, если средний коэффициент отражения от нее равен $1-0,4=0,6$, где 0,4 — средний коэффициент поглощения задней стены. Имеем $h_{к.с} = 0,7 \cdot 20 \sqrt{1-0,97^2} = 3,4$ м. Если отражения от задней стены нет, то высоту следует брать $h_{к.с} = 3,4 \cdot 1,6 = 5,4$ м.

Для коэффициента отражения 0,6 увеличение уровня получается у задней стены на $10 \lg 1,6 = 2$ дБ, поэтому неравномерность озвучения будет $\Delta L = -10 \lg(2e^2) = -2$. Если $e=0,97$, то неравномерность будет менее 1 дБ.

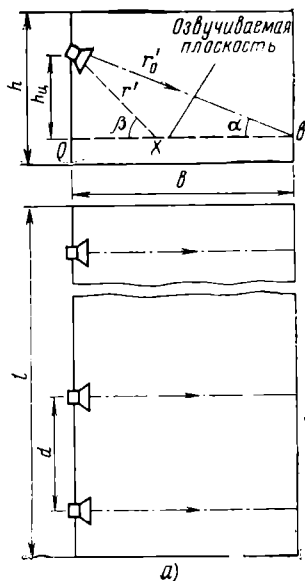
Сосредоточенные системы в виде звуковых люстр (несколько диффузорных громкоговорителей или малоомощных звуковых колонок, располагаемых веером) применяются для озвучения различного рода помещений, где слушатели в основном расположены вокруг центра помещения (например, залы «круглого стола»). Такие люстры не имеют направленности по горизонтали и представляют собой своего рода радиальный громкоговоритель. Если используют диффузорные громкоговорители, то вследствие их низкой направленности уровень звука в каждой точке помещения будет определяться совместным действием всех громкоговорителей. Для звуковых колонок, входящих в люстру и имеющих угол излучения не более 60° , можно считать их излучение только в свою зону, а на стыках зон добавлять 3 дБ. Расчет поля ведут методом координат.

9.7. РАСПРЕДЕЛЕННЫЕ СИСТЕМЫ

Распределенные системы¹ делятся на линейные и поверхностные. Линейное расположение громкоговорителей называют цепочкой, а поверхностное — решеткой. Распределенные системы в помещении применяются в виде настенных (рис. 9.11а и б) или потолочных цепочек (рис. 9.11в и г), а также в виде потолочных решеток из громкоговорителей (рис. 9.11д). Кроме того, применяют кресельные системы из громкоговорителей или телефонов. Распределенные системы широко применяются, когда нет необходимости в локализации первичного источника звука, т. е. когда его нет в помещении, или для речевых информационных передач, так как в этом случае локализация источника звука необязательна.

В распределенных системах используют диффузорные громкоговорители или звуковые колонки. Применение рупорных громкоговорителей в распределенных системах даже для озвучения открытых пространств нерационально, а для помещений — тем более, так как они слишком мощны для таких систем.

При расчетах звукового поля с применением диффузорных громкоговорителей считают их ненаправленными, что верно только для частот ниже



¹ Подробные выводы см. в примерах расчетов [9.3].

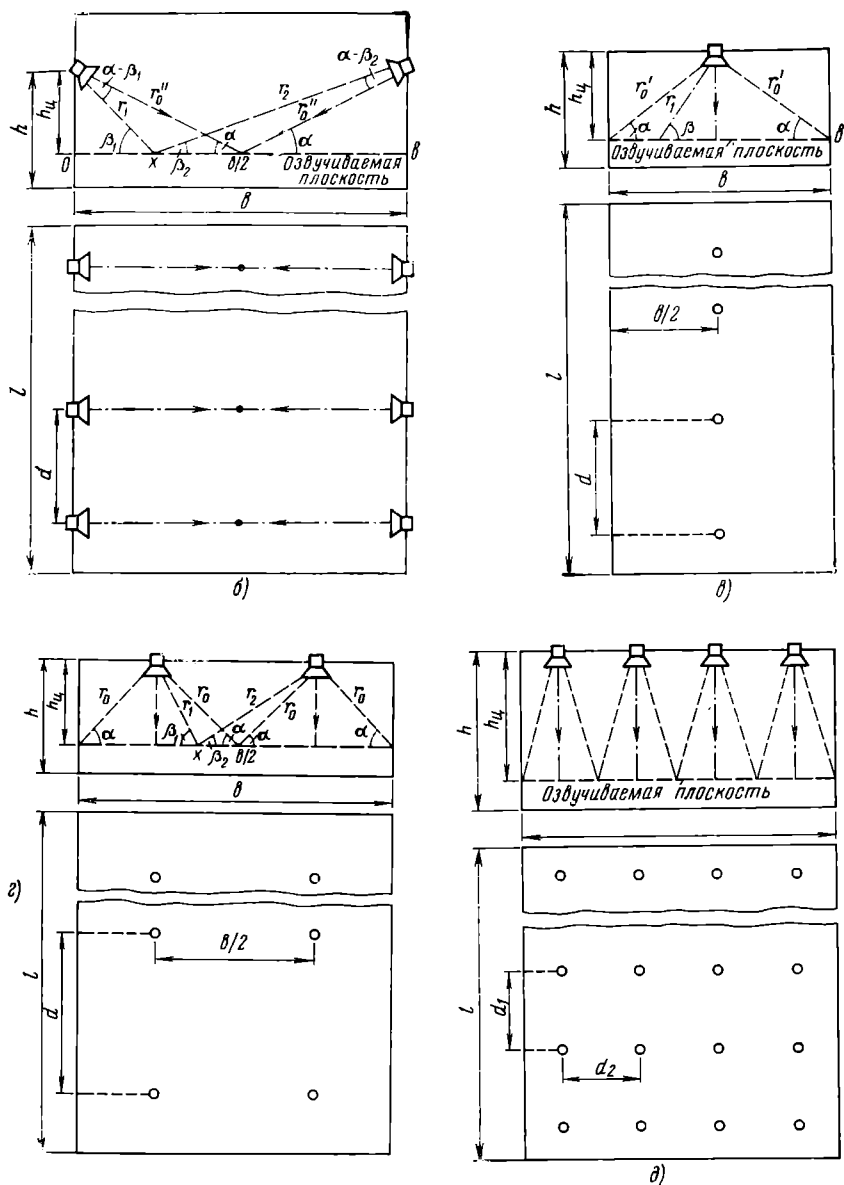


Рис. 9.11. Озвучение помещений распределенными системами:
 а) одна настенная цепочка; б) две настенные цепочки; в) одна потолочная цепочка;
 г) две потолочные цепочки; д) потолочная решетка

1000 Гц. Расчеты для диапазона выше 1000 Гц следует вести, как для звуковых колонок, имеющих одинаковую направленность в вертикальной и в горизонтальной плоскостях, с эксцентриситетом диаграммы направленности, как у

колонки в горизонтальной плоскости. Колонку для этого следует брать с громкоговорителями, близкими к рассчитываемым.

Для бесконечной прямолинейной цепочки из n диффузных громкоговорителей с шагом цепочки d и высотой подвеса h_d над озвучиваемой поверхностью (см. рис. 9.11а) уже на расстоянии $r > 0,6d$ от цепочки громкоговорителей фронт волны получается практически цилиндрическим. Звуковое давление, создаваемое цепочкой на расстоянии r (в пределах между nd и $0,6d$), определяется формулой $p_x^2 = 2p_1^2 / rd$, где $r = \sqrt{x^2 + h_d^2}$; p_1 — звуковое давление на расстоянии 1 м от диффузного громкоговорителя; x — координата точки (см. рис. 9.11а). Для $r \ll d$ и $r \gg nd$ волна получается сферической и расчеты ведут по формулам $p_{r1} = p_1/r$ и $p_{rn} = np_1/r$.

Неравномерность озвучения в пределах озвучиваемой плоскости по ее ширине определяют из соотношения между высотой подвеса цепочки h_d и расстоянием цепочки от удаленного слушателя

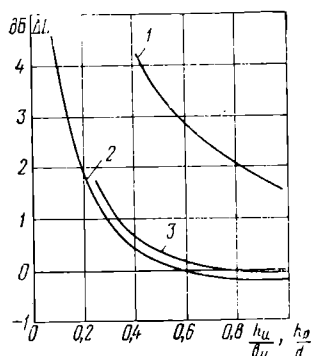


Рис. 9.12. Зависимость неравномерности озвучения от высоты подвеса цепочки h_d (решетки h_p) над озвучиваемой плоскостью: 1 — одна цепочка на боковой стене (b_d — расстояние цепочки от противоположной стены), 2 — две цепочки на боковых параллельных стенах (b_d — расстояние между цепочками); 3 — потолочная решетка (d — шаг решетки)

$r_{\max} = \sqrt{b_d^2 + h_d^2}$, т. е. $\Delta L_b = 5 \lg \frac{r_{\max}}{h_d} = 5 \lg [1 + (b_d/h_d)^2]$. Эту неравномерность можно найти по кривой рис. 9.12.

Пример. Цепочка подвешена на боковой стене на высоте 4 м над полом (слушатели сидят, поэтому высота подвеса над озвучиваемой плоскостью равна 3 м), расстояние цепочки до противоположной стены равно 6 м, найти неравномерность озвучения при условии слабого отражения от стен. Имеем

$$\Delta L_b = 5 \lg (1 + 6^2/3^2) = 3,5 \text{ дБ.}$$

Если задано, что неравномерность озвучения должна быть не более 3 дБ, то по кривой 1 рис. 9.12 находим, что отношение высоты подвеса к ширине помещения должно быть не менее 0,58, т. е. высота подвеса цепочки должна быть не менее $h_d = 0,58 \cdot 6 = 3,5$ м.

Неравномерность озвучения в продольном направлении (по длине помещения) будет наибольшей под цепочкой громкоговорителей. Она определяется по формуле

$$\Delta L_l = 20 \lg \text{cth} (\pi h_d / d),$$

но шаг цепочки обычно берут из условия получения цилиндрической волны по формуле $d \approx 1,6h_d$. Для этого условия $\Delta L_l \approx 0,4$ дБ.

Пример. Для данных предыдущего примера ($h_d = 3,5$ м) найдем шаг цепочки $d = 3,5 \cdot 1,6 = 5,6$ м.

Если коэффициент отражения от противоположной стены (по отношению к цепочке) не менее 0,75 и расстояние от нее до цепочки не более 8 м, то считают, что в помещении есть две цепочки, почти одинаковые по развиваемому звуковому давлению и расположенные на противоположных стенах. В этом случае расчет ведут по формулам для двух цепочек.

Для двух цепочек (см. рис. 9.11б), расположенных на параллельных боковых стенах, при расстоянии между цепочками b_d , высоте подвеса над озвучиваемой плоскостью h_d и шаге цепочки d звуковое давление в точках на озвучиваемой плоскости определится из формулы

$$p_x^2 = \frac{2p_1^2}{d} \left[\frac{1}{r_1} + \frac{1}{r_2} \right] = \frac{2p_1^2}{d} \left[\frac{1}{\sqrt{x^2 + h_d^2}} + \frac{1}{\sqrt{(b_d - x)^2 + h_d^2}} \right],$$

где x — расстояние рассматриваемой точки от первой цепочки; p_1 — звуковое давление, создаваемое одним диффузорным громкоговорителем на расстоянии 1 м от его излучателя.

Если высота подвеса цепочки не превосходит $0,5b_{\text{ц}}$, то максимальный уровень получается под цепочками, а минимальный — на средней оси помещения. Звуковое давление определяется из формулы

$$p_{\text{мин}}^2 = 4p_1^2 / d \sqrt{h_{\text{ц}}^2 + 0,25b_{\text{ц}}^2}.$$

В этом случае неравномерность озвучения по ширине помещения

$$\Delta L = 10 \lg \left[0,5 \sqrt{1 + \frac{1}{4} (b_{\text{ц}}/h_{\text{ц}})^2} \left(1 + \frac{1}{\sqrt{1 + (b_{\text{ц}}/h_{\text{ц}})^2}} \right) \right]$$

На рис. 9.12 (кривая 2) приведена эта зависимость. Из нее следует, что если высота подвеса цепочки над озвучиваемой плоскостью не менее $0,3b_{\text{ц}}$, то неравномерность озвучения будет меньше 1 дБ. Для неравномерности озвучения в продольном направлении зависимость остается той же, что и для одной цепочки, поэтому шаг цепочки $d = 1,6h_{\text{ц}}$.

Пример. На боковых стенах должны быть подвешены две цепочки, расстояние между стенами 12 м. Определить высоту подвеса и шаг цепочки для неравномерности озвучения не более 1 дБ. Высоту подвеса берем $h_{\text{ц}} = 0,3 \cdot 12 = 3,6$ м (над полом она будет 4,6 м), шаг цепочки $d = 1,6 \cdot 3,6 = 5,76$ м. Положим, что высота помещения составляет только 4 м, поэтому отношение $h_{\text{ц}}/b_{\text{ц}} = 3/12 = 0,25$. Из рис. 9.12 по кривой 2 находим, что неравномерность озвучения в поперечном направлении будет равна 1,5 дБ. Для такой высоты подвеса цепочки шаг цепочки следует брать $d = 1,6 \cdot 3 = 4,8$ м.

Для тех же данных определим величину минимального уровня при использовании диффузорных громкоговорителей, если громкоговоритель развивает 1 Па на расстоянии 1 м. Получаем

$$p_{\text{мин}}^2 = \frac{4 \cdot 1^2}{4,8 \cdot 6^2 + 3^2} = 0,124, \quad p_{\text{мин}} = 0,35 \text{ Па},$$

а уровень $L_{\text{мин}} = 10 \lg 0,124 + 94 = 84,9$ дБ.

Следует также учитывать, что из-за отражения от стен уровень может увеличиться на 2—3 дБ.

Для цепочки из звуковых колонок звуковое давление определяется аналогично случаю ненаправленных громкоговорителей с учетом эксцентриситетов диаграммы направленности в продольной и поперечной плоскостях, проходящих через ось излучателя $e_{\text{в}}$ и $e_{\text{г}}$:

$$p^2 = \frac{2p_1^2}{d} \sqrt{\frac{1 - e_{\text{г}}^2}{u^2 + w^2 / (1 - e_{\text{в}}^2)}}$$

Здесь u и w — координаты точки на озвучиваемой поверхности для системы координат, привязанной к характеристике направленности звуковой колонки, т. е. ось координат u направлена по оси звуковой колонки, ось w обычно находится в вертикальной плоскости, проходящей через ось колонки. Координата v не участвует, так как рассматривается волна цилиндрической формы. Для помещений с параллельными боковыми стенами оси колонок располагают

перпендикулярно боковой стене и направляют на слушателей, сидящих у противоположной стены. Для помещений с расходящимися стенами расчеты ведут для каждой колонки в отдельности с последующим суммированием интенсивностей в каждой точке. Для перехода к координатам u , w от координат x и z используют следующие формулы: $u = x \cos \alpha + (h-z) \sin \alpha$; $w = x \sin \alpha - (h-z) \cos \alpha$, где h — координата центра колонки; α — угол наклона оси колонки к горизонтالي, определяемый из формулы: $\operatorname{tg} \alpha = (h - h_{г.с})/l = h_{г.с}/l$; $h_{г.с}$ — высота центра колонки над головами удаленных слушателей; l — расстояние от центра колонки до удаленных слушателей по горизонтали; $h_{г.с}$ — вертикальная координата удаленной точки озвучиваемой поверхности.

Для получения неравномерности озвучения в поперечном направлении не более 3 дБ берут высоту подвеса цепочки $h_{ц} = b \sqrt{(1-e_b^2)/(2e_b^2-1)}$, где b — расстояние цепочки от противоположной стены; $d = 1,6h_{ц} \sqrt{1-e_r^2}$ — шаг цепочки.

Пример. Рассчитать звуковое поле для цепочки из звуковых колонок, имеющих характеристику направленности, определяемую эксцентриситетами $e_b = 0,97$ и $e_r = 0,9$. Боковые стены параллельны друг другу. Расстояние между ними 12 м. Звуковые колонки расположены на одной боковой стене. Высота подвеса $h_{ц} = 12 \sqrt{(1-0,97^2)/(2 \cdot 0,97-1)} = 3$ м (т. е. 4 м от уровня пола); шаг цепочки $d = 1,6 \cdot 3 \sqrt{1-0,9^2} = 2$ м.

Если звуковая колонка развивает звуковое давление (на расстоянии 1 м от нее), равное 4 Па, то в точке с координатами u и w имеем

$$p^2 = \frac{2,4^2 \sqrt{1-0,9^2}}{2 \sqrt{u^2 + w^2/(1-0,97^2)}} = \frac{3,04}{\sqrt{u^2 + w^2/(1-0,97^2)}}$$

Угол подвеса колонки определится из равенства $\operatorname{tg} \alpha = 3/12 = 0,25$, $\sin \alpha = 0,243$, $\cos \alpha = 0,97$. Определяем координаты u и w для $z = 1$ и $x = 0$; 3; 6; 9 и 12 м. Уравнения для перехода от x к u :

$$u = 0,97x + (4-1)0,243; \quad w = 0,243x - (4-1)0,97$$

ТАБЛИЦА 9.5

Результаты расчета звукового поля

x , м	u , м	w , м	p^2 , Па ²	L , дБ*
0	0,729	-2,91	0,476	90,8
3	3,64	-2,18	0,590	91,8
6	6,55	-1,45	0,852	93,3
9	9,46	-0,72	0,650	92,1
12	12,37	0	0,462	90,6

* $L = 10 \lg p^2/94$; $\Delta L = 93,3 - 90,5 = 2,7$ дБ.

Расчет сводим в табл. 9.5.

Для двух цепочек, расположенных вдоль боковых стен помещения, оси колонок направляют на удаленных слушателей, т. е. слушателей, сидящих у противоположной стены. Тогда уровни поля увеличиваются на 3 дБ. При сложной системе расположения колонок расчет ведут методом координат и затем для каждой точки поля суммируют квадраты звуковых давлений от каждой колонки.

Потолочные цепочки из диффузорных громкоговорителей рассматриваются, как и настенные. Только для них высота подвеса задана (см. рис. 9.11 а и г), и координаты x отсчитывают от проекции цепочки на пол. Если применяют звуковые колонки, расположенные на потолке, то расчет ведется по методу координат.

Потолочные решетки (см. рис. 9.11б) создают плоскую волну на расстоянии $r > 0,5d$ от решетки. Звуковое давление, развиваемое решеткой из n ненаправленных громкоговорителей с шагом d , определяется по формуле $p^2 = 2\pi n p_1^2/S$, где p_1 — звуковое давление, создаваемое одним громкоговорителем на расстоянии 1 м от него; $S = d^2$ — величина обслуживаемой площади (под решеткой).

Иногда шаг решетки по длине и ширине помещения берут разным, тогда $S = d_1 d_2$.

Неравномерность озвучения для решетки определяется по кривой 3 рис. 9.12.

Одну настенную цепочку диффузорных громкоговорителей применяют, если ширина помещения не превосходит 4—6 м. При ширине помещения от 6 до 12 м применяют две цепочки из таких же громкоговорителей. В помещениях шириной 10—15 м применяют одну, а шириной 12—20 м — две настенных цепочки из звуковых колонок или, что лучше, одну цепочку, расположенную на передней стене. При низком потолке предпочтение оказывают потолочным цепочкам, а при очень большой ширине потолка применяют потолочную решетку или кресельную систему. Одна потолочная решетка равноценна двум настенным, подвешенным под потолком. Во всех случаях исходят из возможно меньшей величины акустического отношения в помещении, возможно меньшей величины неравномерности озвучения и архитектурных требований.

Применительно к открытому пространству распределенные системы имеют лучшую локализацию звукового поля, чем сосредоточенные, но в них совершенно нет локализации первичного источника звука, так как он приходит с разных направлений.

9.8. ЗВУКОУСИЛЕНИЕ

Назначение систем звукоусиления заключается в том, чтобы усилить действие первичного источника звука (оратора, лектора, солиста, музыкального ансамбля и т. п.) в тех случаях, когда из-за размеров озвучиваемой поверхности или из-за недостаточной мощности этого источника звука уровень поля на местах слушателей получается ниже требуемого значения. Но даже при достаточной мощности первичного источника звука усиление необходимо, если объем помещения более 2000 м³ или расстояние от удаленного слушателя до первичного источника более 25 м.

Система звукоусиления включает в себя систему озвучения, но в системе звукоусиления первичный источник звука находится в пределах озвучиваемого пространства, и поэтому микрофоны оказываются в поле действия громкоговорителей. А это приводит к появлению акустической обратной связи по цепи: громкоговоритель — помещение (или открытое пространство) — микрофон — усилитель — громкоговоритель. Поэтому все требования, предъявляемые к системам озвучения, имеют силу и в отношении систем звукоусиления, но с учетом близости первичного источника звука к слушателям и наличия обратной акустической связи.

Дополнительным требованием для систем звукоусиления является необходимость локализации вторичного источника звука, так как слуховое ощущение местонахождения виртуального (кажущегося) источника звука определяется суммарным действием первичного и вторичного источников звука. В том случае, когда слушатель видит первичный источник звука, наилучшее восприятие звука получается при совпадении зрительного образа со слуховым. Этот показатель очень важен для музыки, поэтому при передаче музыкальных программ стремятся к совмещению этих образов.

Задача звукоусилительной системы для передачи художественных программ заключается в том, чтобы громкоговорители создавали уровень поля на местах слушателей не менее того, который получается у слушателя, находящегося на оптимальном расстоянии от первичного источника звука (рис. 9.13), т. е. в типовых условиях слушания ($r_m = 2 \div 3$ м; $r_c = 10 \div 12$ м) система должна создавать минимальный уровень поля не менее $L_{мин} = L_m - (12 \div 16)$, где L_m — уровень у микрофона.

Разность уровней в точке с минимальным уровнем поля и у микрофона называют индексом передачи тракта микрофон — удаленный слушатель (или просто индексом тракта), т. е. $Q_{м.с} = L_{мин} - L_m$.

Оптимальный индекс тракта для музыкальных передач $Q_{м.с} = -(12 \div 16)$ дБ. Для речевых передач при определении индексов тракта исходят из получения

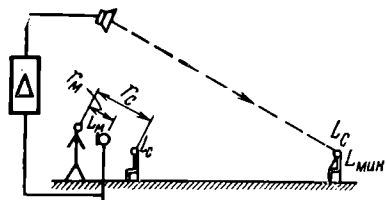


Рис. 9.13. Иллюстрация системы звукоусиления

полной понятности речи в точках с минимальным уровнем поля с учетом уровней шумов в этих точках. Но для случая низких уровней шумов индекс тракта можно так же определить, как и для музыкальных передач, в этом случае $L_{мин} > L_m - (10 \div 14)$ дБ. Заметим, что эта величина индекса ориентировочная.

При звукоусилении сольного пения необходимый индекс передачи следует выбирать исходя из норм, приведенных для речевых передач, хотя некоторые певцы подносят микрофон к самому рту и поэтому величина требуемого индекса в этих условиях

получается меньше, чем для речевых программ.

При звукоусилении, как правило, нет необходимости в создании громкоговорителями уровней поля вблизи первичного источника звука таких же, как для удаленных участков озвучиваемой поверхности, поэтому при расчете звуковых полей эти участки обычно исключают из рассмотрения или допускают для них снижение уровня по отношению к удаленной части помещения или пространства. Например, при звукоусилении с помощью рупорного громкоговорителя его устанавливают или в плоскости микрофонов, или немного впереди ее. Это создает зону с пониженным уровнем поля у микрофона и озвучиваемую непосредственно первичным источником звука. На стр. 225 был дан пример расчета поля с рупорным громкоговорителем, и там была определена необслуживаемая зона до 1,8 м от громкоговорителя. При звукоусилении со звуковыми колонками для этой же цели их располагают по первому варианту (см. рис. 9.7а), т. е. пониженным уровнем под колонками. В этом случае высоту подвеса определяют из формулы

$$h_{к.с} = l \sqrt{\frac{(1 - e_b^2)(1 + x_1/l)}{2e_b^2 - 1 - x_1/l}},$$

где x_1 — расстояние, не обслуживаемое первичным источником звука:

$$x_1 = \frac{le_b^2}{1 + (1 - e_b^2)(l/h_{к.с})^2};$$

e_b — эксцентриситет диаграммы направленности в вертикальной плоскости.

Пример. Звуковая колонка, имеющая $e_b = 0,97$, должна быть подвешена на такой высоте над озвучиваемой плоскостью, чтобы необслуживаемая зона была не более 5 м при длине зала 25 м. Имеем

$$h_{к.с} = 25 \sqrt{\frac{(1 - 0,97^2)(1 + 5/25)}{2 \cdot 0,97^2 - 1 - 5/25}} = 8,1 \text{ м},$$

а если бы эта колонка подвешивалась для озвучения, то высота подвеса была бы

$$h_{к.с} = 25 \sqrt{\frac{1 - 0,97^2}{2 \cdot 0,97^2 - 1}} = 6,5 \text{ м},$$

т. е. на 1,6 м ниже.

Из-за обратной связи возможно появление самовозбуждения всей системы звукоусиления. Условие самовозбуждения системы звукоусиления — равенство единице модуля коэффициента передачи $|K|$ по всей петле от выхода усили-

теля через громкоговорители, помещение (или открытое пространство), микрофоны, усилитель до его выхода. Самовозбуждение возникает на одном из пиков частотной характеристики тракта. Перед началом самовозбуждения прослушивается позванивание на одной из наиболее вероятных частот самовозбуждения, получается так называемая регенеративная реверберация. В таких условиях частотная характеристика тракта становится еще более неравномер-

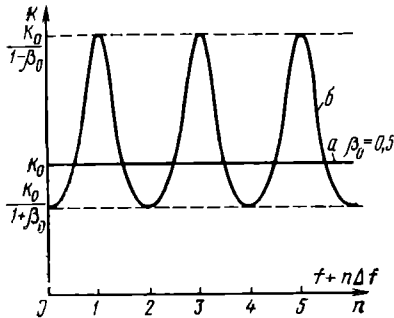


Рис. 9.14. Частотная характеристика тракта звукоусиления: а) без обратной связи; б) с обратной связью, близкой к самовозбуждению

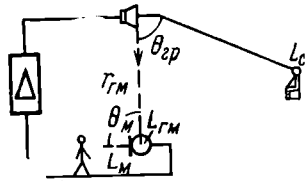


Рис. 9.15. Иллюстрация обратной связи по прямому звуку

ной (см. рис. 9.14, на котором приведены частотные характеристики без обратной связи — кривая а и при связи, близкой к самовозбуждению [коэффициент обратной связи $\beta=0,5$], — кривая б).

В помещении обратная связь получается двух типов: по прямому звуку и по диффузному, а в открытом пространстве она образуется только по прямому звуку.

Обратная связь по прямому звуку показана на рис. 9.15. В этом случае самовозбуждение возможно при условии, что уровень L_m в точке нахождения микрофона, действуя через микрофон, усилитель и систему громкоговорителей, создает в той же точке с учетом направленности микрофона уровень не меньше L_m .

Для одиночного громкоговорителя уровень, создаваемый громкоговорителем в точке микрофона, $L_{г.м} = L_1 - 20 \lg r_{г.м} + 20 \lg R_r(\theta_r)$, где L_1 — уровень, развиваемый громкоговорителем на оси на расстоянии 1 м; $R_r(\theta_r)$ — коэффициент направленности громкоговорителя, определяемый из его диаграммы направленности; $r_{г.м}$ — расстояние между громкоговорителем и микрофоном. Применяемая для расчетов диаграмма направленности для рупорного громкоговорителя (в пределах $\theta_r = \pm 70^\circ$) имеет вид

$$R_r(\theta_r) = \frac{(1 - e^2) \cos \theta_r}{1 - e^2 \cos^2 \theta_r},$$

где e — эксцентриситет в соответствующей плоскости; θ_r — угол между осью громкоговорителя и заданным направлением, а для звуковой колонки (в пределах $\theta_r = \pm 90^\circ$)

$$R_r(\theta_r) = \sqrt{\frac{1 - e^2}{1 - e^2 \cos^2 \theta_r}}$$

Для сложных громкоговорящих систем этот уровень $L_{г.м}$ вычисляют по методу координат (см. § 9.7). Для создания устойчивой работы системы звукоусиления величину индекса тракта берут ниже критического значения примерно на 12 дБ, из них 6 дБ — запас на неравномерность звукового поля, так как при запасе меньше 6 дБ уже начинает прослушиваться регенеративная

реверберация. Поэтому предельный индекс тракта $Q_{пр} = q_m(\theta_m) + \Delta L_{с.м} - 12$, где $\Delta L_{с.м} = L_{миг} - L_{г.м}$ — разность уровней, создаваемых громкоговорителями в точке минимального уровня поля $L_{миг}$ и у микрофона $L_{г.м}$; $q_m(\theta_m) = -20 \lg R_m(\theta_m)$ — направленность микрофона под углом θ_m .

Пример. Определить предельный индекс тракта для кардиоидного микрофона, если угол между осью микрофона и направлением на рупорный громкоговоритель равен 100° , $e_r = 0,77$, расстояние между микрофоном и громкоговорителем 5 м, а между громкоговорителем и удаленным слушателем 50 м при уровне (на расстоянии 1 м от центра громкоговорителя), равном 124 дБ (т. е. при звуковом давлении, равном 31,6 Па) (см. § 1.4).

Уровень в удаленной точке ($r_{\max} = 50$ м) $L_{миг} = 124 - 20 \lg 50 = 90$ дБ, а в точке микрофона $L_{г.м} = 124 - 20 \lg 5 + 20 \lg 0,15 = 93,5$ дБ, так как $r_{г.м} = 5$ м, а направленность громкоговорителя под углом $\theta_r = 70^\circ$ и эксцентриситете $e_r = 0,77$

$$R_r(\theta_r) = \frac{(1 - 0,77^2) \cos 70^\circ}{1 - 0,77^2 \cos^2 70^\circ} = 0,15.$$

Направленность микрофона под углом $\theta_m = 70^\circ$

$$q_m(\theta_m) = -20 \lg 0,5 (1 + \cos 70^\circ) = 3,5 \text{ дБ.}$$

Предельный индекс тракта

$$Q_{пр} = 3,5 + 90 - 93,5 - 12 = -12 \text{ дБ.}$$

Если диффузная составляющая поля по уровню больше прямого звука, то самовозбуждение наступает, когда диффузная составляющая, воздействуя на микрофон, будет создавать с помощью громкоговорителей диффузное поле с таким же уровнем (рис. 9.16). В этом случае предельный индекс тракта (с запасом на устойчивость работы) $Q_{пр} = q_{м.диф} - \Delta L_{рм} - 12$, где $q_{м.диф}$ — индекс направленности микрофона для диффузного звука; $\Delta L_{рм}$ — максимальное значение акустического отношения, дБ.

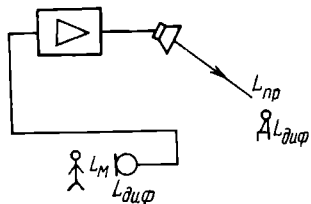


Рис. 9.16. Иллюстрация обратной связи по диффузному звуку

Для достижения более устойчивой работы необходимо стремиться к уменьшению максимального значения акустического отношения и к увеличению направленности микрофона. В тех случаях, когда величина предельного индекса тракта по диффузному звуку недостаточна для получения требуемого уровня звука, прибегают к заглушению поверхностей около микрофона с тем, чтобы уменьшить отражения от них, и, следовательно, понизить уровень диффузного звука около микрофона. Удастся снизить уровень его на 6—12 дБ.

Пример. Определить предельный индекс тракта по диффузному звуку, если применить микрофон кардиоидного типа, для которого $q_{м.диф} = 4,8$ дБ, а максимальное значение акустического отношения $\Delta L_{рм} = 10 \lg R_{\max} = 5$ дБ. Имеем $Q_{пр} = 4,8 - 5 - 12 = -12,2$ дБ.

На величину предельного индекса тракта существенно влияет направленность микрофона, поэтому при звукоусилении выбирают микрофон с возможно большим значением индекса направленности. Предельный индекс тракта зависит от частоты, поэтому он определяется для всего передаваемого диапазона частот и во всем диапазоне он не должен превышать фактический индекс тракта.

Заметим, что, как правило, в помещениях предельный индекс тракта по диффузному звуку получается меньше, чем по прямому. Величина акустического отношения¹ зависит от вида системы озвучения и от направленности

¹ Подробные выводы см. в [9.3].

громкоговорителей. Так, для одиночного громкоговорителя максимальное акустическое отношение на оси

$$R_{\text{макс}} = \frac{16\pi l^2 (1 - \alpha_{\text{ср}})}{\alpha_{\text{ср}} S \Omega_r},$$

где $\alpha_{\text{ср}} S$ — общее поглощение; Ω_r — коэффициент осевой концентрации (см. табл. 9.6); l — расстояние от громкоговорителя.

Для распределенных систем из ненаправленных громкоговорителей

$$R_{\text{макс}} = \frac{8lb (1 - \alpha_{\text{ср}})}{\alpha_{\text{ср}} S},$$

где l и b — длина и ширина помещения.

Для распределенной системы из звуковых колонок

$$R_{\text{макс}} = \frac{12,8lb (1 - \alpha_{\text{ср}}) \sqrt{1 - e_v^2}}{\alpha_{\text{ср}} S}$$

где e_v — эксцентриситет характеристик направленности в вертикальной плоскости. Для решеток и кресельных систем

$$R_{\text{макс}} = \frac{2S_{\text{сл}} (1 - \alpha_{\text{ср}})}{\alpha_{\text{ср}} S},$$

где $S_{\text{сл}}$ — поверхность, занятая слушателями.

ТАБЛИЦА 9.6

Коэффициенты концентрации для громкоговорителей

Громкоговорители		Значение Ω_r в зависимости от частоты, Гц.					
		250	500	1 000	2 000	4 000	6 000
Звуковые колонки	2 КЗ	2,5	4,0	5,0	5,6	6,5	6,8
	8 КЗ	4,3	6,6	9,0	10,0	10,6	11,0
	10 КЗ 1 и 2	6,9	10,5	14,3	15,8	16,6	16,9
	25 КЗ 1 и 2	9,9	11,2	16,7	16,8	16,8	16,9
	50 КЗ 1 и 2	9,9	12,2	16,8	17,0	17,0	17,0
	100 КЗ 1 и 2	10,1	12,7	17,0	17,0	17,0	17,0
	25 КЗ 5 и 6	9,6	11,8	15,7	16,5	16,7	17,0
	25 КЗ 4 и 50 КЗ 6	11,3	14,0	17,6	17,6	17,6	17,6
	50 КЗ 3	15,6	18,5	18,5	18,5	18,5	18,5
Рупорные	25-ГРД	15	17,5	19,5	22	25	—
	50-ГРД						
	100-ГРД	8	9	10	11,5	13	—
	10-ГРД Р-100	18	21	25	31	37,5	—

Сравнивая их, видим, что наименьшее акустическое отношение получается для кресельной системы, наибольшее — для сосредоточенной системы. Поэтому в тех случаях, когда нет необходимости в совмещении зрительного образа со слуховым, используют распределенную систему озвучения, дающую наименьшие значения акустического отношения.

Пример. Найдем максимальные значения акустического отношения для одного и того же помещения: $l=20$ м, $b=10$ м, $\alpha_{\text{ср}}=0,25$, $S=700$ м² — при ис-

пользовании разных систем; для одиночного громкоговорителя ($\Omega_r=10$)

$$R_{\text{макс}} = \frac{16\pi \cdot 20^2 (1 - 0,25)}{0,25 \cdot 700 \cdot 10} = 8,63,$$

для распределенной системы из диффузорных громкоговорителей

$$R_{\text{макс}} = \frac{8 \cdot 20 \cdot 10 (1 - 0,25)}{0,25 \cdot 700} = 6,86,$$

из звуковых колонок ($e_a=0,97$)

$$R_{\text{макс}} = \frac{12,8 \cdot 20 \cdot 10 (1 - 0,25) \sqrt{1 - 0,97^2}}{0,25 \cdot 700} = 2,67$$

и для потолочной системы

$$R_{\text{макс}} = \frac{2 \cdot 20 \cdot 10 (1 - 0,25)}{0,25 \cdot 700} = 1,72.$$

При звукоусилении с помощью индивидуальных телефонов (что практикуется как при слушании в залах с повышенным уровнем акустического шума, так и при переводах речи оратора на другие языки) уровень у слушателя определяется исходя из необходимости перекрытия уровня шумов в зале. Можно считать, что телефоны не создают помех для слушателей, сидящих рядом.

9.9. ЗВУКОУСИЛИТЕЛЬНАЯ АППАРАТУРА

Звукоусилительная аппаратура делится на многоцелевую, для усиления речи, для громкоговорящей связи, диспетчерскую и для перевода речей. Кроме того, эта аппаратура делится на стационарную и передвижную, включая переносную (электромегафоны).

В большинстве случаев звукоусилительная аппаратура изготавливается по индивидуальным заказам в соответствии со спецификой технических, экономических и других требований. Но есть и типовая аппаратура. В табл. 9.7 приведен перечень такой аппаратуры многоцелевого вида с краткими техническими данными. Кроме нее, различными организациями выпускается следующая аппаратура:

1. Аппаратура «Звук»

Выпускается в вариантах 1×25; 2×25; 6×50 и 6×100. Первая цифра означает число каналов; вторая — мощность одного канала. Питание — от сети 220 В, потребляемая мощность — около шестикратной выходной мощности, коэффициент гармоник — не более 1%, рабочий диапазон 40—14 000 Гц. Аппаратура комплектуется громкоговорителями 3А-66; 30А-46; 25А-46. В громкоговоритель 3А-66 входят две НЧ головки 2А-11 и один рупорный громкоговоритель ВЧ (1А-17), в громкоговоритель 30А-46 входит одна головка 4А-32, в громкоговоритель 25А-46 — головка 4А-28. В комплект 6×50 входят пять громкоговорителей 3А-66, восемь — 30А-46 и четыре — 25А-46.

2. Аппаратура «Зал»

Выходная мощность 200 Вт, частотный диапазон 50—15 000 Гц, неравномерность частотной характеристики 3 дБ, потребляемая мощность 400 Вт. Габариты: 845×1210×760 мм. Стоимость 17 000 руб.

Когда источник звука неподвижен¹, пользуются микрофонами стационарного типа (с подставками и скрытой кабельной подводкой к усилительному устройству). Но в ряде случаев источник звука (лектор, гид, эстрадный исполнитель и т. п.) должен перемещаться на большие расстояния (до десятков

¹ При передаче из театров применяют систему из нескольких микрофонов, переключаемых по ходу действия.

ТАБЛИЦА 9.7

Звукоусилительная аппаратура¹, выпускаемая МПСС

Тип	Выходная мощность, Вт	Число каналов	Входы							Выходы		Масса, кг	Питание	Комплектация
			К	МК	Л	МГ	РП	ПР	Р	ГР	Л			
ЗС-800А, передв.	800	2	5	3	1	—	—	1	—	8	2	2 000	Автономное и сеть	МД-44, А-18, МГ «Тембр» 50-ГРД-8А
ЗС-1000А, передв.	1 000	3	15	6	2	2	3	1	1	10	2	3 200	То же	МД-52А, РМ-9, МГ «Романтик», 15-КЗ-7, 50-ГРД-8, 100-КЗ-7, 3 ГДК-1
ЗС-300А, передв.	300	3	19	10	2	2	3	1	1	6	5	—	Сеть	МД-52А, РМ-9, 100-КЗ-11, 50-ГРД-12
ЗСП-30, перен.	30	1	4	3	1	—	—	—	—	1	1	—	—	МД-66А, 15-КЗ-4
ЗУС-150-1, стац.	150	3	6	6	—	2	—	—	—	3	—	110	—	МД-66А, МД-52А, 25-КЗ-8
УЗУП-4, стац.	600	3	18	—	—	—	—	—	—	3	5	—	—	МД-52А, МД-66, 10КЗ-1, 25КЗ-1
ЗУС-150-2, стац.	150	2	10	5	2	1	1	—	—	3	2	—	—	МД-52А, МД-66, 10КЗ-1, 25КЗ-1
ЗУС-400, стац.	800	4	18	Универсальные каскетные							4	500	—	МД-52А, МД-66, 10КЗ-1, 25КЗ-1

¹ Вся аппаратура I класса, за исключением ЗС-800А — II класса.
 Примечания. К — количество; МК — микрофон; Л — линия; МГ — магнитофон;
 РП — радиоприемник; ПР — проигрыватель; Р — ревербератор; ГР — громкоговоритель.

метров и более). В этих случаях микрофон должен быть связан с усилительным устройством гибкой связью, допускающей свободное перемещение источника звука. Если это перемещение невелико, то можно использовать переносный микрофон с гибким легким кабелем. Однако такой способ очень неудобен, так как, например, руки лектора часто должны быть свободными. В таких

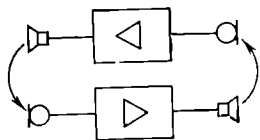


Рис. 9.17. Показ обратной акустической связи в дуплексной громкоговорящей связи

условиях применяют или петличный микрофон, или микрофон ДЭМШ, укрепленный на специальном оголовье. Неудобство этих способов заключается и в том, что кабель путается под ногами, его надо все время перемещать. Поэтому иногда в подобных случаях, а при больших перемещениях всегда применяют радиомикрофон. Радиомикрофоны есть двух видов: с радиосвязью и с индуктивной связью. В первом случае микрофон (обычно петличный) связан с миниатюрным радиопередатчиком. Этот передатчик переносится лектором (гидом и т. п.) в кармане или на специальном ремне. Передатчик работает на УКВ. На входе усилительного устройства есть радиоприемник.

В § 5.6 приведены данные радиомикрофона РМ-7.

Применение радиосвязи не всегда возможно из-за взаимных помех, поэтому в таких случаях пользуются индуктивной связью между микрофоном и усилительным устройством. Для этого к выходу переносного микрофонного усилителя подключают специальную рамочную антенну НЧ, переносимую лектором и являющуюся как бы первичной обмоткой трансформатора. Под полом, на стенах помещения или под потолком располагается другая рамочная антенна, являющаяся вторичной обмоткой трансформатора. Эта антенна подключена ко входу усилительного устройства. Такая система рамок располагается во всех помещениях, в которых может находиться гид.

К громкоговорящей связи относятся в общем случае и радиотелефонная громкоговорящая связь, и диспетчерские системы (рис. 9.17) дуплексного типа. В этих

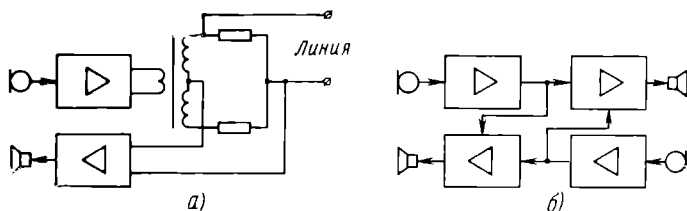


Рис. 9.18. Схема включения громкоговорящей связи через дифференциальный трансформатор в двухпроводной линии (а) и схема устранения обратной связи при автоматическом замирании, сбрасываемом от голоса (б)

случаях обратная связь возникает преимущественно по прямому звуку, так как уровень отраженного звука невелик, но при большом удалении громкоговорителя от абонента и при применении ненаправленного микрофона возникает и обратная связь по диффузному звуку. Принимают меры борьбы с возникновением генерации, аналогичные предыдущим, в частности, широко применяют микрофоны типа ДЭМШ, но, кроме того, используют различного рода мостиковые схемы (рис. 9.18а), а также схемы переключения микрофонов, действующие от голоса (рис. 9.18б), так как не всегда возможно использование микрофона типа ДЭМШ из-за необходимости близкого расположения его ко рту говорящего.

В качестве переключающих систем используют автоматические регуляторы уровня с малой постоянной времени срабатывания (на 5—10 мс) и большим временем удержания (до 0,5 с). Такие устройства срабатывают только от гром-

ких звуков, так как отраженные звуки в помещении не дают возможности получать срабатывание на слабых звуках.

Электромегафоны являются переносными устройствами для усиления речи. Электромегафоны состоят из шумостойкого микрофона (обычно типа ДЭМШ), усилителя и рупорного громкоговорителя мощностью в несколько ватт. Микрофон укрепляется на тыльной части кожуха (см. фото на рис. 9.19) и располагается так, чтобы ось громкоговорителя находилась в плоскости наименьшей чувствительности микрофона. Электромегафон держат за ручку так, чтобы микрофон находился около угла рта. Усилитель вместе с питанием находится в футляре, носимом на плечевом ремне. Дальность действия электромегафона доходит до 400 м. Его также используют в помещениях и в автобусах. Микрофон может быть отнесен на расстояние до 8 м с помощью удлинительного кабеля. Ниже приводятся данные некоторых электромегафонов и устройств громкоговорящей связи.



Рис. 9.19. Внешний вид электромегафона

Технические данные электромегафона 5 ПЭМ-1

Максимальная выходная мощность на частоте 1000 Гц, Вт	5
Частотная характеристика в диапазоне 400—500 Гц	равномерная
Масса, кг	1,9
Габариты, мм	300×193×274
Питание	8 элементов «Салют 1» или А-343 («Марс»)
Время работы от одного комплекта, ч	15
Громкоговоритель	5ГРД-1
Микрофон	ДЭМШ-1А
Расстояние, перекрываемое в типовых шумах на улице	150—200 м
Предназначен для уличного оповещения.	

Технические данные электромегафона переносного ЭМ-2

Максимальная выходная мощность, В·А	4
Частотная характеристика в диапазоне 400—3000 Гц	равномерная
Масса с источником питания, не более, кг	2,8
Габариты, мм	355×210×259
Питание от источника постоянного тока напряжением 12 В с потреблением тока не более 0,8 А или от шести батарей КБС-Х-0,70	
Время работы, не более, ч	9
Громкоговоритель	5 ГРД-1
Микрофон	ДЭМШ-1А
Расстояние в шумах с небольшим уровнем доходит до	200—300 м.
Используется на открытом воздухе и в больших помещениях.	

Технические данные автобусного громкоговорящего устройства

Выходная мощность, В·А	6
Частотный диапазон	150—7000 Гц
Неравномерность, не более, дБ	3
Масса без упаковки, кг	5
Габариты усилителя, мм	246×165×65

Питание	от аккумулятора напряжением 12,8 В
Потребление тока, А	2,5—0,25
Громкоговорители (до 6 шт.)	типа 1ГИ-36
Микрофон	МФ-76
Предназначен для громкоговорящего оповещения и радиотрансляции в автобусах дальнего и внутригородского действия.	

Технические данные установки громкоговорящей связи ГУ-2АМ

Выходная мощность, В·А	20
Частотный диапазон, Гц	30—3000
Вес всего комплекта, не более, кг	25
Питание	от аккумулятора напряжением 12,6 В
Потребление тока, не более, А	4,5
Громкоговоритель (2 шт.)	типа ГР-1
Микрофон	ДЭМШ-1А или ларингофоны ЛЭМ-3

Выпускается в автомобильном и мотоциклетном вариантах, имеет поворотное устройство для громкоговорителей.

Предназначен для кратковременной громкой передачи приказаний и команд на расстояние до 200—300 м.

Технические данные аппаратуры для командно-диспетчерской связи «Радиус»

Громкоговорящая и телефонная связь	с абонентами ЦБ, АТС, МБ
Диапазон передаваемых частот	300—3000
Неравномерность, дБ:	
для двухпроводных линий	3
для четырехпроводных (с подъемом ВЧ)	10
Питание	от сети переменного тока 220 В

Потребление тока при 20 абонентах громкоговорящей связи, не более, А	0,35
Громкоговорители	типа ГР-14
Микрофоны	МДО-1, МФР-1 и МД-45

Предназначен для связи руководителя с 20—5 абонентами как внутренних, так и внешних, используется в учреждениях, на предприятиях и в организациях.

Кроме перечисленной аппаратуры, выпускают аппаратуру производственной (симплексной) громкоговорящей связи в условиях высоких уровней шумов (до 100 дБ) — ПГС-71.

Раздел 10

ЗАПИСЬ И ВОСПРОИЗВЕДЕНИЕ ЗВУКА

10.1. ОСНОВНЫЕ СИСТЕМЫ ЗАПИСИ И ВОСПРОИЗВЕДЕНИЯ ЗВУКА

В процессе записи звуковые сигналы после ряда преобразований воздействуют посредством *записывающего элемента* на движущийся *носитель записи* и необратимо изменяют его физическое состояние или форму так, что эти изменения достаточно точно отображают записываемые сигналы, иными словами, изоморф-

ны им. След, оставляемый записывающим элементом в носителе, называется дорожкой записи. Одновременно может образовываться несколько дорожек (обычно с записью различной информации). В этом случае говорят о *многодорожечной записи*. Носитель с одной или несколькими дорожками записи звука называется (соответственно одно- или многодорожечной) *фонограммой*.

Носитель и фонограмма могут иметь форму нити, ленты, диска, барабана, листа, манжеты.

При воспроизведении взаимодействие воспроизводящего элемента с дорожкой записи движущейся фонограммы приводит к образованию сигналов, аналогичных записанным, и после их преобразований создает звуковые сигналы — копии исходных.

В настоящее время применяются *три системы звукозаписи: механическая, фотографическая и магнитная*, каждая из них может быть осуществлена различными *способами записи*.

Механическая звукозапись на дисковый носитель широко известна как грамзапись. Диски с записью (грампластинки) изготавливаются промышленным способом миллионными тиражами. Изготовление любительских грампластинок довольно сложно и в настоящее время почти не практикуется. Зато очень просто воспроизведение записи с грампластинок. Поэтому последние получили наибольшее распространение в быту. Кроме того, иногда их применяют на радиоуздах для так называемых «музыкальных вставок» в передаче. Грампластинки и аппаратура для воспроизведения грамзаписи рассматриваются в § 10.2 и 10.3.

Фотографическая звукозапись осуществляется путем воздействия светового луча на светочувствительный слой носителя (например, киноленту). Луч модулируется записываемыми сигналами, изменяя свою интенсивность или ширину. Соответственно после фотохимической обработки носителя (проявления и закрепления) образуется дорожка записи переменной оптической плотности или переменной ширины (рис. 10.1). Запись по способу переменной плотности нетехноло-

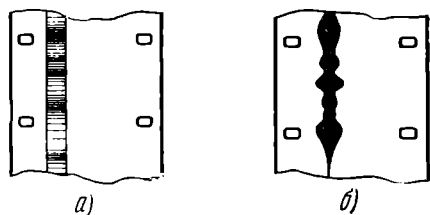


Рис. 10.1. Фотографическая фонограмма переменной плотности (а) и переменной ширины (б)

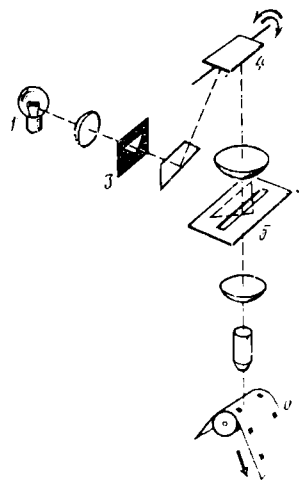


Рис. 10.2. Принцип устройства аппарата фотографической звукозаписи

гична, так как требует очень тщательного подбора режима проявления. В настоящее время в основном применяется запись по способу переменной ширины. Записывающий аппарат (рис. 10.2) содержит источник света 1 и элементы оптики 2, формирующие световой луч. Последний проходит через вырез маски 3 и отражается зеркальным гальванометром 4 на непрозрачную перегородку со щелью 5, так что ширина светового луча, прошедшего через щель, меняется в зависимости от тока записываемых сигналов через гальванометр. Прошедший

шель луч фиксируется на движущуюся кинолентку *б*, образуя на ее поверхности узкий записывающий штрих, играющий роль записывающего элемента при фотографической записи. В зависимости от формы выреза в маске дорожка записи (рис. 10.3) может быть односторонней (*а*), двусторонней (*б*) и даже разделиться на несколько одинаковых дорожек (*в*).

При воспроизведении фотографическая фонограмма просвечивается в части, где расположена дорожка записи, примерно таким же узким световым лучом, какой использовался и при записи. Изображение светового луча на поверхности

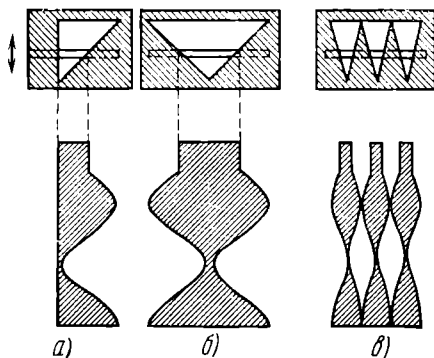


Рис. 10.3. Различные виды дорожек записи фотографической фонограммы переменной ширины. Вверху показаны соответствующие им маски

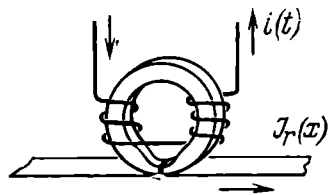


Рис. 10.4. К описанию принципа действия магнитной головки записи

фонограммы называется *воспроизводящим штрихом* (воспроизводящий элемент). Луч, прошедший через фонограмму, модулирован по тому же закону, по которому изменяется ширина дорожки записи, т. е. уже несет в себе записанную информацию. Последующие преобразования с помощью фотоэлемента, усилителя и громкоговорителя создают звуковые сигналы, аналогичные исходным.

Фотографическая звукозапись используется практически только в кинематографии, где ее основной недостаток — необходимость фотохимической обработки носителя — становится терпимым, поскольку такая обработка все равно необходима для получения изображения. Преимущества фотографической записи — хорошая видимость дорожки записи (что иногда, например при монтаже фонограммы, бывает очень важно) и возможность сравнительно просто и быстро получать копии фонограммы путем оптической печати. Дополнительные сведения приведены в § 10.4.

Наибольшее распространение в самых различных областях имеет магнитная звукозапись. Она осуществляется с помощью аппаратов, называемых *магнитофонами*. Чаще всего в качестве носителя используется *магнитная лента*, представляющая собой тонкую пластмассовую полосу (основу), на одну из сторон которой нанесен рабочий слой, способный намагничиваться и хорошо сохранять намагниченное состояние. В современных магнитных лентах рабочий слой содержит порошок очень мелких частиц окиси железа ($\gamma\text{Fe}_2\text{O}_3$) или двуокиси хрома (CrO_2), распределенных в застывшем немагнитном связующем.

Магнитная запись в магнитофоне осуществляется следующим образом. Записываемые электрические сигналы поступают в обмотку *магнитной головки*, представляющей собой миниатюрный электромагнит с сердечником, разделенным узким рабочим зазором (рис. 10.4). Со стороны рабочего зазора к головке прижимается движущаяся магнитная лента. Поле магнитной головки намагничивает ленту, и временные изменения сигнала $i(t)$ преобразуются в пространственные изменения остаточной намагниченности ленты $J_r(x)$. Для воспроизведения слу-

жит такая же по конструкции магнитная головка, с которой соприкасается движущаяся фонограмма. В сердечнике воспроизводящей головки возбуждается магнитный поток, изменяющийся в такт с $I_r(x)$, а изменения потока создают ЭДС в обмотке. После усиления и коррективки электрические сигналы преобразуют обычным способом с помощью громкоговорителя в звуковые сигналы. Для того чтобы воспроизведенные звуковые сигналы были достаточно похожи на исходные, которые записывались, требуется выполнение ряда условий. Одним из наиболее важных следует считать получение пропорциональности $i(t)$ и $I_r(x)$, т. е. линеаризацию намагничивания носителя. Без принятия специальных мер, из-за искривленности характеристики намагничивания любого ферромагнетика, магнитная запись сопровождается очень большими нелинейными искажениями. Эффективным средством линеаризации записи в магнитофоне служит так называемое высокочастотное подмагничивание. В обмотку магнитной головки, кроме тока записываемых сигналов, посылают ток подмагничивания с частотой ~ 100 кГц, вырабатываемый специальным генератором магнитофона. В результате сложных процессов, происходящих в носителе, результирующая намагниченность последнего оказывается пропорциональной, в довольно широких пределах, значению записываемого сигнала.

Ненужная запись может быть легко удалена (стерта) с магнитной ленты путем размагничивания последней. Для этого в магнитофоне предусматривают еще одну — стирающую магнитную головку, питаемую от того же генератора, который вырабатывает ток подмагничивания.

Преимущества магнитной записи — простота реализации ее в аппаратуре, высокое качество, практическая неизнашиваемость магнитной фонограммы во время воспроизведения, а также возможность после стирания использования носителя для новой записи; недостатки — невидимость дорожки записи для невооруженного глаза и невозможность очень длительной сохранности магнитных фонограмм (как у механических фонограмм, в форме металлических матриц, используемых для производства грампластинок). При долгом хранении магнитных фонограмм (на ленте) разрушается, главным образом, основа, поэтому целесообразно перезаписывать фонограммы каждые 25—30 лет на новую магнитную ленту.

Как упоминалось, магнитная звукозапись применяется очень широко. Ее используют в телевидении и радиовещании, при производстве кинофильмов и грампластинок, в быту, для научных исследований, в различных устройствах для автоматического сбора и передачи информации, в диктофонах. В соответствии с этим конструкции магнитофонов очень различны. Однако каждый аппарат содержит лентопротяжный механизм, усилитель записи, усилитель воспроизведения, генератор токов стирания и подмагничивания, магнитные головки (записи, воспроизведения, стирания), индикатор уровня записи и устройства для прослушивания (головные телефоны или громкоговоритель). В более простых магнитофонах вместо раздельных магнитных головок и раздельных усилителей записи и воспроизведения применяют одну универсальную головку и один универсальный усилитель, переключаемые то на запись, то на воспроизведение. При этом, конечно, исчезает возможность контроля записи путем ее почти одновременного воспроизведения, так как нет сквозного канала, образуемого в первом случае.

Усилители записи и воспроизведения не только повышают общую мощность сигнала, но и осуществляют перераспределение ее по спектру. Для достижения лучшего отношения сигнала к шуму оказывается целесообразным такое перераспределение, которое достигается, если в канале записи амплитудно-частотная характеристика имеет подъем на верхних частотах до 15—20 дБ и иногда небольшой подъем (3—5 дБ) на нижних частотах. В совокупности это называют *частотными предискажениями*. В канале воспроизведения для выравнивания общей характеристики магнитофона необходимо также определенным образом подбирать амплитудно-частотную характеристику, осуществляя так называемую *частотную коррекцию*. Для того чтобы запись, произведенную на одном магнитофоне, можно было полноценно воспроизвести на другом, аналогичном, магнитофоне, стандартизуется амплитудно-частотная характеристика канала воспроиз-

ведения, которая проверяется и регулируется с помощью специальной, так называемой *измерительной, ленты*, содержащей стандартную запись серии сигналов в диапазоне звуковых частот. Это позволяет все магнитофоны делать одинаковыми по условиям воспроизведения. После того как канал воспроизведения настроен по измерительной ленте, регулируют частотные предсказания в канале записи, добиваясь возможно более равномерной амплитудно-частотной характеристики канала записи-воспроизведения.

Большое значение для работы магнитофона имеет правильный выбор величины тока подмагничивания. Обычно регулировку производят при записи сигнала средней частоты (например, 1000 Гц). То значение тока, при котором выходное напряжение при воспроизведении полученной записи максимально, называют *оптимальным*. Иногда подмагничивание, устанавливаемое для записи (так называемое *номинальное значение*), немного превышает оптимальное, поскольку таким путем достигается лучшее сочетание всех качественных показателей записи. Указания о выборе подмагничивания приводятся в стандартах на магнитофоны и магнитные ленты и в технических описаниях (см. также § 10.5).

10.2. ГРАМПЛАСТИНКИ

Грампластинка содержит механическую запись звука, т. е. является механической фонограммой. Запись для грампластинки выполняют на покрытом слоем застывшего лака вращающемся металлическом диске с помощью электромеханического преобразователя, называемого *рекордером*. В обмотку рекордера поступают записываемые электрические сигналы. *Резец* (записывающий элемент), укрепленный на колеблющемся в такт с сигналами якоре рекордера, вырезает в лаковом слое неглубокую *канавку* — дорожку записи. Благодаря тому что рекордер с постоянной скоростью смещается по радиусу лакового диска, образуется непрерывная спиральная канавка с извилинами на боковых стенках, отображающими записанный сигнал.

Лаковый диск с записью после ряда технологических операций используют как оригинал для получения металлической копии (*матрицы*) с обратным рельефом поверхности (выступы вместо канавок). Матрицы попарно заряжают в пресс и прессуют из размягченной подогретой пластмассы грампластинки. Процесс прессования очень технологичен и обеспечивает выпуск недорогих грампластинок большими тиражами.

Грампластинки разделяются на *монофонические* и *стереофонические* (двухканальные)³. Грампластинки отечественного производства и запись на них долж-

ТАБЛИЦА 10.1

Параметры грампластинок

Частота вращения ¹ , об/мин	Диаметр пластинки, мм	Диаметр центрального отверстия ² , мм	Масса не более, г	Радиус канавки, мм	
				$R_{\text{макс}}$	$R_{\text{мин}}$
33 1/3	301	$7,24^{+0,9}$	184	144	60
	230		120	119	60
	174		50	84	53
45,11	174	$7,24^{+0,09}$	50	84	53
		или $38,5^{+0,10}$			

¹ Прежде выпускались также монофонические грампластинки с частотой вращения 77,92 об/мин. За рубежом в небольших количествах выпускают грампластинки с частотой вращения 16 2/3 об/мин.

² Эксцентриситет $\leq 0,2$ мм.

³ В ряде стран выпускаются также стереофонические 4-канальные грампластинки, называемые *квадрофоническими*.

ны удовлетворять техническим требованиям ГОСТ 7893—72 «Звукозапись механическая на диске» и ГОСТ 5289—73 «Грампластинки, общие технические условия». В табл. 10.1 приведены стандартизированные основные параметры грампластинок. На рис. 10.5 показан вид сверху на канавку при монофонической и стереофонической записях. На внутренней стенке канавки стереофонической грампластинки (стенка, расположенная ближе к центральному отверстию) записываются сигналы левого, а на наружной — сигналы правого каналов. Размеры канавки в микрометрах указаны на рис. 10.5*.

Амплитудно-частотная характеристика канала записи грампластинок приведена в табл. 10.2; она представляет собой зависимость амплитуды колебательной скорости (произведение максимального отклонения записывающего резца на круговую частоту его колебаний) от частоты сигнала.

Колебательная скорость характеризует уровень механической записи. Чем она больше, тем при прочих равных условиях громче звуковоспроизведение с грампластинки. Максимальное значение амплитуды колебательной скорости установлено равным 14 см/с для монофонической записи и 10 см/с для каждого канала стереофонической записи. Кроме того, во избежание перерезания соседних канавок и искажений ограничивают максимальное отклонение резца — не более 40 мкм в поперечном и 20 мкм в вертикальном направлениях. Это требование приводит к необходимости намного снижать уровень записи на низких частотах (<400 Гц) по сравнению с указанным выше пределом.

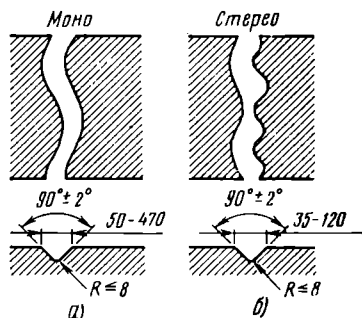


Рис. 10.5. Канавки грампластинки: монофонической (а) и стереофонической (б)

ТАБЛИЦА 10.2

Амплитудно-частотная характеристика канала записи грампластинок

Частота записи, Гц	Колебательная скорость записи (относительная величина), дБ	Частота записи, Гц	Колебательная скорость записи (относительная величина), дБ	Частота записи, Гц	Колебательная скорость записи (относительная величина), дБ
20	— 19,3	400	— 5,2	8 000	11,9
31,5	— 18,5	1 000	0	10 000	13,7
50	— 17,0	2 000	2,6	12 500	15,6
100	— 13,1	4 000	6,6	16 000	17,7
200	— 8,3	6 300	10,0	20 000	19,6

Пример. Найти допустимую амплитуду колебательной скорости v_{\max} на частоте $f=100$ Гц при монофонической записи. Так как при монофонической записи резец рекордера смещается только в поперечном направлении (в плоскости пластинки), его максимальное отклонение не должно превышать $A_{\max}=40$ мкм. Так как $v_{\max}=\omega A_{\max}=2\pi f A_{\max}$, то $v_{\max}=6,28 \cdot 100 \cdot 40 \cdot 10^{-4}=2,51$ см/с, т. е. значительно меньше стандартизированного максимального значения 14 см/с.

Так как максимальный уровень достигается редко и не в каждой записи, стандартом дополнительно устанавливаются несколько меньшие, так называемые *номинальные уровни записи*, относительно которых определяются качественные показатели записи на грампластинке — коэффициент гармонических искажений (не более 1,5%) и уровень фона (не хуже —60 дБ). Номинальный уровень за-

* В монофонических грампластинках старых лет выпуска с частотой вращения 77,92 об/мин применялась более широкая канавка.

писи соответствует амплитуде колебательной скорости 10 см/с для монофонической записи и 7 см/с для каждого канала стереофонической записи. Подъем амплитудно-частотной характеристики записи грампластинок в сторону более высоких частот выбран по тем причинам, что он позволяет увеличить отношение сигнал/шум при допустимых еще искажениях. При воспроизведении частотные искажения записи компенсируются путем выбора характеристики канала воспроизведения, обратной по форме характеристике записи.

Гибкие грампластины штампуются из пленки толщиной 0,12—0,15 мм, диаметром 174 мм и рассчитаны на частоту вращения 33 1/3 об/мин. Запись на гибких грампластинках монофоническая, размеры канавки и другие параметры примерно такие же, как и у прессованных грампластинок. Применяются, главным образом, в рекламных изданиях и в журнале «Кругозор». Износостойкость их невелика.

10.3. АППАРАТУРА ДЛЯ ВОСПРОИЗВЕДЕНИЯ ГРАМЗАПИСИ

Воспроизведение записи грампластинок может осуществляться с помощью аппаратуры, содержащей *электропроигрывающее устройство* (ЭПУ), которое состоит из движущего механизма, вращающего грампластинку, и *звукоснимателя*.

ТАБЛИЦА 10.3

Параметры электропроигрывающих устройств

Параметр	Значение параметра в зависимости от класса ЭПУ			
	Высший	I	II	III
Допускаемые отклонения от номинальной частоты вращения (при питании от сети переменного тока), %	$\pm 0,55$ $0,1+0,05$	$\pm 1,2$ $0,1+0,05$	$\pm 1,8$ $0,15+0,05$ (стерео)	$\pm 2,1$ $0,25+0,05$
Коэффициент детонации, %			$0,2+0,05$ (моно)	$0,4+0,10$ (при питании от источника постоянного тока)
Измеренный относительный уровень рокота (помеха от вибрации движущего механизма), дБ ¹ :				
без фильтра	—	—	—31	—28
с фильтром	—60	—46	—	—
Относительный уровень фона, дБ ² :				
с пьезоэлектрическим звукоснимателем	—67	—63	—57	—53
с магнитным звукоснимателем	—63	—57	—53	—
Уровень акустического шума от движущего механизма, дБ	30	30	34	38
Наработка на отказ, ч	1 700	1 700	2 000	2 000
Типы отечественных ЭПУ	—	I-ЭПУ-73С	II-ЭПУ-52С и II-ЭПУ-74С (стерео), II-ЭПУ-50 и II-ЭПУ-76 (моно)	III-ЭПУ-28М и III-ЭПУ-38

Определяется как отношение эффективного напряжения на выходе звукоснимателя при проигрывании немых канавок к эффективному напряжению при воспроизведении записи сигнала 315 Гц с уровнем —5 дБ относительно номинального. Амплитуда колебательной скорости 5,41 см/с).

² Определяется как отношение эффективного напряжения на выходе звукоснимателя, приподнятого над вращающейся грампластинкой, к действующему напряжению при воспроизведении записи сигнала 1000 Гц с номинальным уровнем.

В состав ЭПУ с магнитным звукооснимателем может также входить корректирующий усилитель. ЭПУ, встроенное в футляр и снабженное шнурами для внешних подключений, называется *электропроигрывателем* (проигрывателем). Если проигрыватель укомплектован усилителем и громкоговорителем, то вместе это называют *электрофоном*. ЭПУ входит, кроме того, в состав *радиол* и *магнито-радиол*.

Электропроигрывающие устройства. ЭПУ и соответственно проигрыватели изготавливаются четырех классов: высшего, I, II и III — по ГОСТ 18631—73. ЭПУ высшего и I классов предназначены для воспроизведения записей как стереофонических, так и монофонических грампластинок, ЭПУ II класса — только стереофонических или только монофонических, а ЭПУ III класса — только монофонических. Все ЭПУ обязаны обеспечивать частоты вращения грампластинок 33 1/3 и 45 11 об/мин. Необязательные частоты 16 2/3 и 77,92 об/мин. Качественные показатели (параметры) ЭПУ приведены в табл. 10.3. Там же указаны типы ЭПУ отечественного производства, соответствующих определенным классам качества. Диаметр шпинделя для надевания грампластинок во всех ЭПУ

равняется 7,24 — 0,05 мм, а для грампластинок с увеличенным центровым отверстием (см. табл. 10.1) — 38,2 — 0,80 мм. Если ЭПУ содержит корректирующий усилитель, его выходное сопротивление не должно превышать 10 кОм. В зависимости от класса в ЭПУ применяются различные вспомогательные устройства, облегчающие эксплуатацию и повышающие качество воспроизведения. Перечень их приведен в табл. 10.4.

ТАБЛИЦА 10.4

Вспомогательные устройства, входящие в состав ЭПУ

Устройство	Обязательность включения в зависимости от класса ЭПУ			
	Высший	I	II	III
Регулятор частоты вращения 33 об/мин, со встроенной визуальной индикацией	О	О	Н	Н
Автостоп ³	О	О	О	О ¹
Микролифт ⁴	О	О	О	О ¹
Механизм возврата звукооснимателя в исходное положение	О	О	Н	Н
Регулятор статической балансировки звукооснимателя относительно вертикальной оси	О	О	О ²	Н
Регулятор прижимной силы звукооснимателя	О	О	Н	Н
Цепь замыкания звукооснимателя или выключатель усилителя в нерабочем положении иглы	О	О	О	О

Примечание. О — обязательно; Н — не обязательно.

¹ Только при питании от сети переменного тока.

² При пьезоэлектрическом звукооснимателе не обязательно.

³ Для выключения двигателя в конце записи на одной стороне грампластины.




⁴ Для плавного опускания звукооснимателя на грампластинку и быстрого подъема его.

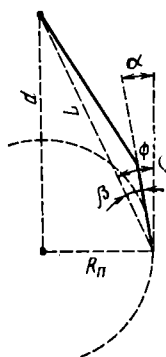
Звукоосниматели. По принципу действия известны звукоосниматели следующих типов: магнитные, пьезоэлектрические, полупроводниковые и фотоэлектрические. Наиболее распространены магнитные и пьезоэлектрические (пьезокерамические). Последние просты по конструкции, дешевы и не требуют применения корректирующего усилителя со специальной амплитудно-частотной характеристикой. Звукоосниматель состоит из *головки* и *тонарма*, укрепляемого в ЭПУ на поворотной ножке. Основными частями головки являются иглодержатель с корундовой или алмазной иглой и преобразователь механических колебаний в электрические. В головке стереофонического звукооснимателя таких преобразователей

два. Так как иглы для современных грампластинок с узкой канавкой и грампластинок старых лет выпуска с широкой канавкой различаются размерами, головки звукоснимателя делают сменными (каждая для определенного типа грампластинок) или снабжают сменными блоками с определенным типом иглы или с двумя переключаемыми иглами. Рабочие положения переключателя и сменные головки (или блоки) имеют цветные обозначения согласно табл. 10.5.

ТАБЛИЦА 10.5

Обозначения на головках звукоснимателя

Тип воспроизводимой грамзаписи	Обозначение	Цвет
Монофоническая с широкой канавкой		Зеленый
Монофоническая с узкой канавкой		Красный
Стереophonическая и монофоническая с узкой канавкой		Голубой



Головка звукоснимателя должна быть определенным образом ориентирована относительно грампластины. Идеальное расположение ее такое, как у рекордера при записи. Однако конструктивно удобнее перемещать головку по дуге, поворачивая тонаrm относительно вертикальной оси, хотя при этом возникают так называемые угловые искажения, определяемые величиной горизонтального угла погрешности α (рис. 10.6). Угловые искажения вызывают появление второй гармоники воспроизводимого сигнала. Коэффициент второй гармоники в процентах

$$\kappa_2 = \frac{8,35v}{u_i} \frac{\alpha}{R},$$

Рис. 10.6. К пояснению работы тонарма

где v — амплитуда колебательной скорости записи, см/с; u — частота вращения грампластины, об/мин; R — радиус канавки, см; α — угол погрешности, °.

Выбором изогнутой формы тонарма и его оптимальных размеров можно минимизировать угловые искажения в пределах всей зоны записи грампластины от R_{\max} до R_{\min} (см. табл. 10.1). Для расчета определяется промежуточный радиус канавки

$$R_{\Pi} = \sqrt{[(R_{\min} + R_{\max})/2]^2 + 3R_{\max}R_{\min}} - (R_{\min} + R_{\max})/2.$$

Если задана установочная база d (см. рис. 10.6), то необходимая длина тонарма $L = \sqrt{d^2 + R_{\Pi}^2}$. Если задана длина тонарма, то $d = \sqrt{L^2 - R_{\Pi}^2}$. Угол коррекции β определяется из уравнения

$$\sin \beta = \frac{R_{\min}R_{\Pi}}{2L(R_{\min} + R_{\Pi})} \left[\left(\frac{R_{\Pi}}{R_{\min}} \right)^2 + 3 \right],$$

при этом горизонтальный угол погрешности $\alpha = \Phi - \beta$, где $\sin \Phi = (L^2 - d^2 + R_{\Pi}^2)/2RL$. Обычно для высококачественного воспроизведения выбирают достаточно большие значения L и d .

Пример. Рассчитаем тонаrm для высококачественного проигрывателя. Наиболее сложно оптимизировать условия воспроизведения для самой большой грам-

пластинки ($R_{\text{макс}} = 144$ мм, $R_{\text{мин}} = 60$ мм). Подставляя значения в вышеприведенные формулы, получим $R_p = 89$ мм. Выбираем из конструктивных соображений $d = 212$ мм. Тогда $L = \sqrt{212^2 + 89^2} = 230$ мм;

$$\sin \beta = \frac{60 \cdot 89}{2 \cdot 230 (89 + 60)} \left[\left(\frac{89}{60} \right)^2 + 3 \right] = 0,4, \text{ отсюда } \beta \approx 24^\circ.$$

Определяем для промежуточного радиуса канавки

$$\sin \Phi = \frac{230^2 - 202^2 + 89^2}{2 \cdot 89 \cdot 230} = 0,39, \text{ отсюда } \Phi \approx 23^\circ,$$

угол погрешности $\alpha = 23 - 24 = -1^\circ$. Коэффициент второй гармоники при номинальном уровне записи ($v = 10$ см/с) и $u = 33 \frac{1}{3}$ об/мин

$$K_2 = \frac{8,35 \cdot 10}{33,33} \frac{1}{8,9} = 0,28\%,$$

что свидетельствует о достаточно высоком качестве воспроизведения.

Для портативных ЭПУ и проигрывателей среднего качества обычно выбирают следующие параметры звукоснимателя: $L = 185 \pm 2$ мм; $d = 175$ мм; $\beta = 20^\circ$.

Качество воспроизведения и износ пластинки зависят от величины прижимной силы иглы к канавке. Прижимная сила регулируется с помощью противовеса или пружины в тонарме. Для пьезоэлектрических звукоснимателей прижимная сила не должна превышать 70 мН, для магнитных — устанавливается в зависимости от класса ЭПУ: не более 20 мН в ЭПУ высшего, 30 мН — первого и 40 мН — второго классов. При недостаточной прижимной силе возникают нелинейные искажения, так как игла не будет надежно следовать по канавке и даже может выйти из нее. Чтобы обеспечить симметричное положение иглы в модулированной канавке, что особенно важно при воспроизведении стереозаписи, в лучших звукоснимателях предусматриваются балансировка тонарма и компенсация нежелательной скатывающей силы, которая оказывает через иглу избыточное давление на внутреннюю стенку канавки, увеличивает ее износ и нарушает баланс сигналов левого и правого каналов при воспроизведении стереофонической грамзаписи. Пример конструкции современного звукоснимателя приведен на рис. 10.7.

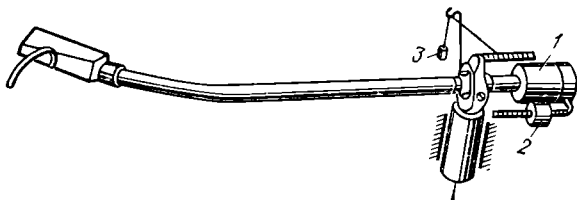


Рис. 10.7. Конструкция звукоснимателя:
1 — противовес; 2 — балансир; 3 — компенсатор скатывающей силы

Номинальная нагрузка пьезоэлектрического звукоснимателя должна состоять из сопротивления 1000 ± 50 кОм и емкости 150 ± 10 пФ, включенных параллельно, а магнитного звукоснимателя — из сопротивления 47 ± 5 кОм.

При магнитном звукоснимателе амплитудно-частотная характеристика предварительного усилителя должна быть обратна по форме характеристике грамзаписи (см. табл. 10.2). Кроме того, при любом типе звукоснимателя в усилителе приходится корректировать амплитудно-частотные искажения, поэтому для воспроизведения грамзаписи следует применять усилитель с раздельной регулировкой тембра на низких и высоких частотах.

Чувствительность пьезоэлектрического звукоснимателя 50—70 мВ/см/с, магнитного — не более 0,7 мВ/см/с; соответственно этому при конструировании усилителей можно считать, что пьезоэлектрический звукосниматель развивает на средних частотах напряжение 250 В, а магнитный — 3 мВ.

Номинальный частотный диапазон звукоосциллятора в ЭПУ высшего класса составляет 20—20 000 Гц, I—31,5—16 000 Гц; II—50—12 500 Гц, III—50—10 000 Гц при неравномерности амплитудно-частотной характеристики от 4 до 6 дБ в середине и от 8 до 10 дБ на краях указанного выше диапазона. Каналы стереофонических звукоосцилляторов в средней части диапазона могут отличаться по чувствительности не более чем на 2—3 дБ, а переходное затухание между каналами должно быть не менее 20 дБ.

Примеры звукоосцилляторов, изготавливаемых отечественной промышленностью:

ГЗУМ-73С — магнитный стереофонический для ЭПУ высшего и I классов (применяется в электрофоне «Аккорд-001»).

ГЗКУ-631Р — пьезоэлектрический, монофонический для ЭПУ II класса.

ГКЭ-661 — пьезоэлектрический, монофонический для ЭПУ II и III классов (класс обозначен на переключателе игл).

Проверку работы и измерение качественных показателей звукоосциллятора, а также ЭПУ и электрофона производят с помощью измерительной грампластинки фирмы «Мелодия» типа ИЗМЗЗД0101/0102, содержащей запись ряда частот с определенными значениями колебательной скорости.

Воспроизведение стереозаписи. Головка стереозвукоосциллятора может иметь три или четыре вывода. Маркировка их приведена в табл. 10.6. Стереозвукоосциллятор подсоединяется к двухканальному усилителю с двумя разнесенными громкоговорителями. Громкость и тембр нужно регулировать спаренными

ТАБЛИЦА 10.6

Маркировка выводов головки стереозвукоосциллятора

Число выводов	Назначение вывода	Номер вывода	Цвет провода (маркировка)
3	Левый канал	1	Белый
	Общий (земля)	2	Черный
	Правый канал	3	Красный
4	Левый канал	1	Белый
	Левый канал (земля)	2	Синий
	Правый канал	3	Красный
	Правый канал (земля)	4	Зеленый

регуляторами одновременно и одинаково в обоих каналах. Кроме того, необходим регулятор баланса, представляющий собой дополнительный спаренный регулятор усиления в обоих каналах, включенный так, что увеличение усиления в правом канале сопровождается уменьшением усиления в левом и наоборот. Регулятор баланса позволяет скомпенсировать различие чувствительностей в каналах звукоосциллятора, усилителя и громкоговорителя. Для проверки правильности расположения и фазировки громкоговорителей правого и левого каналов и баланса каналов применяется испытательная (демонстрационная) грампластинка фирмы «Мелодия». Указания по ее использованию записаны на самой пластинке.

Стереофонический звукоосциллятор чувствителен к вертикальным перемещениям иглы, поэтому движущий механизм ЭПУ должен быть хорошо отрегулирован, чтобы не создавать во время работы вибраций. Стереофонические грампластинки обладают свойством *совместимости*, т. е. их запись можно воспроизводить и на монофоническом ЭПУ. При этом сигналы правого и левого каналов складываются в звукоосцилляторе и пластинка звучит как монофоническая. С другой стороны, монофоническую запись на долгоиграющей пластинке можно воспроизводить на стереофоническом ЭПУ. Естественно, что сигналы пра-

вого и левого каналов при этом одинаковы и звуковоспроизведение остается монофоническим.

Электрофоны. Изготавливаются, как и проигрыватели, четырех классов: высшего, I, II и III по ГОСТ 11157—74. Класс электрофона определяется качеством примененного усилителя. ЭПУ, входящие в состав электрофона, по классу качества может не совпадать с классом качества электрофона. Основные качественные показатели электрофонов приведены в табл. 10.7. Электрофоны высшего и I классов изготавливаются только стереофонические.

ТАБЛИЦА 10.7

Параметры электрофонов

Параметр	Значение по классам электрофона			
	Высший	I	II	III
Рабочий диапазон частот (вход усилителя — звуковое давление), Гц, при питании:				
от сети переменного тока	40—18 000	63—16 000	100—10 000	—
от автономных источников	—	—	—	140—7 100
Номинальная выходная мощность, Вт, не менее, при питании:				
от сети переменного тока	10	6	2	—
от автономных источников	—	—	(стерео) 1,5 (моно)	1,5
Коэффициент гармоник по напряжению при номинальной мощности, %, не более, на частотах, Гц:				
до 100	1,5	2,5	4	5
>100	1,0	1,5	3	3
Относительный уровень фона при подключенном звукозаписывающем устройстве, дБ, не более	—50	—46	—40	—34
Разбаланс усиления и амплитудно-частотных характеристик стереоканалов, дБ, не более	2	2	3	3
Переходное затухание между стереоканалами (без звукозаписывающего устройства), дБ, не менее, на частотах, Гц:				
315	35	30	25	25
1000	40	35	30	30
5000	35	30	25	25
10 000	30	25	20	—
Наработка на отказ, ч, не менее	1500	1 600	1 950 (моно), 1 800 (стерео)	1 950 (моно), 1 800 (стерео)

10.4. ФОТОГРАФИЧЕСКИЕ ФОНОГРАММЫ

Характеристики фотографической фонограммы. Отношение светового потока, прошедшего через некоторый участок киноплёнки, к световому потоку, падающему на тот же участок, называется *коэффициентом пропускания* τ . Среднее значение коэффициента пропускания в пределах идеализированного бесконечно узкого воспроизводящего штриха установленной длины называется *пропусканием (Т) фонограммы*. Вдоль фонограммы пропускание изменяется, оно содержит постоянную составляющую и переменную, отображающую более

или менее точно записанный сигнал. Амплитуда переменной составляющей определяет собой *оптическую отдачу фонограммы*. Отношение амплитуды переменной составляющей T к постоянной составляющей T_0 называют *коэффициентом модуляции κ_m фонограммы*.

В случае идеализированной односторонней фонограммы переменной ширины с записью гармонического сигнала (рис. 10.8)

$$T_{\sim} = (T_{\text{макс}} - T_{\text{мин}})/2, \quad T_0 = (T_{\text{макс}} + T_{\text{мин}})/2,$$

$$\kappa_m = T_{\sim}/T_0 = (T_{\text{макс}} - T_{\text{мин}}) \cdot 100 / (T_{\text{макс}} + T_{\text{мин}}),$$

где $T_{\text{макс}}$ и $T_{\text{мин}}$ — максимальное и минимальное значения пропускания фонограммы. Практически невозможно получить на светлых участках киноплетки

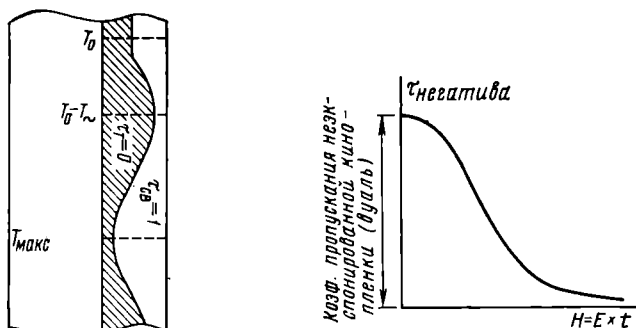


Рис. 10.8. Оптические характеристики односторонней фотографической фонограммы переменной ширины. Пунктиром показаны различные положения воспроизводящего штриха ($T_0 - T_{\sim} = T_{\text{мин}}$; $T_{\text{макс}} = T_0 + T_{\sim}$)

Рис. 10.9. Зависимость коэффициента пропускания от экспозиции киноплетки

$\tau_{\text{св}} = 1$ и на темных участках, т. е. на дорожке записи, $\tau_{\text{т}} = 0$. С учетом их реальных значений

$$\kappa_m = \frac{\tau_{\text{св}} - \tau_{\text{т}}}{\tau_{\text{св}} + \tau_{\text{т}}} \cdot 100, \%$$

Для увеличения оптической отдачи фонограммы надо стремиться к увеличению разности $\tau_{\text{св}} - \tau_{\text{т}}$, применяя, например, специальную высококонтрастную киноплетку типа ЗТ-7 и увеличивая ее экспозицию. По ряду причин не удается, однако, увеличивая экспозицию дорожки записи (что понижает $\tau_{\text{т}}$), не затронуть соседние светлые участки (что понижает $\tau_{\text{св}}$). Обычно $\tau_{\text{т}} \approx 0,03$; $\tau_{\text{св}} \approx 0,8$; $\kappa_m \approx 90\%$. Кроме коэффициента пропускания τ , прозрачность отдельных участков киноплетки часто характеризуют оптической плотностью $D = \lg \frac{1}{\tau}$.

При $\tau = 0$ $D = \infty$ (абсолютно непрозрачно); при $\tau = 1$ $D = 0$ (абсолютно прозрачно).

В фонограмме переменной плотности коэффициент пропускания не изменяется по ширине дорожки записи, поэтому $T = \tau$. Для случая неискаженной записи гармонического сигнала

$$T_{\sim} = (\tau_{\text{макс}} - \tau_{\text{мин}})/2, \quad T_0 = (\tau_{\text{макс}} + \tau_{\text{мин}})/2 = \tau_0,$$

$$\kappa_m = (\tau_{\text{макс}} - \tau_{\text{мин}}) \cdot 100 / (\tau_{\text{макс}} + \tau_{\text{мин}}),$$

где $\tau_{\text{макс}}$ и $\tau_{\text{мин}}$ — максимальные и минимальные коэффициенты пропускания дорожки записи; τ_0 — коэффициент пропускания в паузе записи.

Для получения неискаженной записи необходима линейная зависимость коэффициента пропускания проявленной киноплёнки от экспозиции H (произведения освещённости E в пределах записывающего штриха на продолжительность экспонирования t). Фактически такая зависимость нелинейна (рис. 10.9), и благоприятные результаты могут быть достигнуты только благодаря тому, что для воспроизведения записи практически всегда используют напечатанную с негатива позитивную копию и обе нелинейности (процесса записи и процесса копирования), в принципе, способны полностью компенсировать друг друга. Компенсация сильно зависит от режима фотохимической обработки киноплёнки, и поэтому технологически трудно обеспечить высокое качество фонограмм переменной плотности. Из-за этого, несмотря на то что фонограмма переменной плотности не требует столь тщательной настройки воспроизводящего штриха, как фонограмма переменной ширины, в настоящее время ее практически не применяют. Последующее содержание данного раздела относится в основном к фонограмме переменной ширины.

Шумы фотографической фонограммы. Случайные изменения пропускания фонограммы ($T_{\text{ш}}$), вызванные зернистой структурой фотоизображения, а также засорениями светлых и царапинами темных участков киноплёнки в пределах воспроизводящего штриха, вызывают шум при воспроизведении, пропорциональный величине

$$T_{\text{ш}} = \sqrt{\frac{a}{q} \tau_0 (1 - \tau_0)};$$

a — площадь зерна; q — площадь воспроизводящего штриха; τ_0 — среднее значение коэффициента пропускания в пределах воспроизводящего штриха.

Пример. Воспроизводящий штрих имеет длину 2,15 мм и ширину 0,02 мм. Зерно можно идеализованно представлять как квадрат со стороной 2 мкм. Найти отношение сигнал/шум фонограммы переменной ширины. Как было сказано, для такой фонограммы максимальный коэффициент модуляции $\kappa_{\text{м}} = 90\%$, кроме того, $\tau_{\text{св}} = 0,8$; $\tau_{\text{т}} = 0,03$. В паузе записи зачернена половина дорожки записи, поэтому

$$T_0 = (T_{\text{макс}} + T_{\text{мин}})/2 = (\tau_{\text{св}} + \tau_{\text{т}})/2 = (0,8 + 0,03)/2 = 0,415;$$

$$T_{\sim} = \kappa_{\text{м}} T_0 = 0,9 \cdot 0,415 \approx 0,38; \quad \tau_0 = (\tau_{\text{св}} + \tau_{\text{т}})/2 = 0,415;$$

$$T_{\text{ш}} = \sqrt{\frac{4 \cdot 10^{-6}}{2,15 \cdot 0,02} 0,415 (1 - 0,415)} = 4,74 \cdot 10^{-3}$$

$$\text{Сигнал/шум} = T_{\sim}/T_{\text{ш}} = 0,415/(4,74 \cdot 10^{-3}) = 80, \text{ т. е. } 38 \text{ дБ.}$$

Влияние царапин и засорений понижает это отношение до 33—35 дБ. У фонограмм переменной плотности, которые возбуждают меньший полезный сигнал, отношение сигнал/шум, подсчитанное аналогичным способом, не превосходит 30 дБ.

Для улучшения шумовых характеристик все аппараты фотографической записи снабжены специальными шумоподавителями, позволяющими повысить отношение сигнал/шум примерно на 8 дБ.

Записываемый сигнал подается параллельно на усилитель записи и усилитель шумоподавителя. Выходное напряжение последнего выпрямляется, фильтруется и используется в качестве сигнала управления. В простейшем варианте шумоподавитель сигнал управления прибавляется к записываемому сигналу, протекающему через обмотку зеркального гальванометра, и смещает изображение маски относительно щели так, чтобы ширина дорожки записи не превышала минимально необходимой для данной амплитуды записываемого сигнала (рис. 10.10). В паузе ширина дорожки сокращается до так называемой нуле-

вой линии. Благодаря работе шумоподавителя уменьшается шум как в паузе, так и при слабых сигналах.

Для того чтобы автоматическое изменение ширины дорожки записи не ощущалось на слух как неприятное искажение, постоянные времени фильтра выпрямителя в шумоподавители выбирают так, чтобы длительность перехода от минимальной ширины дорожки записи к максимальной (время открытия) была 15—20 мс. Длительность обратного перехода (время закрытия) больше и составляет 150—250 мс.

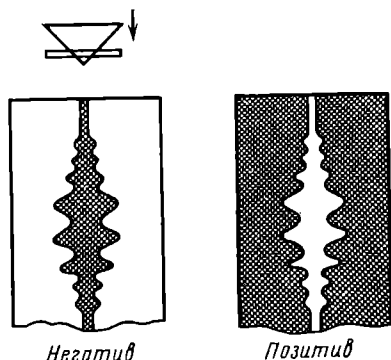


Рис. 10.10. К описанию принципа работы шумоподавителя в аппарате фотографической звукозаписи с дорожкой переменной ширины

В другом варианте шумоподавителя управляющий сигнал посредством электромагнита воздействует на особую заслонку, закрывающую лишнюю часть светового луча.

При записи с переменной плотностью управляющий сигнал, как и в первом случае, добавляется к записываемому и смещает среднюю рабочую точку на характеристике $\tau_{\text{негат}} = f(H)$ в сторону меньших экспозиций при записи слабых сигналов, что уменьшает коэффициент пропускания позитива фонограммы и понижает шум, сопровождающие сигналы при воспроизведении.

Искажения при фотографической звукозаписи. 1. Щелевые искажения. При воспроизведении фотографической записи с дорожкой переменной ширины или с дорожкой переменной плотности вследствие конечной ширины воспроизводящего штриха возникают амплитудно-частотные искажения в виде спада на верхних частотах. Такие искажения называются щелевыми. Их величина в децибелах равна

$$20 \lg \frac{\sin(\pi \Delta / \lambda)}{\pi \Delta / \lambda},$$

где Δ — ширина воспроизводящего штриха; λ — длина волны записи.

Пример. Ширина штриха $\Delta = 20$ мкм; верхняя частота записи $f = 10\,000$ Гц; скорость записи $v = 456$ мм/с. Длина волны

$$\lambda = v/f = 456/10\,000 = 456 \cdot 10^{-4} \text{ мм} = 45,6 \text{ мкм};$$

щелевые потери

$$20 \lg \frac{\sin(3,14 \cdot 20/45,6)}{3,14 \cdot 20/45,6} \approx 3 \text{ дБ}.$$

Для уменьшения искажений необходимо уменьшать Δ , однако при этом понижается световой поток, падающий на фонограмму в процессе воспроизведения, и ослабляется полезный сигнал в цепи фотозлемента. Выбор $\Delta = 20$ мкм является удачным компромиссом и используется в большинстве аппаратуры.

При записи щелевые искажения имеют примерно ту же величину, что и при воспроизведении. Кроме того, при записи фотограммы с дорожкой переменной ширины конечное значение Δ вызывает нелинейные искажения. Поэтому ширину записывающего штриха обычно сокращают до 5 мкм, что позволяет, кроме того, достичь необходимой большой освещенности штриха ($\sim 10^8$ лк).

2. Искажения заплывания. Из-за рассеяния света между экспонированными и неэкспонированными участками киноплёнки всегда возникают переходные зоны с промежуточными значениями оптической плотности. В результате форма огибающей дорожки записи перестаёт соответствовать форме записываемого

сигнала, возникает так называемое *заплывание фонограммы* (рис. 10.11), которое тем сильнее, чем короче волна записи. Заплывание вызывает появление искажений заплывания: нелинейных (четных) и линейных (ослабление высоких частот). Искажения заплывания компенсируют при изготовлении копии с негатива фонограммы (рис. 10.12) путем соответствующего подбора режима копирования.

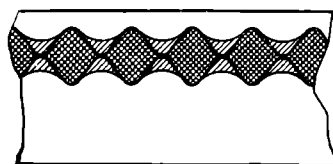


Рис. 10.11. Заплывание дорожки записи фотографической фонограммы

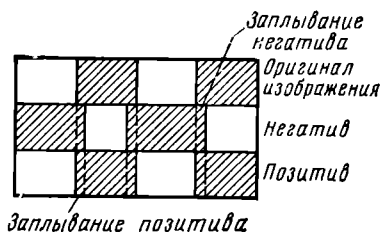


Рис. 10.12. Принцип компенсации заплывания фотографической фонограммы

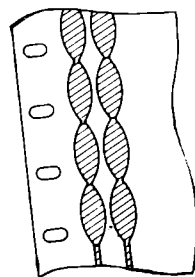


Рис. 10.13. Многодорожечная фотографическая фонограмма

Искажения заплывания могут быть значительно сокращены в случае использования многодорожечной фонограммы (рис. 10.13).

3. Искажения из-за неточной настройки воспроизводящего штриха. На практике обычно встречаются следующие дефекты настройки:

а. Неточная фокусировка, при которой на плоскости фонограммы не образуется резко очерченный штрих. Это эквивалентно расширению штриха и приводит к ослаблению полезного сигнала на верхних частотах.

б. Неравномерная освещенность по ширине штриха эквивалентна уменьшению ширины с вытекающими отсюда последствиями. Неравномерная освещенность по длине штриха приводит к нелинейным искажениям.

в. Наклон штриха в плоскости фонограммы на угол α относительно перпендикуляра к краю киноплёнки (перекос штриха) вызывает ослабление сигнала на верхних частотах. Величина потерь в децибелах равна

$$20 \lg \frac{\sin(\pi l \lg \alpha / \lambda)}{\pi l \lg \alpha / \lambda},$$

где l — максимальная ширина дорожки записи.

Пример. Ширина воспроизводящего штриха 20 мкм; максимальная ширина дорожки записи для 16-миллиметровой фонограммы $l = 1,5$ мм. При работе аппаратуры возможно возникновение наклона штриха с углом $\alpha = 0,5^\circ$. Определим суммарные потери воспроизведения для $f = 6000$ Гц. Так как скорость 16-миллиметровой фонограммы $v = 183$ мм/с, то длина волны $\lambda = 183 \cdot 10^3 / 6000 \approx 30$ мкм; щелевые потери

$$20 \lg \frac{\sin(3,14 \cdot 20/30)}{3,14 \cdot 20/30} = -3,8 \text{ дБ.}$$

Потери из-за наклона штриха

$$20 \lg \frac{\sin(3,14 \cdot 1600 \cdot \lg 0,5^\circ / 30)}{3,14 \cdot 1600 \cdot \lg 0,5^\circ / 30} = -3,3 \text{ дБ.}$$

Общие потери составляют 7,1 дБ.

Стандарты на фотографическую фонограмму. Размеры и расположение дорожек записи должны соответствовать ГОСТ 11360—65 для 16-миллиметровой пленки и ГОСТ 20059—74 для кинопленки 35 мм (рис. 10.14).

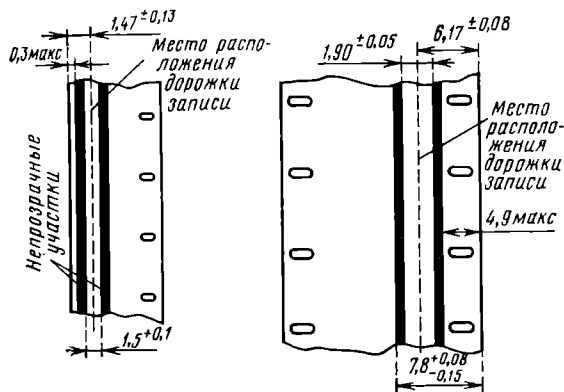


Рис. 10.14. Дорожка фотографической звукозаписи пленках шириной 16 мм (слева) и 35 мм (справа)

Номинальные скорости движения фонограмм (кинофильмов) 456 мм/с для 35-миллиметровой кинопленки и 183 мм/с для 16-миллиметровой кинопленки. Намотка производится на сердечники по ГОСТ 3917—64 (рис. 10.15).

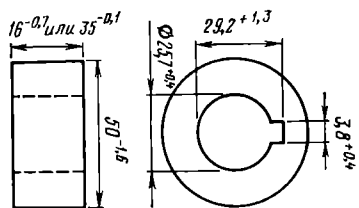


Рис. 10.15. Сердечник для намотки фотографических фонограмм и кинофильмов

В телевидении частота смены кадров выбрана 25 в минуту, а не 24, как в кинематографии; это соответствует скоростям 475 и 190 мм/с.

Как известно, проекция изображения происходит при скачкообразном движении кинопленки, а воспроизведение звука должно осуществляться при непрерывном движении фонограммы. Поэтому в звуковых кинофильмах изображение и звук сдвинуты друг относительно друга так, что фонограмма опережает (по расположению дорожки записи) относящееся к ней изображение на 20 ± 1 кадр при 35-миллиметровой кинопленке и на $26 \pm 0,5$ кадра при 16-миллиметровой кинопленке.

При движении фонограмма неизбежно смещается в перпендикулярном направлении в ту и другую стороны. Для того чтобы это не нарушало нормального воспроизведения, длину воспроизводящего штриха выбирают несколько большей, чем максимальная ширина дорожки записи, например для фонограммы на 35-миллиметровой кинопленке она равна 2,15 мм.

10.5. МАГНИТОФОНЫ

В зависимости от назначения различают следующие основные виды магнитофонов: студийные, синхронные, репортерские, бытовые и диктофоны.

Студийные магнитофоны. Предназначены для профессионального применения в радио-, кино- и телестудиях и при производстве грампластинок. Чаще всего в качестве носителя в них используют магнитную ленту шириной 6,25 мм. Требования к таким магнитофонам определены ГОСТ 12107—74, и основные показатели представлены в табл. 10.8.

ТАБЛИЦА 10.8

Параметры студийных магнитофонов

Параметр	Значение в зависимости от скорости, см/с		
	38,1	19,05	9,53
Дрейф скорости, %, не более	$\pm 0,3$	$\pm 0,3$	$\pm 0,3$
Коэффициент детонации	$\pm 0,04$	$\pm 0,06$	$\pm 0,1$
Номинальный уровень записи при частоте, Гц соответствует эффективному значению удельного магнитного потока короткого замыкания, нВб/м	1000	1000	315
для магнитофонов:			
монофонических	320	320	256
стереофонических	510	510	510
Относительный уровень помех в канале записи-воспроизведения, дБ, не более, для магнитофонов:			
монофонических	-61	-58	-54
стереофонических	-62	-60	по ТУ
Коэффициент гармоник в канале записи-воспроизведения при номинальном уровне записи, %, не более, для магнитофонов:			
монофонических	1(1000 Гц)	2(1000 Гц)	2(315 Гц)
стереофонических	2(1000 Гц)	по ТУ	по ТУ

В монофонических магнитофонах ширина дорожки записи равна ширине ленты. В стереофонических (двухканальных) на ленту одновременно наносят две дорожки записи шириной $2,7^{+0,1}$ мм. Внешние края дорожек совпадают с краями ленты.

Амплитудно-частотная характеристика канала воспроизведения, измеренная с помощью измерительной ленты, должна находиться в пределах поля допусков, показанного на рис. 10.16, где для скорости ленты 38,1

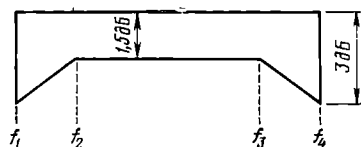


Рис. 10.16. Допуски на амплитудно-частотную характеристику студийных магнитофонов

и 19,05 см/с f_1 , f_2 , f_3 и f_4 соответственно равны в герцах 31,5; 63; 8000; 16 000, а для скорости 9,53 см/с — 40, 80, 6300, 12 500.

Амплитудно-частотная характеристика канала записи-воспроизведения должна быть такой, чтобы ее отличие от вышеуказанной характеристики канала воспроизведения находилось в пределах того же поля допусков (рис. 10.16). В тех же пределах должны находиться различия амплитудно-частотных характеристик стереоканалов воспроизведения и стереоканалов записи-воспроизведения, а фазовый сдвиг между выходными сигналами тех же каналов — не более 10° , переходное затухание между стереоканалами записи-воспроизведения должно быть не менее 40 дБ. На скорость 9,53 см/с эти требования не распространяются.

Студийные магнитофоны предназначены для работы в составе аппаратной звукозаписи. Они имеют линейный вход и линейный выход (входное и выходное напряжение 0,775 — 6 В). Ко входу подсоединяется выход микшерного пульта аппаратной. Раздельные усилители записи и воспроизведения магнитофона обеспечивают сквозной канал, позволяющий контролировать качество записи в процессе воспроизведения. Для контроля громкоговорящий агрегат ап-

паратной и индикатор уровня на микшерном пульте могут подключаться по желанию то на вход, то на выход магнитофона.

Примерами студийных магнитофонов с записью на ленте шириной 6,25 мм могут быть отечественные магнитофоны МЭЗ-62 (скорости ленты 38,1; 19,05 и 9,53 см/с) и МЭЗ-102 (скорости 38,1 и 19,05 см/с).

Последние годы в больших студиях звукозаписи нашли применение магнитофоны с более широкой лентой (25,4 и 50,8 мм). На ленте 50,8 мм размещается до 24 дорожек записи, электронная часть и блоки головок магнитофона образуют такое же количество сквозных каналов. Многодорожечный магнитофон позволяет разделять записывать группы инструментов и солистов в оптимальных для каждого из них акустических условиях, а затем, смешивая сигналы при перезаписи на ленту шириной 6,25 мм, дополнительно обрабатывать их, внося частотную коррекцию, изменяя реверберацию и т. д. Примером конструкции многодорожечного студийного магнитофона может быть магнитофон А80/VU-24-2 фирмы «Ампекс».

Качественные показатели многодорожечных магнитофонов примерно те же, что и у студийных магнитофонов на ленте шириной 6,25 мм.

Синхронные магнитофоны.

При съемке телевизионных или кинофильмов часто необходимо обеспечить синхронность между изображением и звуком при демонстрации фильма. Для этого, в принципе, можно использовать магнитофоны, аналогичные студийным, с той лишь разницей, что одновременно со звуком на отдельной дорожке записывается управляющий сигнал, связанный по частоте с движением киноплёнки в съемочной камере. При воспроизведении управляющий сигнал, воздействуя на привод магнитной ленты или кинофильма, обеспечивает требуемую синхрон-

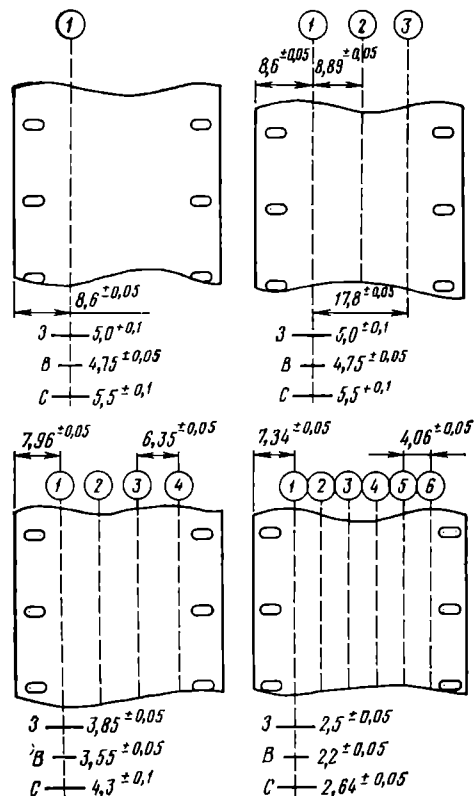


Рис. 10.17. Дорожки записи на 35-миллиметровой перфорированной магнитной ленте

ность. Хотя такой способ и применяется¹, но все же по технологическим причинам, главным образом для удобства монтажа кинофильма, предпочитают синхронный звук записывать во время съемки (или потом перезаписывать) на перфорированную магнитную ленту такую же по форме, как и перфорированная киноплёнка.

Магнитофоны с записью на перфорированную ленту условно называют *синхронными*. Привод перфорированной ленты осуществляется зубчатым барабаном. Чтобы сгладить толчки барабана на ленту, по пути ее движения располагают механические фильтры. Электронная часть синхронного магнитофона аналогична электронной части студийного магнитофона. В синхронных магни-

¹ Синхронная звукозапись на ленте шириной 6,25 мм возможна на отечественных магнитофонах «Ритм» и «Соната».

тофонах применяется перфорированная лента шириной 35 мм, движущаяся со скоростью 456 мм/с, или перфорированная лента 16 мм при скорости 18,3 см/с (в телевидении соответственно 47,5 и 19 см/с). В зависимости от комплектации магнитными головками и электронными блоками может осуществляться одно-, двух-, трех-, четырех- или шестидорожечная запись. Размеры и расположение

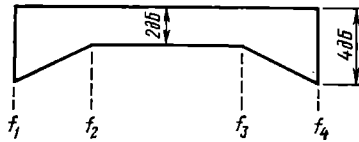
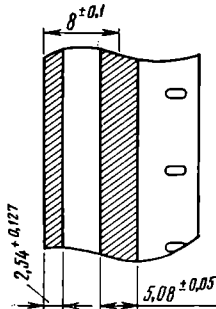


Рис. 10.18. Дорожки записи на 16-миллиметровой перфорированной магнитной ленте

Рис. 10.19. Допуски на амплитудно-частотную характеристику репортерских магнитофонов

дорожек на ленте 35 мм установлены ГОСТ 19869—74 и приведены на рис. 10.17. Там же показаны стандартизованные длины рабочих зазоров головок записи (З), воспроизведения (В) и стирания (С), которые все устанавливаются симметрично осевой линии каждой дорожки. На рис. 10.18 показано расположение дорожек на 16-миллиметровой ленте.

Качественные показатели синхронных магнитофонов устанавливаются техническими условиями и близки к показателям студийных магнитофонов с неперфорированной лентой.

Репортерские магнитофоны. Предназначены для записи в выездных условиях. Они легки, прочны и удобны для переноски. Электропитание — автономное. Нормально запись производится при неподвижном аппарате, хотя с несколько худшим качеством возможна и запись во время движения. Магнитофоны изготавливаются в соответствии с требованиями ГОСТ 12107—74. В них разрешены две скорости ленты — 19,05 и 9,53 см/с (преимущественно используется вторая). Основные качественные показатели представлены в табл. 10.9.

ТАБЛИЦА 10.9

Параметры репортерских магнитофонов

Параметр	Значение в зависимости от скорости, см/с	
	19,05	9,53
Отклонение скорости от номинального значения, %, не более	±1	±1
Коэффициент детонации	±0,1	±0,15
Номинальный уровень записи на частоте, Гц	1000	315
соответствует эффективному значению удельного магнитного потока короткого замыкания, нВб/м	320	256
Относительный уровень помех в канале записи-воспроизведения, дБ, не более	—56	—52
Коэффициент гармоник в канале записи-воспроизведения для номинального уровня записи, %, не более	1	2

Амплитудно-частотная характеристика канала воспроизведения, измеренная с помощью измерительной ленты, должна находиться в пределах поля допусков,

показанного на рис. 10.19, где для скорости ленты 19,05 см/с частоты в герцах f_1 , f_2 , f_3 и f_4 равны 40, 80, 8000, 14 000, а для скорости 9,53 см/с — 63, 125, 6300, 12 500. В пределах того же поля допусков должны находиться отличия от вышеуказанной характеристики, амплитудно-частотной характеристики канала записи-воспроизведения.

Репортерские магнитофоны — одноканальные, однокорректные. Дорожка записи занимает всю ширину ленты. Лента наматывается на катушки I типа. Преимущественно используются ленты толщиной 27 и 37 мкм [10.6].

Для снижения массы репортажных магнитофонов применяют одномоторный лентопротяжный механизм, отказываются от сквозного канала, т. е. применяют один универсальный усилитель и универсальную магнитную головку, слуховой контроль ведут только на головные телефоны. Характерным является наличие компрессора в канале записи, позволяющего во многих случаях не прибегать к оперативной ручной регулировке, отвлекающей внимание репортера.

Примером конструкции репортажного магнитофона служит аппарат «Репортер-5», много лет используемый в отечественном радиовещании. Его габаритные размеры $227 \times 180 \times 70$, масса 3,9 кг. Он может перевозиться всеми видами транспорта и работать в помещении и на открытом воздухе при температуре от $+10$ до $+40^\circ\text{C}$ (предельные условия — от -10 до $+40^\circ\text{C}$). «Репортер-5» имеет универсальное питание от внутренних шести батарей 1,5 В или от сети переменного тока через выносной выпрямитель. Скорость ленты 9,53 см/с. Запаса ленты толщиной 55 мкм на катушке I типа № 10 достаточно для записи в течение 17 мин (см. § 10.6).

Качественные показатели магнитофона «Репортер-5» несколько ниже современных требований, приведенных в табл. 10.19. Дрейф скорости $\pm 2\%$, коэффициент детонации 0,5%, коэффициент гармоник 3%, отношение сигнал/шум 48 дБ.

Бытовые магнитофоны. Назначение этих аппаратов очевидно из самого названия. По качественным показателям они уступают магнитофонам профессионального назначения, зато представляют собой полный комплект оборудования звукозаписи — от микрофона до громкоговорителя. Чаще всего это легко переносимые аппараты упрощенной конструкции с одномоторным лентопротяжным механизмом и одним универсальным усилителем. Максимальная разрешенная скорость ленты 19,05 см/с. В зависимости от формы намотки ленты различают катушечные и кассетные магнитофоны.

Катушечные магнитофоны должны соответствовать требованиям ГОСТ 12392—71. Они изготавливаются четырех классов (табл. 10.10). Лента шириной 6,25 мм наматывается на катушки I типа (см. § 10.6). Магнитофоны могут быть двух- и четырехдорожечными, монофоническими и стереофоническими (двухканальными). Расположение и размеры дорожек на ленте (вид со стороны рабочего слоя) показаны на рис. 10.20. Рисунок 10.20а относится к двухдорожечному монофоническому магнитофону. Сначала запись производится на дорожку

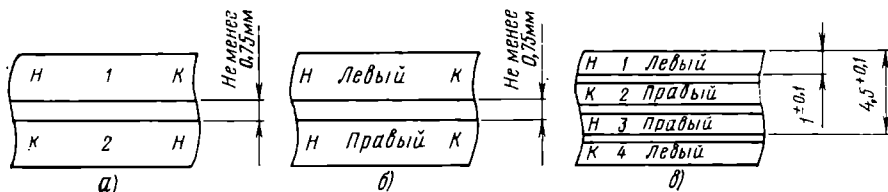


Рис. 10.20. Дорожки записи в бытовых катушечных магнитофонах

№ 1. Затем катушки с лентой переворачиваются и меняются местами или же (другой вариант) изменяют направление движения ленты и сдвигают (или переключают) магнитные головки, после чего записывают на дорожку № 2. Рису-

ТАБЛИЦА 10.10

Параметры катушечных бытовых магнитофонов

Параметр	Значение по классам			
	I	II	III	IV
Номинальные скорости ленты, см/с:				
обязательные	19,05 9,53 4,76	9,53 4,76 или 19,05 и 9,53	9,53	4,76
не обязательные	2,38	19,05 4,76 или 2,38	4,76 или 2,38	9,53 или 2,38
Отклонения скорости от номинального значения, %, не более	±2	±2	±2	±2
Коэффициент детонации, %, не более, при скорости, см/с:	Питание от сети переменного тока:			
19,05	±0,1	±0,2	—	—
9,53	±0,2	±0,3	—	—
4,76	±0,3	±0,4	±0,3	—
	Автономное или универсальное питание:			
19,05	—	±0,3	—	—
9,53	—	±0,4	±0,4	—
4,76	—	±0,5	—	±0,6
Номинальный уровень записи частоте 400 Гц, нВб/м	256	256	256	256
Рабочий диапазон частот, Гц, при скорости, см/с:				
19,05	40—18 000	40—16 000	—	—
9,53	40—14 000	63—12 500	63—12 500	—
4,76	63—8 000	63—6 300	—	80—6 300
Относительный уровень помех в канале записи-воспроизведения, дБ, не хуже, при числе дорожек:				
2	—48	—45	—42	—40
4	—45	—42	—39	—37
Коэффициент гармонических искажений на линейном выходе на частоте 400 Гц, %, не более	3	4	4	5
Относительный уровень проникания из одного стереоканала в другой, дБ, не хуже, на частотах, Гц:				
80	—20	—20	—	—
1000	—35	—35	—	—
8000	—30	—30	—	—

нок 10.206 относится к двухдорожечному стереофоническому магнитофону. Обе дорожки записываются одновременно. На рис. 10.20а показаны дорожки четырехдорожечного магнитофона. При монофонической записи дорожки используются в следующей последовательности: 1, 4, 3, 2, при стереофонической — сначала 1 и 3, потом — 4 и 2.

Кассетные магнитофоны изготавливаются в соответствии с ГОСТ 20883—75 четырех классов (табл. 10.11). Независимо от класса все магнитофоны используют ленту шириной 3,81 мм, размещенную в кассете по ГОСТ 20492—75. Скорость ленты при записи и воспроизведении 4,76 см/с. Расположение и размеры дорожек записи (вид со стороны рабочего слоя) показаны на рис. 10.21а для монофонического и на рис. 10.21б для стереофонического магнитофона. Сначала записываются дорожки 1 и 2, потом 3 и 4.

Все бытовые магнитофоны (как катушечные, так и кассетные) должны удовлетворять следующим требованиям:

1) обеспечивать запись с микрофона при звуковом давлении 0,2 Па, от радиовещательного приемника или телевизора при напряжении 10—30 мВ, радио-

ТАБЛИЦА 10.11

Параметры кассетных бытовых магнитофонов

Параметр	Значение по классам			
	I	II	III	IV
Отклонение скорости от номинального значения, %, не более	$\pm 1,5$	± 2	± 2	± 2
Коэффициент детонации, %, не более	$\pm 0,2$	$\pm 0,3$	$\pm 0,35$	—
То же, для носимых аппаратов	—	$\pm 0,4$	$\pm 0,4$	$\pm 0,5$
Номинальный уровень записи на частоте 400 Гц, нВб/м	250	250	250	250
Рабочий диапазон частот, Гц	40—14 000	63—12 500	63—10 000	80—8 000
Относительный уровень помех в канале записи-воспроизведения, дБ, не хуже, для магнитофонов:				
монофонических	—	—46	—42	—40
стереофонических	—46	—44	—40	—
Коэффициент гармоник в канале записи-воспроизведения на линейном выходе при частоте 400 Гц и номинальном уровне записи, %, не более	4	5	5	5
Относительный уровень проникания из одного стереоканала записи-воспроизведения в другой, дБ, не хуже, на частотах, Гц:				
80	—22	—18	—18	—
1000	—30	—25	—25	—
8000	—18	—16	—16	—

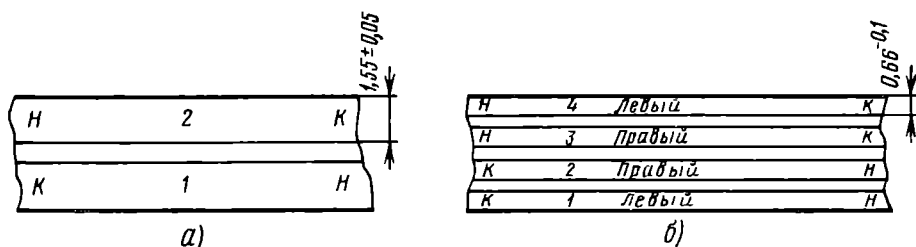


Рис. 10.21. Дорожки записи в бытовых кассетных магнитофонах

трансляционной линии при напряжении 10—30 В и $Z_{вх} \geq 10$ кОм, звукоснимателя при напряжении 150—500 мВ и $Z_{вх} \geq 400$ кОм;

2) обеспечивать напряжение на линейном выходе 200—500 мВ при внутреннем сопротивлении ≤ 10 кОм при воспроизведении записи с номинальным уровнем;

3) иметь индикатор уровня записи с временем интеграции 70—350 мс и временем обратного хода 0,5—2,5 с.

Измерения параметров магнитофона. Наряду с обычными для электроакустической аппаратуры при испытаниях магнитофонов применяют специфические методы измерения ряда параметров и особые измерительные средства.

Коэффициент детонации — коэффициент паразитной ЧМ звука, из-за неизбежных колебаний скорости магнитной ленты измеренный при условиях оценки, соответствующей среднему субъективному восприятию возникающих искажений. Измерение производится детонометром, соответствующим требованиям ГОСТ 11948—66. Измерения проводят на сигнале с частотой 3150 Гц $\pm 10\%$. В детонометре демодулированный сигнал поступает на фильтр, амплитудно-частотная ха-

характеристика пропускания которого отображает чувствительность слуха к частотной модуляции звука, происходящей с разной частотой (рис. 10.22). Сигнал с выхода фильтра подается на ламповый вольтметр, временные свойства которого близки к свойствам пикового вольтметра. При модуляции измерительного сигнала однополярными прямоугольными импульсами с частотой следования 1 Гц показания детонатора должны соответствовать следующим величинам (в процентах от показания при непрерывной частотной модуляции сигналом 4 Гц с тем же коэффициентом модуляции): при длительности импульса 10 мс — $21 \pm 3\%$, 30 мс — $62 \pm 6\%$, 60 мс — $90 \pm 6\%$, 100 мс — $100 \pm 4\%$. При импульсах длительностью 100 мс показания детонатора в промежутках между импульсами должны уменьшаться до $40 \pm 10\%$.

Для измерения коэффициента детонации на магнитофоне воспроизводят специальную запись сигнала 3150 Гц, выполненную на прецизионном лентопротяжном механизме (см. далее — измерительные ленты). При отсутствии такой записи можно сделать ее на самом испытуемом магнитофоне и, воспроизводя затем много раз, определить средний результат измерений.

Средняя скорость определяется за 10—100 с. Измерения проводят в начале и конце полного рулона на подающем узле при крайних режимах электропитания. Каждое измерение делают 5 раз и вычисляют средний результат, после чего определяют максимальное отклонение рассчитанной средней скорости от номинального значения.

Применяют два метода измерения: первый — путем определения времени прохождения отрезка ленты известной длины, второй — с помощью приставного измерительного ролика известного диаметра, ведомого (без скольжения) лентой в испытуемом магнитофоне. Определяя число оборотов ролика за 100 с, можно рассчитать среднюю скорость. Если скорость ленты в данном магнитофоне пропорциональна частоте питающей электросети, используют электрический секундомер, если не зависит от частоты — часовой секундомер.

Измерительные магнитные ленты. Так называются специальные записи на магнитных лентах, предназначенные для настройки и измерения магнитофонов. Измерительные ленты для студийных и репортерских магнитофонов сокращенно называются ЛИМ, для бытовых — ЛИЛ. Комплект лент состоит из нескольких частей, имеющих следующее назначение и буквенное обозначение: У — для проверки усиления канала воспроизведения, Ч — для проверки амплитудно-частотной характеристики канала воспроизведения, Д — для измерения коэффициента детонации, Н — для проверки угла наклона рабочего зазора головки воспроизведения, В — для проверки установки по высоте головки воспроизведения (эта часть содержится только в лентах ЛИМ).

Все ленты ЛИМ согласно ГОСТ 8304—77 имеют ширину 6,25 мм и выпускаются двух типов: ЛИМ-1 — для проверки монофонических магнитофонов и ЛИМ-2 — для проверки стереофонических магнитофонов. Полное название измерительной ленты содержит также округленное значение скорости, например ЛИМ-1-Ч-38 — для проверки амплитудно-частотной характеристики канала воспроизведения монофонического магнитофона при скорости 38,1 см/с. Лента ЛИМ-2-В изготавливается только для скорости 38,1 см/с. Лента для измерения коэффициента детонации не имеет в своем названии цифры после букв «ЛИМ». Расположение дорожек записи на измерительных лентах ЛИМ показано на рис. 10.23.

Часть «У» содержит запись с параметрами, представленными в табл. 10.12. При воспроизведении этой записи усиление канала воспроизведения регулируют

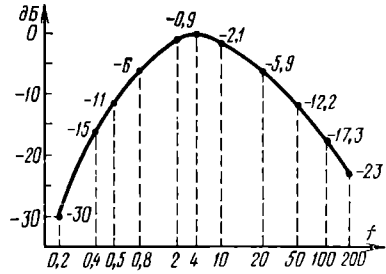


Рис. 10.22. Амплитудно-частотная характеристика фильтра детонатора

ТАБЛИЦА 10.12

Параметры части «У» измерительных лент ЛИМ

Параметр	Значение в зависимости от скорости, см/с		
	38,1	19,05	9,53
Частота сигнала, Гц	1000 ± 3	1000 ± 3	315 ± 3
Уровень записи, нВб/м: ЛИМ-1	320	320	250
ЛИМ-2	520	520	—
Коэффициент 3-й гармоника, %	3	3	3

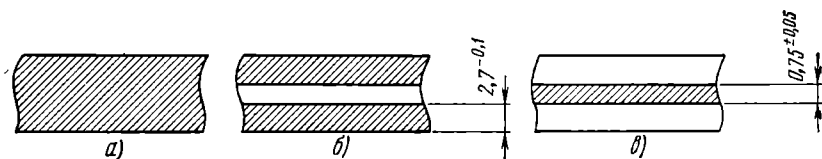


Рис. 10.23. Дорожки записи в измерительных лентах ЛИМ:

а) ЛИМ-1-У, ЛИМ-1-Ч, ЛИМ-Д; б) ЛИМ-2-У, ЛИМ-2-Ч, ЛИМ-1-Н; в) ЛИМ-2-В

так, чтобы выходное напряжение равнялось номинальному, а индикатор уровня записи показывал «0 дБ».

Часть «Ч» содержит записи ряда частот, выполненные с нормированной амплитудно-частотной характеристикой магнитного потока короткого замыкания (табл. 10.13). При воспроизведении этих записей регулируют амплитудно-частот-

ТАБЛИЦА 10.13

Параметры части «Ч» измерительных лент ЛИМ

Скорость, см/с	τ_1 , мкс	τ_2 , мкс	Магнитный поток короткого замыкания, дБ, на частоте, Гц									
			31,5	40	63	80	125	250	315	500	1 000	2 000
38,1	35	∞	0,2	—	0,2	—	0,2	0,2	—	0,2	0	-0,6
19,05	70	∞	0,8	0,8	0,8	0,8	0,8	0,7	—	0,6	0	-1,7
9,53	90	3180	—	4,1	2,1	1,5	0,7	0,1	0	-0,3	-1,2	-3,5

Продолжение табл. 10.13

Скорость, см/с	τ_1 , мкс	τ_2 , мкс	Магнитный поток короткого замыкания, дБ, на частоте, Гц							
			4 000	6 300	8 000	10 000	12 500	14 000	16 000	18 000
38,1	35	∞	-2,3	-4,4	-5,9	-7,4	-9,1	—	-11,1	-12
19,05	70	∞	-5,4	-8,6	-10,5	-12,3	-14,2	-15,1	-16,3	-17,3
9,53	90	3180	-7,8	-11,3	-13,3	-15,2	-17,0	-18,0	—	—

ную характеристику канала воспроизведения так, чтобы ее неравномерность соответствовала допустимому стандарту значению. Аналитически амплитудно-частотная характеристика измерительных лент может быть вычислена в децибелах по формуле

$$N = 10 \lg \left(1 + \frac{1}{4\pi^2 f^2 \tau_2^2} \right) - 10 \lg (1 + 4\pi^2 f^2 \tau_1^2),$$

где τ_1 и τ_2 — постоянные времени коррекции, приведенные для каждой скорости в табл. 10.13, с; f — частота, Гц.

Пример. Определить относительный уровень записи измерительной ленты ЛИМ-1-Ч-19 для частоты 10 кГц. Подставляя в формулу $f=10^4$ Гц и $\tau_1=70 \cdot 10^{-6}$ с, получим

$$N = -10 \lg (1 + 4 \cdot 3,14^2 \cdot 10^8 \cdot 70^2 \cdot 10^{-12}) = -13,08 \text{ дБ.}$$

Тот же расчет для частоты 1000 Гц дает — 0,76 дБ. Отсюда относительный уровень для частоты 10 000 Гц равен — (13,08—0,76) = —12,3 дБ.

Часть «Д» содержит запись сигнала $3150 \text{ Гц} \pm 2\%$ и используется для измерения коэффициента детонации (см. с. 272). Собственный коэффициент детонации этой записи не превышает $\pm 0,01$; $\pm 0,02$ и $\pm 0,03\%$ для скоростей 38,1; 19,05 и 9,53 соответственно.

Часть «Н» содержит двухдорожечную запись сигнала одной и той же частоты. Запись — противофазная с чередующимися дополнительными сдвигами по фазе сигналов одной дорожки относительно сигналов другой в сторону опережения и отставания. Записи расположены в следующей последовательности сдвигов фаз: $180^\circ - \phi$, $180^\circ + \phi$ и т. д. Частоты сигналов равны 4000, 2000 и 1000 Гц для скоростей 38,1; 19,05 и 9,53 соответственно.

При воспроизведении записи части «Н» головкой с правильно установленным наклоном рабочего зазора (угол 90°) выходные напряжения должны быть одинаковы как на первом ($180^\circ - \phi$), так и на втором ($180^\circ + \phi$) участках.

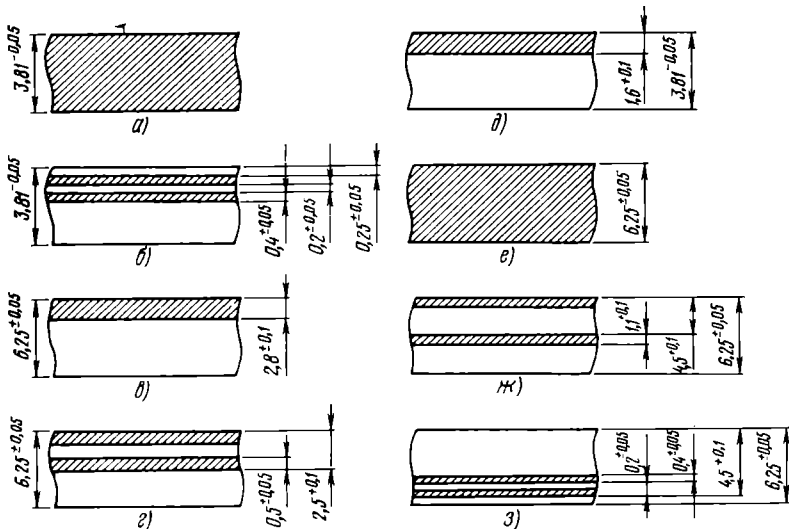


Рис. 10.24. Дорожки записи в измерительных лентах ЛИЛ:
а) ЗЛИЛ1-Д-4; б) ЗЛИЛ2-Н; в) БЛИЛ2-2-19, БЛИЛ2-У-9, БЛИЛ2-У-4, БЛИЛ2-Ч-19, БЛИЛ2-Ч-9, БЛИЛ2-Ч-4; г) БЛИЛ2-Н; д) ЗЛИЛ2-У-4, ЗЛИЛ2-Ч-4; е) БЛИЛ1-Д-19, БЛИЛ1-Д-9, БЛИЛ1-Д-4; ж) БЛИЛ4-У-19, БЛИЛ4-У-9, БЛИЛ4-У-4, БЛИЛ4-Ч-19, БЛИЛ4-Ч-9, БЛИЛ4-Ч-4; з) БЛИЛ4-Н

Часть «В» содержит запись сигнала 1000 Гц. При воспроизведении этой записи сигнал не должен прослушиваться ни на одном из двух выходов стереофонического магнитофона.

Измерительные ленты ЛИЛ (для бытовых магнитофонов) изготавливаются по техническим требованиям, изложенным в ГОСТ 19786—74. Полное название ленты ЛИЛ, кроме букв У, Ч, Д и Н, имеющих тот же смысл, что и для ленты ЛИМ, содержит еще ряд цифр. Например, 6 ЛИЛ2-У-19 означает ленту шириной 6,25 мм для скорости 19,05 см/с. Цифра после букв ЛИЛ условно обозначает расположение дорожек записи. На рис. 10.24 представлен весь ассортимент изготавливаемых лент ЛИЛ. Часть «У» всех лент ЛИЛ содержит запись сигнала 400 Гц $\pm 1\%$ с уровнем 250 нВб/м.

Параметры записи в части «Ч» приведены в табл. 10.14. Расчет амплитудно-частотной характеристики этой записи может быть проведен по формуле, приведенной ранее для лент ЛИМ.

ТАБЛИЦА 10.14

Параметры части «Ч» измерительных лент ЛИЛ

Скорость, см/с	τ_1 , мкс	τ_2 , мкс	Магнитный поток короткого замыкания, дБ, на частоте, Гц									
			31,5	40	63	80	125	160	250	400	1 000	2 000
19,05	70	—	0,1	0,1	0,1	0,1	0,1	—	0,1	0	—0,6	—2,4
9,53	90	3 180	—	4,0	2,0	1,4	0,6	—	0,1	0	—1,0	—3,4
4,76	120	1 590	—	8,3	5,2	3,8	1,9	1,2	0,4	0	—1,6	—4,8

Продолжение табл. 10.14

Скорость, см/с	τ_1 , мкс	τ_2 , мкс	Магнитный поток короткого замыкания, дБ, на частоте, Гц							
			4 000	6 300	8 000	10 000	12 500	14 000	16 000	18 000
19,05	70	—	—6,0	—9,3	—11,1	—	—14,8	—	—16,9	—18,3
9,53	90	3 180	—7,6	—11,1	—13,1	—15,0	—16,8	—18,0	—	—
4,76	120	1 590	—9,7	—13,3	—15,3	—17,2	—	—	—	—

Часть «Д» содержит запись сигнала 3150 Гц $\pm 1\%$. Коэффициент паразитной частотной модуляции этой записи, который отличается от коэффициента детонации тем, что при его измерении не включается взвешивающий фильтр с характеристикой, показанной на рис. 10.22, равен $\pm 0,06$, $\pm 0,1$ и $\pm 0,15$ на скоростях 19,05, 9,53 и 4,76 соответственно.

Часть «Н» аналогична по записи той же части ленты ЛИМ¹. Методика использования лент ЛИЛ при измерениях магнитофонов, в принципе, не отличается от методики для лент ЛИМ.

Диктофоны. Так называются специальные магнитофоны, предназначенные для записи речи с целью ее последующей буквенной перезаписи от руки или на пишущей машинке. От обычного магнитофона диктофон отличается, во-первых, тем, что управление им при записи максимально упрощено благодаря наличию АРУ и автопуска, останавливающего движение носителя, если паузы превышают определенное время. Для воспроизведения в диктофоне предусмотрено дистанционное управление от ножной педали или с небольшого пульта, укрепляе-

¹ В лентах ЛИЛ между участками записи со сдвигом фаз $180^\circ - \phi$ и $180^\circ + \phi$ расположены дополнительно участки со сдвигом 180° .

мого на пишущей машинке. Такое управление позволяет прослушивать запись небольшими частями, при необходимости возвращать фонограмму в первоначальное положение (так называемый *откат*) и повторно воспроизводить запись, наносить на фонограмму редакционные метки и т. д. Движущий механизм диктофона должен иметь очень прочную конструкцию, чтобы допускать частые включения, выключения и реверсирования движения носителя.

В качестве носителей в диктофонах используют магнитную ленту шириной 6,25 и 3,81 мм (последняя — в кассетах), а также магнитные диски диаметром 155 мм и так называемые магнитные манжеты, представляющие собой петлю широкой магнитной ленты. ГОСТ 14907—69 устанавливает три класса качества, эксплуатационные свойства и разрешает кабинетное и носимое исполнение, а также различные виды электропитания как для универсальных, так и для воспроизводящих диктофонов.

10.6. МАГНИТНЫЕ ЛЕНТЫ

Общая характеристика. Магнитная лента состоит из пластмассовой основы, на одну из сторон которой нанесен магнитный рабочий слой. Большинство современных лент порошкового типа; их рабочий слой содержит микроскопические магнитные частицы, разделенные друг от друга застывшим связующим. Наиболее распространены частицы $\gamma\text{Fe}_2\text{O}_3$ (гамма-окисел железа) и CrO_2 (двуокись хрома).

Магнитные ленты изготавливают различных ширины и толщины. Самые узкие (3,81 мм) — они же и самые тонкие — применяют в кассетных магнитофонах. В большинстве катушечных магнитофонов используют ленту шириной 6,25 мм. Более широкие ленты (до 50,8 мм) требуются для многорожечной записи в радиовещании, кинематографии, телевидении и при записи для грампластинок. Для звукозаписи, синхронной с изображением (в телевидении и кинематографии), применяют также перфорированные магнитные ленты, содержащие по краю перфорационные отверстия, за которые их ведет зубчатый барабан лентопротяжного механизма.

Различают три вида качественных показателей магнитных лент: *физико-механические свойства*, определяющие поведение ленты при механических и климатических воздействиях, т. е. ее механическую прочность, *магнитные свойства* и *электроакустические свойства*, характеризующие качество записи на ленте. Качественные показатели для неперфорированных лент различной ширины профессионального назначения установлены ГОСТ 21881—76, а для лент, предназначенных для бытовой звукозаписи, — ГОСТ 21402.0.75, 21402.1—75 и 21402.2—75. Часть электроакустических свойств ленты определяется относительно типовой магнитной ленты, специально выбранной в качестве образца для сравнения. Свойства каждой ленты при звукозаписи определяются при номинальном токе подмагничивания. В качестве последнего принимают ток, соответствующий максимальной отдаче при записи сигнала 1000 Гц (для лент, используемых при всех скоростях, кроме 38,1 см/с), или ток, в 1,2 раза больший, чем ток для максимальной отдачи при записи сигнала 400 Гц (для лент, предназначенных для скорости 38,1 см/с). Главные электроакустические показатели следующие:

- 1) чувствительность на средней частоте (определяется относительно типовой ленты);
- 2) амплитудно-частотная характеристика (определяется по положению крайней правой точки также относительно типовой ленты);
- 3) коэффициент 3-й гармоники при стандартизованном номинальном уровне записи;
- 4) относительный уровень шума в паузе;
- 5) относительный уровень сигналов копирэффекта (эхо-сигналы, возникающие из-за намагничивания смежных витков ленты в рулоне);
- 6) относительный уровень стирания, показывающий, насколько может быть ослаблена в результате размагничивания ленты ненужная запись.

В табл. 10.15 приведены электроакустические свойства нескольких отечественных лент.

ТАБЛИЦА 10.15

Электроакустические свойства магнитных лент шириной 6,25 мм

Показатель	Значение для ленты			
	А4403-6 (типовая)	А2601 (тип 6)	для бытовых магнитофо- нов (ГОСТ 21402.2—75)	для студий- ных магнито- фонов (ГОСТ 21887—76)
Номинальная толщина, мкм	55	55	34	
Коэффициент 3-й гармоники, %, при уровне записи, нВб/м:				
256	2,1	2	2	
520	—	4	—	1,5
Относительный уровень шума паузы, дБ	—65	—62	—54	—60*
Относительный уровень копир-эффекта, дБ	—51	—51	—48	—56
Относительный уровень стирания, дБ	—77	—77	—70	—77

* Измерено специальным измерителем шума относительно уровня записи 320 нВб/м.

Обозначения магнитных лент. Согласно ГОСТ 17204—71 обозначение состоит из пяти основных элементов.

Первый из них — буква, указывающая предпочтительное назначение ленты: А — звукозапись; Т — видеозапись; В — вычислительная техника; И — точная магнитная запись.

Второй элемент — цифра, обозначающая материал основы: 2 — диацетилцеллюлоза; 3 — триацетилцеллюлоза; 4 — полиэтилентерефталат (лавсан).

Третий элемент — цифра, условно обозначает общую толщину ленты (в микрометрах): 0 — до 10; 1 — 10÷15; 2 — 15÷20; 3 — 20÷30; 4 — 30÷40; 5 — 40÷50; 6 — 50÷60; 7 — 60÷75; 8 — 75÷100; 9 — >100.

Четвертый элемент — двузначная цифра — означает порядковый номер разработки. Пятый элемент, отделяемый дефисом, — целочисленное выражение номинальной ширины ленты. Шестой элемент — дополнительный буквенный индекс: П — перфорированная лента; Р — лента для радиовещания; Б — лента для бытовых магнитофонов.

Пример. Магнитная лента А4405-6Р означает ленту для звукозаписи (А) в радиовещании (Р) шириной 6,25 мм общей толщиной 37 мкм (4) на основе из лавсана (4), порядковый номер разработки — 05.

Основные размеры магнитных лент. Общие требования к размерам установлены ГОСТ 8303—76. Для магнитофонов профессионального назначения избраны следующие размеры неперфорированных лент, указанные в ГОСТ 21887—76; номинальная ширина 3,81; 6,25; 12,70; 25,40; 50,80. Для лент шириной 3,81 общая толщина составляет 18—2 мкм, для остальных стандартизированы три толщины: 27⁻², 37⁻³, 55⁻⁵ мкм. Для бытовых катушечных магнитофонов применяется лента шириной 6,25 мм, толщиной 34±4 мкм (ГОСТ 21402.2—75), для бытовых кассетных — лента шириной 3,81 мм, толщиной 16±2 мкм (ГОСТ 21402.1—75).

Перфорированные магнитные ленты для синхронной звукозаписи в кинематографии и телевидении изготавливаются согласно ГОСТ 8303—76 номинальной шириной 16,35 и 70 мм. Их толщина — не более 90 мкм (при полиэтилентерефталатной основе) и не более 150 мкм при основах другого типа, 16-миллиметровая лента имеет одностороннюю, остальные — двустороннюю перфорацию.

Кроме того, ГОСТ 9492—60 стандартизует перфорированные киноплёнки с нанесёнными (со стороны основы) магнитными дорожками для кинофильмов с магнитной записью сопровождающего звука. Размеры и расположение дорожек показаны на рис. 10.25. Основа киноплёнки и магнитные дорожки обращены на

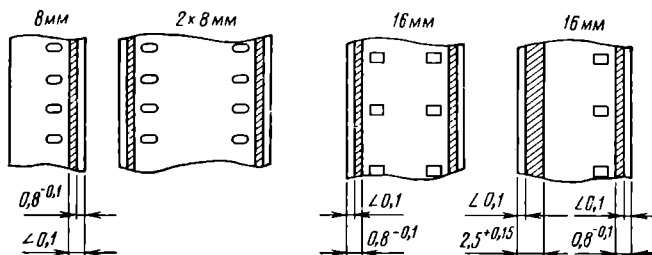


Рис. 10.25. Магнитные дорожки на перфорированных плёнках

рисунку к наблюдателю. В таких кинофильмах запись звука опережает соответствующее ему изображение на 56 ± 2 кадра (кинофильм на 8-миллиметровой плёнке) и 28 ± 1 кадр (16-миллиметровая киноплёнка). Дополнительно ГОСТ 11250—74 устанавливает размеры и расположение четырех магнитных дорожек на 70-миллиметровой киноплёнке, используемой для широкоформатных кинофильмов с шестиканальной звукозаписью.

Намотка магнитных лент. Магнитные ленты наматываются на сердечники, катушки или в кассеты. Неперфорированные ленты шириной 6,25 мм, применяемые для студийных магнитофонов, наматываются чаще всего на сердечники I типа диаметром 100 мм (рис. 10.26) по ГОСТ 12796—67. Стандартом предусмотрена, кроме того, намотка на сердечники II типа (ГОСТ 21717—76) диаметром 114 мм (рис. 10.27) и катушки II типа (рис. 10.28) по ГОСТ 16824—76. Более

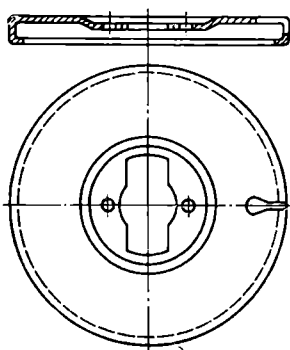


Рис. 10.26. Сердечник I типа

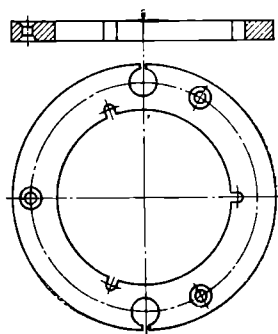


Рис. 10.27. Сердечник II типа

широкие неперфорированные ленты, применяемые для профессиональной звукозаписи, наматываются на катушки II типа и сердечники II типа. Ленты шириной 6,25 мм для катушечных бытовых магнитофонов наматываются на катушки I типа (рис. 10.29) согласно ГОСТ 13275—67. Ориентировочная длина ленты на катушках I и II типов приведена в табл. 10.16.

Перфорированная магнитная лента наматывается на сердечники по ГОСТ 3917—64 (рис. 10.15). Рулон содержит 315—350 м ленты. Длину ленты в рулоне

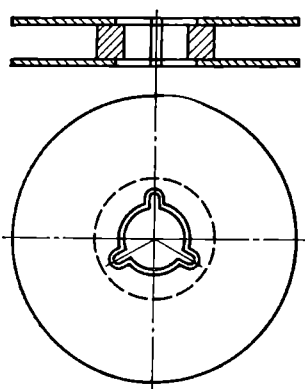


Рис. 10.28. Катушка типа II

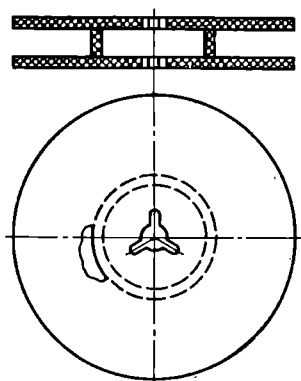


Рис. 10.29. Катушка типа I

ТАБЛИЦА 10.16

Длина магнитной ленты в катушках

Номер катушки	Тип катушки	Длина ленты в катушке, м, при толщине ленты, мкм				Номер катушки	Тип катушки	Длина ленты в катушке, м, при толщине ленты, мкм			
		55	37	27	18			55	37	27	18
7,5	I	50	70	90	130	18	II	220	330	460	690
10		100	150	180	270	20		340	500	700	1 060
13		180	270	360	540	23		500	700	1 030	1 540
15		250	370	500	750	27		750	1 100	1 540	2 310
18		350	520	700	1 050	32		1 150	1 750	2 400	3 600
						35		1 500	2 200	3 080	4 630

можно вычислить по формуле $L = (D_n^2 - D_v^2) / 0,01274 d$, где L — длина, м; D_n — наружный диаметр рулона, см; D_v — внутренний диаметр рулона, см; d — общая толщина ленты, мкм. Соответственно диаметр рулона ленты (в сантиметрах), необходимого для записи в течение t минут при скорости v , см/с, $D_n = \sqrt{7644 \cdot 10^{-6} d v t + D_v^2}$.

Пример. Лента толщиной 55 мкм намотана на сердечник I типа ($D_v = 10$ см). Найдем диаметр рулона, необходимого для 15-минутной записи, при $v = 9,5$ см/с: $D_n = \sqrt{7644 \cdot 10^{-6} \cdot 55 \cdot 9,5 \cdot 15 + 10^2} = 12,6$ см.

Магнитные ленты шириной 3,81 мм наматываются в кассеты (рис. 10.30) по ГОСТ 20492—75. Существуют три типа кассет — кассета МК-60 [содержит 90 м ленты толщиной 18 мкм и обеспечивает при скорости 4,76 см/с 60-минутную запись или воспроизведение (с переворачиванием кассеты)]; кассеты МК-90 и МК-120 (рассчитаны на ленты толщиной до 14 и до 10 мкм соответственно и обеспечивают 90- и 120-минутную запись). Такие кассеты пока еще у нас не выпускаются.

Эксплуатация магнитных лент. Нормальными климатическими условиями для хранения и эксплуатации магнитных лент можно считать температуру 15—25°С и относительную влажность воздуха 45—80%. Кратковременно ленты могут находиться и в более трудных условиях (например, от —40 до +60°С). Натяжение ленты шириной 6,25 мм при ее движении в магнитофоне должно равняться $1 \pm 0,2$ Н при толщине 55 мкм, $0,6 \pm 0,1$ Н при толщине 27 и 37 мкм и

$0,4 \pm 0,1$ Н при 18 мкм. При более узкой или более широкой ленте натяжение пропорционально изменяется. При пуске и останове толчок на ленту не должен превосходить примерно пятикратного натяжения при рабочем ходе. Превышение указанных значений натяжения может вызвать остаточную деформацию лент.

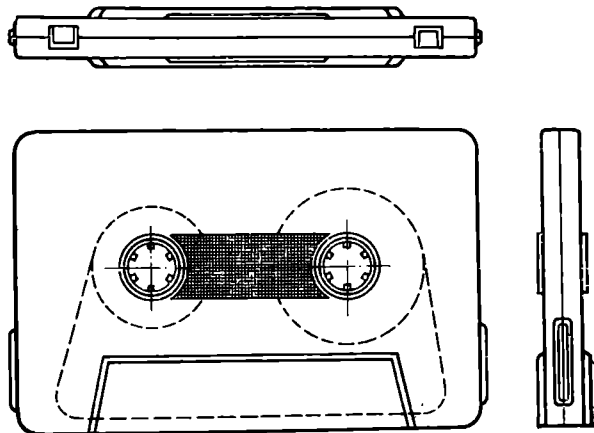


Рис. 10.30. Кассета для магнитной ленты

лы, однако слишком малое натяжение также недопустимо, так как при этом ухудшается контакт ленты с магнитными головками, увеличиваются волновые потери и спад амплитудно-частотной характеристики на высоких частотах. Нормальное контактное давление ленты на сердечник головки 8 кПа. Для создания контакта лента или прижимается к голове упругой подушкой, расположенной со стороны основы, или под тормаживается подающим узлом лентопотяжного механизма так, что около головки она натянута с силой P . В этом случае давление

$$p = \frac{P}{\rho b},$$

где ρ — радиус закругления поверхности головки; b — ширина зоны контакта ленты с поверхностью головки.

Пример. Лента по всей ширине (6,25 мм) соприкасается с поверхностью головки, имеющей радиус закругления $\rho = 10$ мм. Определим необходимое натяжение ленты: $P = \rho r b = 8000 \cdot 10^{-2} \cdot 6,25 \cdot 10^{-3} \approx 0,5$ Н.

При использовании ленты надо внимательно следить за тем, чтобы края ее не деформировались в местах контакта с направляющими. Намотка в рулон должна быть достаточно плотной и не ребристой.

Катушку или сердечник с рулоном ленты надо хранить в полиэтиленовом мешке и картонной коробке, устанавливая последние вертикально на полках. Надо оберегать ленту от сырости, прямого воздействия солнечного света и сильного нагрева от отопительных приборов. Ленты с записью необходимо, кроме того, держать вдали от источников сильных магнитных полей (силовые трансформаторы, магниты микрофонов и громкоговорителей и др.). Долго хранящуюся ленту полезно перед использованием перемотать и очистить ее рабочий слой от пыли, например, прижимая к ней фильтровальную бумагу. При правильной эксплуатации ленты на полиэтилентерефталатной основе и записи на них могут сохраняться без заметных изменений качества в течение 20—25 лет.

При монтаже фонограмм, а также при обрыве магнитные ленты необходимо соединять между собой. Ленты на диэтилцеллюлозной и триэтилцеллю-

лосной основе соединяются специальным клеем, ленты на полиэтилентерефталатной основе не склеиваются, соединяются с помощью особой липкой ленты, в частности типа ЛТ-40 производства Шосткинского химкомбината. Для склейки ленты обрезаются под углом 45° и накладываются друг на друга на участке 1 см. Липкой лентой магнитные ленты соединяются встык. Необходимо следить, чтобы стык был плотным, без зазора, а липкая лента нигде не выступала за пределы магнитной ленты.

10.7. ПРОЕКТИРОВАНИЕ АППАРАТНОЙ ЗВУКОЗАПИСИ

В настоящее время первичная запись звука производится почти всегда на магнитную ленту. Механическая и фотографическая звукозапись получается в дальнейшем как результат перезаписи с магнитной ленты. Поэтому, говоря об аппаратных звукозаписи, будем иметь в виду аппаратные магнитной звукозаписи.

Аппаратные звукозаписи профессионального назначения строятся или при специальных студиях, или в зданиях театров и концертных залов, используемых для звукозаписи. Желательно, чтобы студия (зал) и аппаратная примыкали друг к другу. В этом случае в разделяющей их стенке делают звуконепроницаемое застекленное окно так, чтобы из аппаратной можно было видеть исполнителей. Когда аппаратная оборудуется в давно построенном театре или в концертном зале, такое расположение не всегда возможно, тогда используют средства телевизионного контроля. Совершенно обязательна громкоговорящая двусторонняя связь между аппаратной и студией. Для этого предусматривается отдельный канал усиления с микрофоном в аппаратной и громкоговорителем в студии, через который звукорежиссер может передать сообщения в студию. Ответ получается через основной звуковой канал.

Помещение аппаратной должно быть выбрано с учетом ее оборудования и необходимости обеспечить высокое качество громкоговорящего контроля записи. В аппаратной размещают: микшерный пульт, два (минимум) студийных магнитофона, один или два (при стереофонии) громкоговорящих агрегата со своими усилителями, силовой щиток, щиток для коммутации низкочастотных (главным образом, микрофонных) цепей, небольшой столик и стул для оператора, управляющего магнитофонами, поворотное кресло для звукорежиссера около микшерного пульта и дополнительное место для трех-четырех человек, которые обычно принимают участие в прослушивании записи. Аппаратная должна располагаться вдали от источников сильных магнитных полей (мощных трансформаторов и электродвигателей), быть оборудована бесшумной вентиляцией и электроосветительной арматурой (лампы «дневного света» нежелательны, так как часто они создают значительные акустические и электрические помехи) и иметь средства противопожарной защиты.

Особое внимание следует обращать на качество контрольного звуковоспроизведения в аппаратной, так как этим определяются достоверность и справедливость оценки произведенной записи. Качество зависит от громкоговорящих агрегатов, акустических свойств аппаратной и условий прослушивания.

Звукоизоляция аппаратной должна обеспечить уровень шума, не превышающий 30 дБ·А при максимальной громкости звука в студии и выключенной аппаратуре. Наиболее уязвимые места, через которые шум проникает в аппаратную, — окна (особенно окно в студию), двери и вентиляционный канал. Способы звукоизоляции рассмотрены в § 8.3.

По своим акустическим качествам аппаратная звукозаписи может быть приравнена к стандартным помещениям для прослушивания. Согласно рекомендации ОИРТ такие помещения должны иметь площадь около 40 м² при высоте 3,5—4 м и время реверберации 0,3—0,4 с в полосе 125—6400 Гц. Способы акустической обработки поверхности аппаратной аналогичны рассмотренным в § 8.2.

Громкоговорящие агрегаты, используемые в аппаратных, должны иметь следующие примерные качественные показатели: электрическая мощность — до

100 Вт, номинальное входное напряжение 0,775 В, диапазон частот 40—16 000 Гц, неравномерность амплитудно-частотной характеристики 10 дБ, коэффициент нелинейных искажений 3%. Близкие к этим показатели имеет широко используемый агрегат НЕС-12 производства ВНР.

Так как тембр звука зависит от громкости прослушивания, усиление громкоговорящих агрегатов устанавливается постоянным так, чтобы при средних частотах и при номинальном напряжении на входе звуковое давление, измеренное на оси симметрии, проведенной посередине между агрегатами на расстоянии $3 \pm 0,5$ м, равнялось 90 ± 2 дБ (измеряется при шумовом сигнале). Оптимальное расположение слушателей по отношению к громкоговорящим агрегатам (при стереофонии) показано на рис. 10.31. Оно должно быть учтено при планировке и размещении аппаратуры в аппаратной.

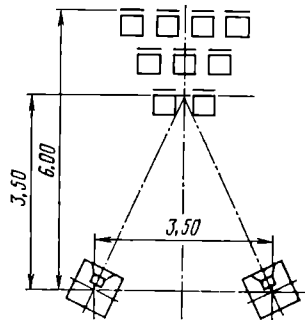


Рис. 10.31. Зона слушания

В заключение рассмотрим примерную структурную схему аппаратной для двухканальной стереофонической звукозаписи (рис. 10.32). В студии к микрофонному щитку могут быть подключены три правых ($M_{П1}$) и три левых ($M_{Л1}$) микрофона. Сигналы от микрофонов через соединительные линии и микрофонный щиток аппаратной передаются на микрофонные входы микшерного пульта, далее на микрофонные усилители МУ, индивидуальные регуляторы ИР и частотные корректоры К. Усиленные и скорректированные сигналы всех правых и всех левых микрофонов объединяются в групповых регуляторах ГР и через линейные усилители ЛУ поступают на выходы пульта. Ручки регуляторов ГР могут быть механически соединены. С выходами пульта соединены входы обоих магнитофонов. Выходы одного из магнитофонов (по выбору) подаются обратно на пульт для сравнительного контроля записи. Переключатель контроля Π_1 позволяет одновременно переключать измерительные приборы (индикаторы уровня И и гониометр Г, по которому контролируют синхронность низкочастотных составляющих звукового сигнала) и оба громкоговорящих агрегата то на вход, то на вы

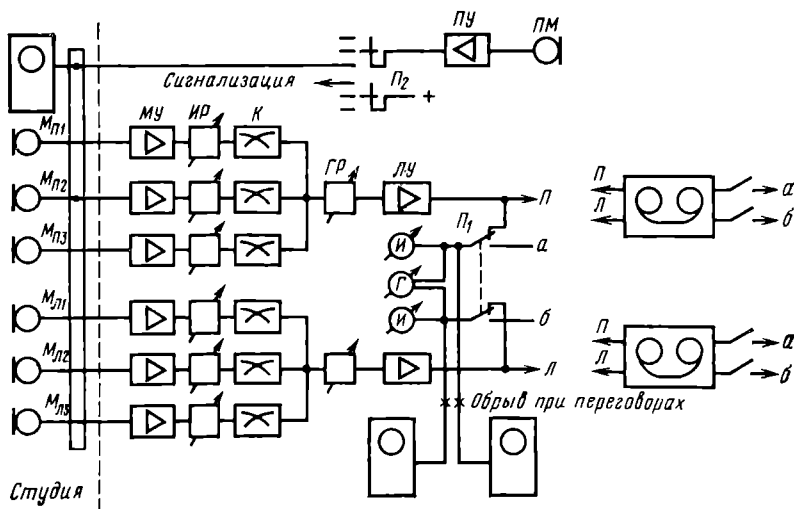


Рис. 10.32. Структурная схема аппаратной звукозаписи

код магнитофона, т. е. сравнивать сигналы до и после записи. Переключатель P_2 имеет три положения. Среднее положение соответствует репетиционной работе и подготовке аппаратуры; в нижнем — включается переговорный канал (переговорный микрофон $ПМ$, переговорный усилитель $ПУ$ и громкоговорящий агрегат, расположенный в студии). Одновременно во избежание акустической обратной связи размыкаются входные цепи громкоговорящих агрегатов в аппаратной. Верхнее положение переключателя P_2 — «Запись». Оно отличается от среднего тем, что через отдельные контакты и реле (на схеме не показаны) в студии, аппаратной и примыкающих к студии коридорах и помещениях включаются световые табло «Микрофон включен», означающие требование соблюдать везде, кроме студии, тишину.

Рассмотренная схема содержит лишь основные функциональные цепи. Кроме них, в конкретных аппаратных могут быть предусмотрены и некоторые дополнительные. Так, например, суммарный сигнал правого и левого каналов может подаваться на громкоговорящий агрегат в студию для прослушивания, имеющего в основном иллюстративный характер. Тот же суммарный сигнал может выборочно, во время записи, или полностью, после записи, прослушиваться через запараллеленные громкоговорящие агрегаты в аппаратной с целью контроля за совместимостью, т. е. определения возможности полноценного монофонического звуковоспроизведения.

В аппаратной может быть также установлен аппарат внутренней телефонной сети с оптическим вызовом.

Электрический монтаж аппаратной звукозаписи производится в соответствии с нормами для внутренних электропроводок промышленных предприятий. Все низкочастотные цепи прокладываются экранированным кабелем, микрофонные — специальным микрофонным кабелем.

10.8. ТЕХНОЛОГИЯ МАГНИТНОЙ ЗВУКОЗАПИСИ

Технология профессиональной звукозаписи в наиболее полном виде содержит следующие технологические этапы: 1) подготовку к записи и немикрофонные репетиции, включая прослушивание и отбор солистов, разработку мизансцен для литературно-драматических записей и т. п. (этот этап чаще всего проводится вне студии, но желательно участие в нем звукорежиссера); 2) микрофонные репетиции и запись отдельных вариантов; 3) прослушивание вариантов записи и монтаж оригинала фонограммы.

Необходимость всех трех этапов, а также затраты времени на них определяются содержанием и назначением записи. Запись большого художественного произведения, рассчитанная на длительное хранение и пользование, требует иногда нескольких месяцев работы. В то же время необходимы и оперативные записи, в том числе записи одного исполнителя. Эти записи не похожи друг на друга, но в той или иной мере сохраняют хотя бы элементы вышеперечисленных трех этапов.

Для рационального использования студии работы третьего этапа целесообразно проводить не в аппаратной при студии, а в отдельном аналогичном помещении, с тем же оборудованием, кроме микшерного пульта.

Кроме записей, полностью осуществленных вновь, иногда требуется изготовление «записей-монтажей», сочетающих новые записи с копиями старых записей. Такие комбинированные фонограммы изготавливают путем перезаписи. Для этого на нескольких магнитофонах устанавливают фонограммы-оригиналы, сигналы которых необходимо смешать в требуемой последовательности и в требуемой пропорции. Выход каждого магнитофона соединен с регулятором микшерного пульта, часто объединенным с выключателем движения ленты данного магнитофона. Звукорежиссер, вводя один за другим регуляторы, перезаписывает сигналы в общую фонограмму, имея одновременно возможность корректировать их. Таким путем можно изготовить несколько вариантов общей фонограммы, из которых затем выбирается лучшая.

В тех же случаях, когда в общую фонограмму необходимо свести большое количество новых и старых записей, сначала тем же способом изготавливают две-три промежуточные фонограммы, которые затем перезаписывают в общую фонограмму. Выбирая технологический процесс, не следует чрезмерно увеличивать число последовательных перезаписей, так как с каждой перезаписью качество звука ухудшается. Ориентировочно можно считать, что все помехи и шумы, нелинейные искажения и коэффициент детонации увеличиваются в последующей копии на 3 дБ, т. е. в $\sqrt{2}$ раза. Кроме того, возрастают частотные и фазовые искажения (последние существенны при стереофонии).

Считается нормой при профессиональной звукозаписи использовать для воспроизведения не более чем вторую копию оригинала.

В последние годы при изготовлении оригинала фонограммы все чаще применяется запись отдельных исполнителей или групп исполнителей на отдельных дорожках магнитной ленты. Для этого используют специальные многодорожечные магнитофоны, имеющие несколько десятков отдельных каналов записи-воспроизведения с таким же количеством дорожек записи на магнитной ленте шириной 25,4 или 50,8 мм.

При записи отдельные исполнители акустически изолируются специальными щитами друг от друга, что позволяет записывать их отдельно. Кроме того, возможна и последовательная запись: в этом случае исполнителю дают возможность слушать сигнал, воспроизведенный с ранее записанных дорожек, для того, чтобы он мог свое исполнение синхронизировать со звучанием всего ансамбля.

Когда записи на всех дорожках закончены, звукорежиссер перезаписывает их в общую фонограмму на ленте обычной (6,25 мм) ширины. Преимущество данной технологии заключается в том, что становится возможной индивидуальная обработка звучания отдельного исполнителя, не затрагивающая звучания всего ансамбля. Например, очень красивое звучание приобретает скрипка, если в канал ее воспроизведения (только в этот канал) ввести искусственную реверберацию. Кроме того, неудавшаяся запись одного исполнителя может быть повторена без необходимости участия всего ансамбля.

Раздел 11

ПЕРЕДАЧА АКУСТИЧЕСКИХ СИГНАЛОВ

11.1. ОПРЕДЕЛЕНИЯ

В результате преобразования первичного акустического сигнала в трактах передачи на их выходе создается вторичный акустический сигнал. В идеальном случае вторичный акустический сигнал должен точно воспроизводить первичный, но практически (с учетом свойств слуха) этого обычно не требуется. В технике художественного вещания, звукового сопровождения, телевидения, звукозаписи и т. п. надо стремиться к этому соответствию в пределах, в которых слуховое ощущение у слушателей близко к ощущению при непосредственном слушании данной программы в хороших акустических условиях. Для информационных программ и речевой связи определяющим является требование понятности речи. Только после его выполнения необходимо стремиться к более точному соответствию между вторичным и первичным сигналами в пределах, в которых качество звучания на слух удовлетворяет другим требованиям для данных условий. Во всех случаях существенную роль играет экономика.

Нарушение точности передачи подразделяют на следующие виды: 1) потеря акустической перспективы; 2) смещение среднего уровня сигнала; 3) ограничение частотного и динамического диапазонов; 4) линейные, нелинейные и переходные искажения; 5) маскировка шумами и помехами.

Потеря акустической перспективы получается при передаче акустических сигналов по одноканальным системам независимо от числа микрофонов в месте нахождения первичного источника звука и громкоговорителей в месте нахождения слушателей. Этот дефект до некоторой степени ослабляют применением многоканальных систем передачи, например стереофонической и квадрафонической системами передачи (см. разд. 10).

Смещение уровней получается из-за того, что слушателю не сообщается величина среднего уровня первичного акустического сигнала. Поэтому слушатели устанавливают средний уровень по своему усмотрению. А так как в устройствах обработки сигналов этот уровень непрерывно изменяется, то, как правило, практически невозможно точно восстановить средний уровень, равный среднему уровню первичного акустического сигнала. К тому же по условиям звукоизоляции не всегда и допустимо устанавливать такой уровень у слушателя. В результате смещения средних уровней происходит изменение соотношения между громкостями низкочастотных и среднечастотных составляющих: повышение среднего уровня приводит к повышению громкости низкочастотных составляющих, понижение среднего уровня — к понижению громкости этих составляющих по сравнению с громкостью среднечастотных составляющих (см. § 2.3в).

Тракт передачи сигналов в силу ряда технических и экономических причин ограничивает частотный диапазон сигнала. *Ограничение динамического диапазона* сигнала обычно определяется: сверху — появлением перегрузки отдельных звеньев тракта передачи сигналов или возникновением недопустимых нелинейных искажений, снизу — наличием шумов и помех в этом тракте. Чтобы избежать ограничения динамического диапазона сигнала, применяют сжатие его диапазона по возможности до пределов динамического диапазона тракта передачи. Динамический диапазон сигнала в ряде случаев может быть восстановлен на приемном конце тракта, но это усложняет приемную аппаратуру, а иногда это и невозможно (например, при амплитудном ограничении). Для расширения частотного диапазона применяют частотную коррекцию на низких и высоких частотах передаваемого диапазона (см. § 11.6).

Искажения и маскировка шумами будут рассмотрены в отдельных параграфах.

11.2. ИСКАЖЕНИЯ СИГНАЛОВ

Линейные искажения

К линейным искажениям акустического сигнала относятся нежелательные¹ изменения соотношений между амплитудами частотных составляющих сигнала при передаче его по тракту [изменения фазовых соотношений не играют роли в восприятии акустического сигнала (см. § 2.4)]. Эти искажения называют частотно-амплитудными или просто частотными.

Одним из показателей тракта передачи сигнала является коэффициент передачи. Под ним подразумевают отношение звуковых давлений на выходе и входе тракта при передаче по нему синусоидального сигнала, т. е. $K = p_r/p_m$, где p_m — звуковое давление в точке звукового поля, в которой будет находиться центр микрофона; p_r — звуковое давление на расстоянии 1 м от акустического (рабочего) центра громкоговорителя (для громкоговорящего приема) или в камере искусственного уха (для телефонного приема). Коэффициент передачи тракта $K = K_m K_g K_r$, где K_m — чувствительность микрофона, В/Па; K_g — коэффициент усиления электрической части тракта; K_r — чувствительность громкоговорителя или телефона, Па/В.

¹ Иногда для создания того или иного звукового эффекта сигнал специально «деформируют» (искажают) (см. § 11.6).

Если коэффициент передачи тракта выражают в децибелах, то $K_{дБ} = 20 \lg K = K_{м дБ} + K_{а дБ} + K_{г дБ}$, где $K_{м дБ} = 20 \lg K_m$; $K_{а дБ} = 20 \lg K_a$ и $K_{г дБ} = 20 \lg K_r$. В идеальном случае коэффициент передачи K не должен зависеть от частоты. Практически же он всегда зависит от частоты, т. е. $K = f(\omega)$. В ряде случаев, например при передаче информационной речи или в телефонной связи, коэффициент передачи тракта необходимо брать зависящим от частоты (см. ниже). Обычно это осуществляют в микрофонах, а в электрической части тракта коэффициент передачи стремятся брать независимым от частоты в пределах передаваемого частотного диапазона.

Отклонение частотной характеристики коэффициента передачи от оптимальной, называемое неравномерностью частотной характеристики тракта, субъективно вызывает ощущение изменения тембра сигнала. При подчеркивании высокочастотных составляющих сигнал становится звонким, резким, а при значительном подчеркивании сигнал становится свистящим и хриплым. При недостатке высокочастотных составляющих сигнал становится глухим. Подчеркивание низкочастотных составляющих делает сигнал бубнящим и т. п.

Неравномерность частотной характеристики тракта для передачи художественных программ оценивают отношением величин максимального и минимального коэффициентов передачи в заданном диапазоне частот: $M = K_{макс} / K_{мин}$. Эту неравномерность обычно выражают в децибелах: $\Delta L = 20 \lg M = L_{макс} - L_{мин}$, где $L_{мин}$ и $L_{макс}$ — минимальный и максимальный уровни вторичного акустического сигнала при постоянстве уровня первичного. Уровень вторичного акустического сигнала $L_{вмх} = 20 \lg p_1 + 94$, где p_1 — звуковое давле-

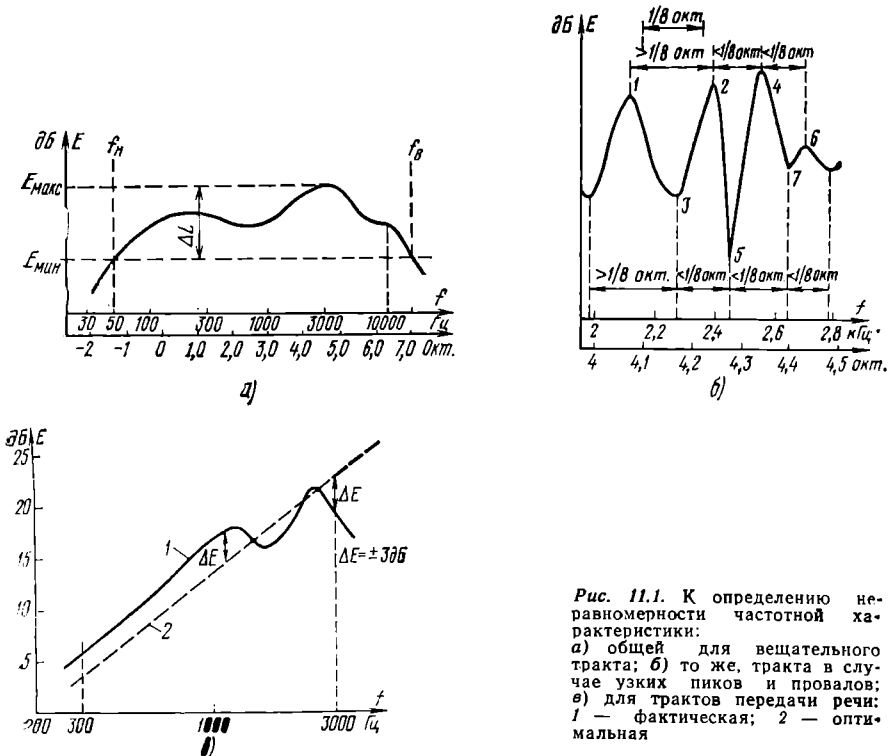


Рис. 11.1. К определению неравномерности частотной характеристики:
а) общий для вещательного тракта; б) то же, тракта в случае узких пиков и провалов; в) для трактов передачи речи: 1 — фактическая; 2 — оптимальная

ние (в паскалях) на расстоянии 1 м от акустического центра громкоговорителя, а для телефона — в камере искусственного уха.

Для иллюстрации на рис. 11.1а показано определение неравномерности частотной характеристики электрического тракта. Если в заданном частотном диапазоне 50—10 000 Гц максимальное и минимальное значения коэффициента передачи соответственно равны 20 и 5, то неравномерность составит $M = 20/5 = 4$ или (в децибелах) $\Delta L = 20 \lg 4 = 12$ дБ (например, если максимальный выходной уровень равен 106 дБ, то минимальный будет 94 дБ). Если частотная характеристика тракта очень изрезана, то согласно [12.2; 12.3] при определении неравномерности должны быть исключены все пики и провалы в частотной характеристике, ширина которых не превышает 1/8 октавы. Это показано на рис. 11.1б (исключены пики 2, 4 и 6 и провалы 5 и 7).

Неравномерность частотной характеристики для информационных программ и для речевой связи определяют относительно оптимальной частотной характеристики для передачи речи. Такой характеристикой согласно международным стандартам принята характеристика с подъемом 6 дБ/октава в сторону высоких частот в диапазоне 300—3400 Гц и равномерная в диапазонах 100—300 и 3400—5000 Гц¹. На рис. 11.1в для иллюстрации приведены фактическая и оптимальная характеристики и показано определение неравномерности в виде отклонений фактической характеристики от оптимальной.

Частотные искажения уменьшают путем коррекции частотной характеристики тракта. По возможности это делают в звеньях тракта, соседних с искажающими.

На рис. 11.2 приведены экспериментальные результаты определения заметности ограничения частотного диапазона сверху и снизу при неравномерности частотной характеристики не более 5 дБ в испытуемой полосе. По оси ординат

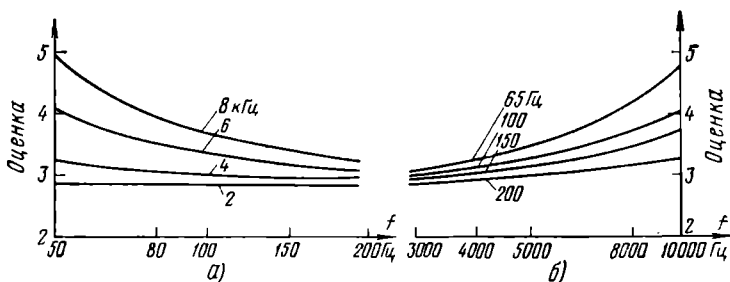


Рис. 11.2. Слышимость частотных искажений при ограничении частотного диапазона: а) сверху; б) снизу

в этих кривых отложена оценка качества звучания по 5-балльной системе. По оси абсцисс отложена граничная частота (на рис. 11.2а — нижняя граничная частота, на рис. 11.2б — верхняя). Параметром кривых служит соответственно в 11.2а верхняя граница (в килогерцах), а в 11.2б — нижняя граница (в герцах).

Отмечено, что пики по высоте и провалы по глубине, не превосходящие 4—5 дБ в области частот выше 500 Гц и 10 дБ в области низких частот, практически незаметны.

Для речевой связи предельные значения неравномерности равны 6—8 дБ по отношению к оптимальной характеристике.

¹ Для передачи художественной речи рекомендуется частотная характеристика равномерная, до 1500—2000 Гц, с подъемом 6 дБ/октава выше 2000 Гц.

Нелинейные искажения

Нелинейными искажениями называют искажения сигнала, обусловленные нелинейностью зависимости между вторичным и первичным сигналами в стационарном режиме. В результате нелинейных безынерционных искажений входного сигнала синусоидальной формы получается выходной сигнал сложной формы

$$y = A_1 \sin \omega t + A_2 \sin 2\omega t + A_3 \sin 3\omega t + \dots$$

При подаче на вход двух составляющих с некрatными частотами f_1 и f_2 получается ряд составляющих с частотами вида $f = nf_1 \pm mf_2$, где n и m — любые целые числа. Частоты этих составляющих называют комбинационными частотами. В их число входят и гармоники обеих частот. Для кратных исходных частот все комбинационные частоты совпадают с их гармониками. При подаче более сложного сигнала спектр выходного сигнала становится еще более сложным, а при подаче звуков со сплошным спектром получается также сплошной спектр, но с измененной формой огибающей спектра.

Величину нелинейных искажений принято оценивать коэффициентом нелинейных искажений, представляющим отношение действующего значения напряжения или звукового давления всех составляющих выходного сигнала, отсутствующих во входном сигнале, к действующему значению напряжения или звукового давления всех составляющих выходного сигнала, входящих во входной сигнал. Если входной сигнал синусоидальный, то коэффициент нелинейных искажений называют коэффициентом гармонических искажений. Он представляет собой отношение действующего значения всех гармоник выходного сигнала, начиная со второй, к действующему значению первой гармоники выходного сигнала (иногда к действующему значению всего выходного сигнала).

Если нелинейность элемента тракта на высоких частотах более значительна, чем на низких, то пользуются методом интермодуляционных искажений. В этом случае к тракту подводят два синусоидальных сигнала с разными частотами (см. § 12.2).

Различают два типа нелинейности: степенную

$$y_1 = a_0 + a_1 x + a_2 x^2 + \dots$$

где x и y — входное и выходное мгновенные значения сигнала, и нелинейность из-за ограничения амплитуды. Последняя делится на ограничение сверху и ограничение снизу (центральное). На рис. 11.3а и б показаны эти виды ограничения. При первом виде ограничения искажаются только громкие сигналы, при втором — все сигналы, но более слабые искажаются сильнее, чем громкие.

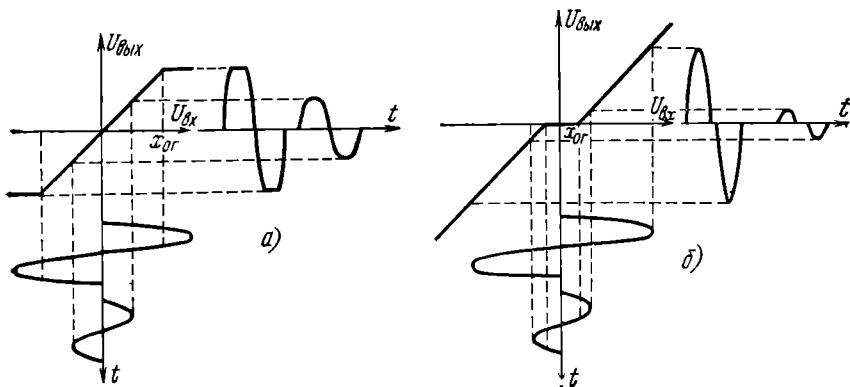


Рис. 11.3. Виды характеристик амплитудного ограничения: а) ограничение сверху; б) ограничение снизу (центральное)

Нелинейные искажения гармонического вида и суммовых комбинационных частот ощущаются как дребезжание, переходящее в хрипы при значительном искажении на высоких частотах. Нелинейные искажения в виде разностных комбинационных частот вызывают ощущение модуляции передачи. На рис. 11.4

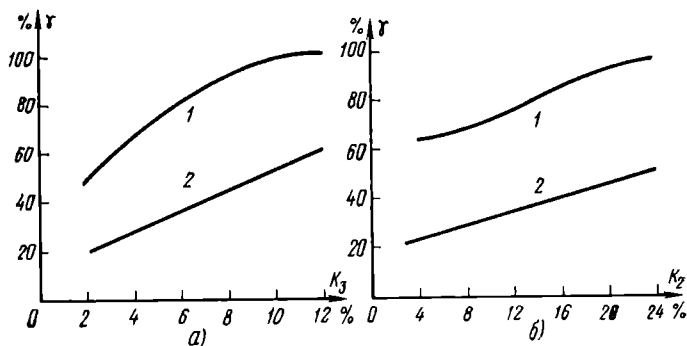


Рис. 11.4. Слышимость продуктов нелинейных искажений: а) для симметричных искажений; б) для несимметричных; 1 — для специалистов; 2 — для рядовых слушателей

приведены результаты экспериментальных исследований слышимости нелинейных искажений (в процентах лиц, заметивших искажения). Несимметричные степенные искажения (по второй гармонике K_2) менее заметны, чем симметричные (по третьей гармонике K_3). При сужении полосы частот нелинейные искажения становятся менее заметными.

Переходные и параметрические искажения

Переходными искажениями¹ называют появление «посторонних» составляющих во вторичном сигнале, обусловленных свободными колебаниями в звеньях тракта. Частоты этих колебаний могут не совпадать с частотами составляющих входного сигнала. Как и при нелинейных искажениях, появляются комбинационные частоты. Эти искажения возникают при изменении режима работы тракта, при изменении амплитуды входного сигнала, а также вследствие инерционности устройств обработки сигналов. Слуховое ощущение этих искажений сходно с ощущением нелинейных искажений.

К параметрическим искажениям относятся автопараметрический резонанс и детонация. Первый вид искажений наблюдается в громкоговорителях (см. разд. 6), второй — в системах записи звука (см. разд. 10). Автопараметрический резонанс выражается в появлении субгармоник, т. е. колебаний с частотами, кратными дробной величине частоты основного колебания. Характер этих искажений сходен со звучанием нелинейных искажений на низких частотах. Детонация сигнала выражается в изменении частоты вторичного сигнала по отношению к частоте первичного. Эти искажения прослушиваются и в виде «плавания» частоты сигнала, а при быстрых изменениях — в виде хрипов и дребезжания.

11.3. ШУМЫ И ПОМЕХИ В ТРАКТАХ СВЯЗИ

Шумы и помехи могут быть как акустического, так и электрического происхождения. Однако независимо от происхождения их действие сводится к маскировке вторичного акустического сигнала. Величина этой маскировки

¹ Не следует смешивать их с переходными помехами, т. е. с помехами, образующимися вследствие линейных и нелинейных переходов из одного канала в другой.

определяется величиной повышения порога слышимости по отношению к слушанию в тишине (см. § 2.3). Если в результате действия шумов порог слышимости получается не зависящим от времени, то такие шумы (по акустическим характеристикам) называют «гладкими». Они имеют пик-фактор, не превышающий 6 дБ. К этим шумам относятся флуктуационные шумы, шумы дробового эффекта и речевые шумы от нескольких голосов, звучащих одновременно.

Если в результате действия шумов порог слышимости изменяется во времени в зависимости от пик-фактора шума, то такие шумы называют импульсными. Кратковременные импульсы (до $\tau=150$ мс) субъективно сглаживаются, и происходит выравнивание временной зависимости порога слышимости. Импульсные шумы не только маскируют полезный сигнал, но и искажают его, создавая комбинационные частоты шума и сигнала. Получается нечто похожее на взаимную модуляцию сигнала и шума.

Шумы электрического происхождения имеют спектр, как правило, близкий к равномерному, а шумы акустического происхождения — ближе к речевому. Частотная зависимость порога слышимости для первых имеет тенденцию роста к высоким частотам. Для речевых шумов порог слышимости почти не зависит от частоты.

Индустриальные, атмосферные и станционные помехи, кроме тональных, по их действию могут быть отнесены и к импульсным, и к гладким с равномерным спектром или с низкочастотным. Кроме этих помех, приходится иногда считаться с помехами от самомаскировки речи (см. § 11.5).

11.4. ДОПУСТИМЫЕ ВЕЛИЧИНЫ ИСКАЖЕНИЙ ВЕЩАТЕЛЬНЫХ СИГНАЛОВ

Допустимые величины искажений определены из условий их заметности. Принято считать искажения заметными, если их замечают 75% слушателей. В распознавании искаженной речи большую роль играет фактор обучения человека. Если при слушании искаженной речи человек может контролировать правильность распознавания речи (например, по смыслу), то через некоторое время даже сильно искаженная речь будет распознаваться правильно (если при этом останется разница в звучании звуков речи). Особенно это имеет место

ТАБЛИЦА 11.1

Показатели качества вещательных передач

Показатель	Значение в зависимости от класса качества			
	высший	I	II	III
Частотный диапазон, Гц	30—15 000	50—10 000	100—6 000	200—4 000
Неравномерность, не более, дБ ¹	6/2	6/2	16/6	16
Максимальный коэффициент гармоник, %, на частотах, Гц:				
менее 100	5	6	—	—
100—200	1	2,5	8	
выше 200	1	2,5	3,6	7
Уровень шума относительного номинального уровня, дБ	—67	—65	—60	

¹ В числителе дана неравномерность во всем диапазоне, в знаменателе — в основном.

Примечание. В основном искажения вносят акустические звенья тракта: помещения, микрофон, излучатели.

при частотных искажениях. Ошибки распознавания получаются лишь в тех случаях, когда искажения приводят к таким изменениям звуков речи, которые изменяют смысл, или когда какое-либо слово нельзя распознать по смыслу (названия, фамилии и т. п.). Искаженную речь можно уподобить иностранной и переводить ее на свой родной язык, для чего требуется известная тренировка. Человек, знающий азбуку Морзе, при слушании воспринимает ее как речь.

Установлены классы качества трактов для вещательных передач художественных программ. Высший класс (градация «отлично») — искажения незаметны; первый класс (градация «хорошо») — искажения заметны только для профессионалов и то в отсутствие шумов и помех; второй класс (градация «удовлетворительно») — искажения заметны для всех, но они не портят впечатления при передаче художественной программы; третий — искажения находятся на предельно допустимом уровне, и такой тракт допускается в исключительных случаях. В табл. 11.1 приведены рекомендации [11.2], разработанные на основе допустимых искажений для вещательных трактов. Показатели качества даны для частотного диапазона, допустимой неравномерности тракта, нелинейных искажений. Неравномерность частотной характеристики дана для полного частотного диапазона каждого класса и для основного (200—4000 Гц). Коэффициенты нелинейных искажений даны для различных участков частотного диапазона пикового (номинального) входного уровня.

11.5. ПОНЯТНОСТЬ И РАЗБОРЧИВОСТЬ РЕЧИ

Понятность речи¹ является качественной характеристикой тракта. Для ее непосредственного определения есть только один метод: статистический с участием большого количества операторов (слушателей и дикторов). Разработан косвенный, количественный метод определения понятности речи через ее разборчивость.

Разборчивостью речи называют относительное или процентное количество принятых специально тренированными слушателями (артикулянтами) элементов речи из общего количества переданных по тракту (см. [11.1]). В качестве элементов речи применяют слоги, звуки, слова, фразы (команды), цифры. Соответственно этому есть слоговая, звуковая, словесная, смысловая и цифровая разборчивость. В практике используют преимущественно слоговую, звуковую и словесную разборчивость. На рис. 11.5 приведены статистические зависимости между слоговой S , словесной W и звуковой D разборчивостью для обычных телефонных переговоров на русском языке. В табл. 11.2 приведены градации

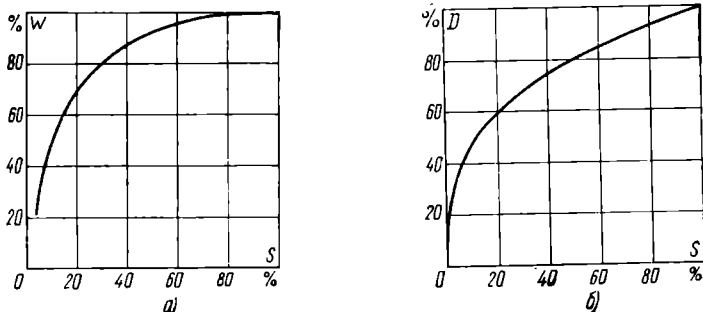


Рис. 11.5. Зависимости:
а) между словесной W и слоговой S разборчивостью речи; б) между звуковой D и слоговой S разборчивостью речи

¹ Подробнее изложено в [11.1 и 11.3].

понятности речи и соответствующие им величины разборчивости, измеренные артикулянтами.

ТАБЛИЦА 11.2

Разборчивость речи для различных градаций понятности передачи

Понятность	Разборчивость, %	
		словесная
Предельно допустимая	25—40	75—87
Удовлетворительная	40—50	87—93
Хорошая	50—80	93—98
Отличная	80 и выше	98 и выше

Понятность речи была определена для обычных абонентов в процессе обычных телефонных переговоров. При этом понятность считалась отличной, если переговоры велись без переспросов; хорошей, если были отдельные переспросы редко встречающихся слов или неизвестных фамилий, названий и т. п., о которых нельзя догадаться по смыслу; удовлетворительной, если требовались частые переспросы и слушатели сообщали, что трудно разговаривать; предельно допустимой, если требовались неоднократные переспросы одного и того же материала в передаче отдельных слов по буквам и с полным напряжением слушателей. В табл. 11.3 даны допустимые величины искажений для трактов речевой связи и информационных трактов.

ТАБЛИЦА 11.3

Нормы на показатели качества трактов речевых информационных передач

Показатель качества	Нормы на показатели для градаций качества			
	отлично	хорошо	удовлетворительно	предельно допустимо
Частотный диапазон, Гц	70—10 000	100—6 000	300—3 400	400—2 500
Неравномерность, дБ (по отношению к тенденции 6 дБ/окт.)	4	4	4	4
Коэффициент гармоник, %, в основной полосе	3	4	6	—

Формантный метод расчета разборчивости речи

Форманты звуков речи заполняют весь частотный диапазон от 150 до 7000 Гц. Этот частотный диапазон делят на 20 полос равной разборчивости. В табл. 11.4 приведены границы таких полос для русского языка. Там же приведены и средние значения частоты для этих полос. Вероятность появления формант в каждой полосе равной разборчивости равна 0,05. При слушании речи в условиях шумов и помех разборчивость получается меньшей, чем в их отсутствие. Коэффициент, определяющий это уменьшение, называют коэффициентом восприятия или коэффициентом разборчивости ω , т. е. в каждой полосе равной разборчивости вероятность приема формант $\Delta A = 0,05\omega$. Коэффициент разборчивости ω определяется уровнем ощущения формант $E = B_p - B_m$, где B_p — средний спектральный уровень речи; B_m — спектральный уровень шумов.

На рис. 11.6 показано распределение спектральных уровней речи, т. е. интегральная вероятность появления уровня не менее заданного в зависимости от

ТАБЛИЦА 11.4

Вспомогательные данные для расчета разборчивости речи

а) По полосам равной разборчивости

№ полосы	Границы полос равной раз- борчивости	Шири- на по- лосы Δf_p	Сред- няя частота f_p	Спектральные уровни, дБ					ΔL_T , дБ
				речи B'_p	акустических шумов ¹ B_a				
					1	2	3	4	
Гц									
1	200—330	130	265	45,5	39,0	27,0	47,0	50,0	1,0
2	330—465	135	400	44,5	38,0	27,5	44,5	48,0	1,4
3	465—605	140	535	41,5	35,5	28,0	42,5	46,0	1,75
4	605—750	145	680	39,0	33,0	25,0	40,5	44,0	2,1
5	750—900	150	825	36,5	30,5	22,0	38,5	42,0	2,35
6	900—1060	160	980	34,0	28,0	19,0	36,5	41,0	2,6
7	1060—1230	170	1145	32,0	25,0	16,0	34,5	40,0	2,85
8	1230—1410	180	1320	30,0	23,0	13,0	32,5	39,0	3,1
9	1410—1600	190	1505	28,5	21,0	11,0	30,5	38,0	3,4
10	1600—1800	200	1700	27,0	20,0	9,0	28,5	37,0	3,7
11	1800—2020	220	1910	26,0	19,0	7,0	26,5	36,0	4,0
12	2020—2260	240	2140	25,0	18,0	6,0	24,5	35,0	4,3
13	2260—2530	270	2395	24,0	17,0	5,0	23,0	34,0	4,5
14	2530—2840	310	2685	22,0	16,0	4,0	21,5	33,0	4,7
15	2840—3200	360	3020	21,0	15,0	3,0	20,0	32,0	4,9
16	3200—3630	430	3415	20,0	14,0	2,0	17,5	31,5	5,1
17	3630—4150	520	3890	19,0	13,0	1,0	15,0	31,0	5,3
18	4150—4790	640	4370	18,0	11,0	0,0	12,0	30,5	5,5
19	4790—5640	850	5215	17,0	9,0	—2,0	9,0	30,0	5,7
20	5640—7000	1360	6320	15,5	7,0	—4,0	5,0	29,0	5,9

Суммарный уровень, дБ

71,0* 65,0 55,0 73,0 77,0

б) По октавным полосам

№ октавы	Границы октавы	Шири- на по- лосы $\Delta f_{\text{окт}}$	Сред- няя частота $f_{\text{ср}}$	Спектральные уровни, дБ					ΔL_r , дБ
				речи B_p	акустических шумов ¹ B_a				
					1	2	3	4	
Гц									
1	175—350	250	175	45,5	39,0	27,0	47,0	50,0	1,0
2	350—700	500	350	41,5	35,0	28,0	42,5	46,0	1,8
3	700—1400	1000	700	33,5	18,5	22,0	35,5	40,5	2,7
4	1400—2800	2000	1400	25,5	10,5	11,5	25,5	35,5	4,2
5	2800—5600	4000	2800	18,5	4,5	6,0	13,0	31,0	5,4
6	5600—7000	6000	2000	15,5	—1,0	1,0	5,0	22,0	5,9

* На расстоянии 1 м от рта.

¹ Акустические шумы: 1—речевые в большом помещении; 2—речевые в комнате; 3—футбол на стадионе; 4—производственные; ΔL_r —поправка на дифракцию около головы.

разности между величинами среднего спектрального уровня речи, определенно-го за длительный интервал времени, и заданного уровня (кривая 1). Эта ве-роятность практически совпадает с вероятностью распределения формант. За-метим, что это распределение почти не зависит от частоты.

Коэффициент разборчивости w для гладких шумов¹ может быть определен с помощью рис. 11.6 и табл. 11.5. Для примера на этом рисунке показаны уровень ощущения E_k (равный разности спектральных уровней речи B_p и шу-мов $B_{ш}$) и соответствующий ему коэффициент разборчивости w_k .

¹ Для импульсных шумов вводят соответствующие поправки, приведенные в [11.3].

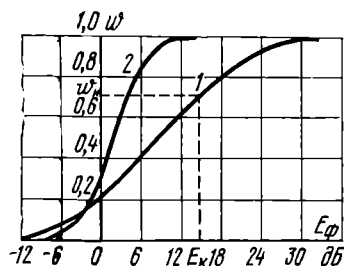


Рис. 11.6. Зависимость коэффициента разборчивости речи от уровня ощущения ее формант:
1 — для обычной речи; 2 — для предельно ограниченной по амплитуде

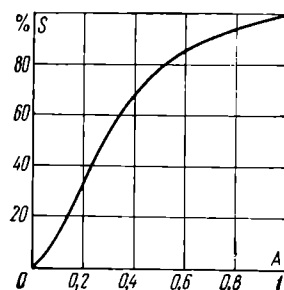


Рис. 11.7. Зависимость между слоговой S и формантной A разборчивостью

Для уровней ощущения, лежащих в пределах 0—18 дБ, коэффициент разборчивости может быть определен по приближенной формуле $\omega = (E - 6)/30$.

ТАБЛИЦА 11.5

Зависимость коэффициента разборчивости от уровня ощущения формант

E_{ϕ} , дБ	ω , отн. ед.	E_{ϕ} , дБ	ω , отн. ед.	E_{ϕ} , дБ	ω , отн. ед.
-12	0,01	-1	0,17	22	0,90
-11	0,015	0	0,20	23	0,915
-10	0,02	3	0,30	24	0,93
-9	0,03	6	0,40	25	0,945
-8	0,04	9	0,50	26	0,96
-7	0,05	12	0,60	27	0,97
-6	0,06	15	0,70	28	0,98
-5	0,075	18	0,80	29	0,985
-4	0,095	19	0,83	30	0,99
-3	0,11	20	0,86	33	0,995
-2	0,14	21	0,88	36	1,0

Для каждой полосы равной разборчивости коэффициент разборчивости в общем случае будет разный (ω_n). Поэтому суммарная вероятность приема формант, называемая разборчивостью формант,

$$A_{\phi} = \sum_{n=1}^{20} 0,05\omega_n = \frac{1}{20} \sum_{n=1}^{20} \omega_n.$$

На рис. 11.7 приведена зависимость между формантной A_{ϕ} и слоговой разборчивостью (см. рис. 11.5, а также табл. 11.6, в которых дана зависимость между слоговой S и словесной W разборчивостью речи).

Пример. Шумы создаются разговорами соседей (т. е. шум речевого типа). Разность между средним спектральным уровнем речи и спектральным уровнем шумов у слушателя равна 21 дБ. Определить понятность речи. Уровень ощущения $E = 21$ дБ. Коэффициент разборчивости $\omega = (21 - 6)/30 = 0,5$. Следовательно, формантная разборчивость $A_{\phi} = (1/20) \sum_{n=1}^{20} 0,5 = 0,5$. Эта формантная разборчивость соответствует 80% слоговой, т. е. по табл. 11.1 — отличной понятности.

ТАБЛИЦА 11.6

Зависимость слоговой и словесной разборчивости от разборчивости формант

A_{Φ} , отн. ед.	S , %	W , %	A_{Φ} , отн. ед.	S , %	W , %
0,05	5	30	0,55	84	98,5
0,10	15	63	0,60	87	98,8
0,15	26	76	0,65	90	99
0,20	36	85	0,70	92,5	99,2
0,25	46	90	0,75	95,2	99,4
0,30	54	93	0,80	96,5	99,6
0,35	62,5	94,5	0,85	98	99,7
0,40	69	96	0,90	99	99,8
0,45	75	97	0,95	99,5	99,9
0,50	80	98	1,00	100	100

Раздел 12

АКУСТИЧЕСКИЕ ИЗМЕРЕНИЯ

12.1. ИЗМЕРИТЕЛЬНАЯ АППАРАТУРА И ОБОРУДОВАНИЕ

Кроме аппаратуры общего применения (тональные генераторы, электронные вольтметры, измерители нелинейных искажений, измерители уровня, осциллографы, анализаторы гармоник, магнитофоны, измерительные усилители и т. п.) при акустических измерениях используют специальную измерительную аппаратуру. К ней относятся: тональные генераторы с воющим тоном, шумовые генераторы, измерители звукового давления, акустический зонд, шумомеры, октавные фильтры, быстроедействующие регистраторы уровня, реверберометры, искусственный рот, измерительный телефон, искусственное ухо, измерительные трубы, спектральные анализаторы, анализаторы амплитудных распределений, пистонифоны и дополнительные электроды и др.

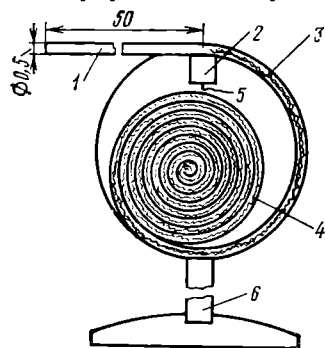


Рис. 12.1. Акустический зонд: 1 — трубка; 2 — конденсаторный микрофон; 3 — продолжение трубки; 4 — резиновая трубка, наполненная поглотителем (шерстяная нить); 5 — выход микрофона; 6 — подставка

Измерители звукового давления состоят из измерительного микрофона и соединенного с ним электронного вольтметра, градуированного в паскалях или децибелах относительно 10^{-12} Вт/м. Измерители звукового давления имеют несколько постоянных времени: для импульсных звуков, для измерений средних значений уровня звуков речи, для измерений среднего длительного значения и др.

Акустический зонд (рис. 12.1) отличается от измерителя звукового давления только приспособлением для измерений звукового давления в тех случаях, когда требуется измерить его или в небольшом замкнутом объеме, например в ушной раковине при работе телефона, или около самой поверхности какого-нибудь тела, когда размеры обычного измерительного микрофона недостаточны малы. Зонд имеет тонкую трубку длиной от 10 до 50 см, на конце трубки помещен лабиринт с поглощающим материалом, чтобы не было отражений звуковых волн от конца трубки (см. рис. 12.1). Сбоку у конца трубки расположен измерительный микрофон.

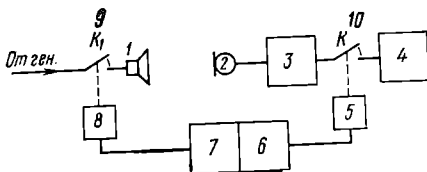
Шумомеры отличаются от измерителей звукового давления только наличием шкал A , B и C для измерения уровня громкости. Каждой шкале со-

ответствует своя частотная характеристика измерителя. Шкала *A* соответствует уровню громкости 40 фон, шкала *B* — 70 фон, шкала *C* — 85 фон и выше. Кроме того, у шумомера может быть и четвертая частотная характеристика — равномерная в широком диапазоне частот. Шумомеры обычно снабжаются полосовыми третьоктавными или октавными фильтрами с компенсацией их затухания. Измерители шумомеров имеют две — три постоянные времени: одна — для импульсных шумов, другая — для речи и третья — для измерений среднего значения.

Быстродействующие регистраторы уровня имеют равномерную шкалу в логарифмическом масштабе. Их динамический диапазон стандартизован (25—50—75 или 30—60—90 дБ). Запись ведется чернилами или резцом на крас-

Рис. 12.2. Схема реверберометра:

1 — громкоговоритель; 2 — измерительный микрофон; 3 — микрофонный усилитель; 4 — измеритель уровня; 5 — реле для включения измерителя уровня; 6 — устройство временной задержки; 7 — пусковое устройство; 8 — реле для выключения громкоговорителя; 9 и 10 — ключи



ной бумаге, покрытой тальком. Скорость записи, диапазон и постоянная времени могут изменяться скачками в некоторых пределах. Регистраторы уровня обычно подключаются к измерителям звукового давления, и поэтому на них можно автоматически записывать частотные характеристики аппаратуры, их характеристики направленности и др.

Реверберометр позволяет измерять время реверберации в помещении. Большинство из них имеет устройство временной задержки от нескольких сотых секунды до нескольких секунд и индикатор уровня, регистрирующий уровень перед выключением источника звука и через определенное время после его выключения (рис. 12.2).

Искусственный рот представляет собой громкоговоритель, имеющий выходное отверстие, соответствующее среднему отверстию рта человека при разговоре. При этом объем камеры между диафрагмой громкоговорителя и выходным отверстием равен среднему объему рта человека. В качестве гром-

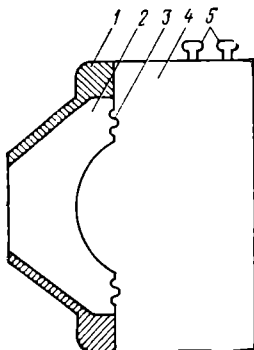


Рис. 12.3. Разрез искусственного рта:

1 — корпус рта; 2 — объем рта; 3 — диафрагма громкоговорителя; 4 — корпус головки; 5 — клеммы для подключения громкоговорителя

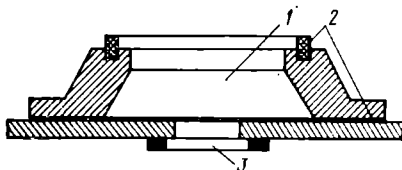


Рис. 12.4. Разрез искусственного уха:

1 — объем уха; 2 — гибкие прокладки; 3 — место для крепления микрофона

коговорителя используют головку рупорного узкогорлого громкоговорителя (рис. 12.3). Искусственный рот предназначен для измерений микрофонов ближнего действия (например, ДЭМШ, микрофон для телефонной связи и т. п.).

Искусственное ухо — устройство, состоящее из небольшой камеры, на дне которой находится измерительный конденсаторный микрофон, мембрана ко-

торого находится на уровне дна камеры (рис. 12.4). Объем камеры 6 или 2 см³ в зависимости от того, какой тип телефона должен испытываться: обычный или втулочный (вставляемый в ушную раковину). К входному отверстию камеры прижимают испытуемый телефон.

Измерительные телефоны обычно используют или для измерений порога слышимости, или для градуировки микрофонов по давлению в трубе. Для абсолютной градуировки микрофонов по давлению часто пользуются методом взаимности. Наиболее легко реализовать этот метод с помощью труб и обратимых преобразователей. Поэтому лаборатории часто оборудуют такими устройствами резонансного или антирезонансного типа. Длина труб определяется максимальной длиной волны, необходимой для градуировки микрофона, диаметр труб — минимальной длиной волны. Кроме того, акустические лаборатории оборудуют трубами для измерения коэффициентов звукопоглощения материалов. Эти трубы обычно имеют большие размеры в длину (до нескольких метров) и диаметр около 10 см (если предельная частота измерений равна 3500 Гц). Трубы оборудуют измерительным микрофоном с милливольтметром. Микрофон можно свободно перемещать по длине трубы (рис. 12.5).

Поглощающим материалом закрывают одно отверстие трубы, а в другом — помещают громкоговоритель.

Для анализа речи, музыки и шумов часто используют спектральные анализаторы с параллельным или последовательным анализом. В этих случаях в анализатор входит комплект полосовых фильтров (чаще всего третьоктавных) с переключением их автоматически или вручную. В спектральный акустический анализатор входит измеритель звукового давления с фильтрами, включенными между микрофонным усилителем и собственно измерителем.

При последовательном анализе берут один или два полосовых фильтра: широкий с полосой 300 Гц и узкий

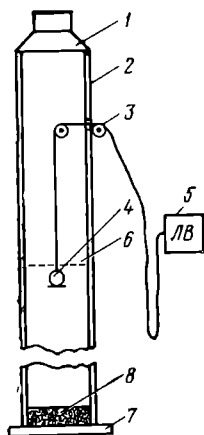


Рис. 12.5. Труба для измерения коэффициентов поглощения: 1 — громкоговоритель; 2 — труба; 3 — блок для передвижения микрофона; 4 — микрофон; 5 — измеритель звукового давления; 6 — распорки микрофона; 7 — жесткая стенка; 8 — поглощающий материал

с полосой 50 Гц. Исследуемый сигнал обычно смещен по спектру в область около 20—40 кГц и во время измерений дополнительно смещается на ширину исследуемого диапазона сигнала. При этом и происходит последовательный анализ спектра сигнала.

Анализатор амплитудных распределений уровня имеет комплект пороговых устройств с разными порогами. Счетчики, имеющиеся у каждого устройства, подсчитывают длительность нахождения уровня сигнала выше порога этого устройства. Интервалы между порогами выбирают соответственно динамическому диапазону исследуемого сигнала с тем, чтобы охватить весь динамический диапазон сигнала и получить требуемую точность анализа.

Для абсолютной градуировки конденсаторных микрофонов используют пистонфон. Он представляет собой поршень, приводимый в движение головкой громкоговорителя и создающий в замкнутом объеме переменное давление. Одна из сторон этого объема является диафрагмой конденсаторного микрофона. Амплитуду колебаний поршня измеряют оптическим микрометром. Боковые стенки, заключающие объем, берутся массивными.

Для тех же целей используют дополнительный электрод. Его устанавливают параллельно мембране конденсаторного микрофона на небольшом расстоянии от нее. Между электродом и мембраной подают поляризующее и переменное напряжения. Зная расстояние между электродом и мембраной, а также величины напряжений, можно вычислить чувствительность микрофона (см.

§ 5.4). Дополнительный электрод делают перфорированным, чтобы не создавать дополнительной упругости для мембраны.

Наконец, следует сказать о комплекте универсальной измерительной акустической аппаратуры. В нее входят почти все перечисленные выше приборы с некоторыми вспомогательными приспособлениями. Этот комплект аппаратуры позволяет снимать все виды характеристик электроакустической аппаратуры (частотные, амплитудные, направленности, временные), проводить анализ акустических сигналов и шумов и записывать временные процессы в помещениях и т. д.

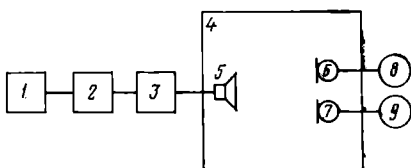
12.2. МЕТОДЫ ИЗМЕРЕНИЙ ОСНОВНЫХ ХАРАКТЕРИСТИК АППАРАТУРЫ И ПОМЕЩЕНИЙ¹

Общие замечания. Все частотные характеристики снимают (или соответствующие параметры измеряют) при плавном изменении частоты или на частотах предпочтительного ряда. В отдельных случаях параметры измеряют на частотах с неравномерным рядом (см. § 2.2). Во всех случаях измерений на дискретных частотах необходимо отмечать места максимумов и минимумов и на них измерять значения параметров. Все характеристики направленности измеряют или при плавном изменении углов расположения осей испытуемой аппаратуры, или для углов, кратных 15° , на частотах до 5000 Гц, и кратных 5° — выше этой частоты.

Для частотных характеристик и характеристик направленности используют бланки, приведенные в приложении 3.

Измерение характеристик микрофона в заглушенной камере (в свободном поле). Для измерений чувствительности микрофона в свободном поле следовало бы сначала измерить звуковое давление в точке, куда будет помещен испытуемый микрофон, а потом уже помешать его в эту точку. Но так как в камере практически отсутствует интерференция и расстояние микрофона от громкоговорителя берут равным 1—1,5 м при диаметре излучателя не более 25 см, то измерительный микрофон 7 (рис. 12.6) можно располагать поблизо-

Рис. 12.6. Схема измерения чувствительности микрофона:



1 — генератор тональный или белого шума; 2 — фильтр трехполосный; 3 — мощный усилитель; 4 — заглушенная камера; 5 — громкоговоритель; 6 — испытуемый микрофон; 7 — измерительный микрофон; 8 — милливольтметр; 9 — милливольтметр, градуированный в паскалях или в децибелах

сти от испытуемого микрофона. Устанавливая по измерителю звукового давления 7 необходимую величину давления p , измеряют напряжение U_m , развиваемое испытуемым микрофоном, и определяют осевую чувствительность микрофона $E_{ос} = U_m/p$. При автоматической регулировке звукового давления, как известно, частотную характеристику снимают путем плавного изменения частоты генератора. Чувствительность определяют во всем номинальном диапазоне частот. По полученной частотной характеристике определяют неравномерность ее в номинальном и рабочем диапазонах частот (см. § 11.2 и рис. 11.1а, б, г). Среднюю чувствительность определяют в милливольтках на паскаль по формуле

$$E_{ср} = \sqrt{\sum_{k=1}^n E_k^2 / n},$$

¹ Подробно о методах акустических измерений см. в [2].

где E_k — чувствительность, определенная на частотах предпочтительного ряда, входящих в номинальный диапазон частот, или в третьоктавных полосах; n — количество точек отсчета (при неравномерности менее 12 дБ допускается определять среднеарифметическое значение чувствительности по формуле

$$E_{cp} = \sum_{k=1}^n E_k/n).$$

Уровень чувствительности и средней чувствительности в децибелах вычисляют по формуле $N_m = 20 \lg (E_m \cdot 10^{-3}/E_1)$, где E_m — чувствительность, мВ/Па; E_1 — чувствительность, равная 1 мВ/Па.

Стандартный уровень чувствительности (в децибелах) определяют по формуле

$$N_0 = 20 \lg \frac{U_0|_{p=1 \text{ Па}}}{\sqrt{R_{ном} \cdot 10^{-3}}} = 20 \lg \frac{E_{oc}}{\sqrt{R_{ном} \cdot 10^{-3}}},$$

где U_0 — напряжение в вольтах, развиваемое микрофоном на номинальном сопротивлении нагрузки при звуковом давлении 1 Па, т. е. чувствительность E_{oc} , В/Па; $R_{ном}$ — номинальное сопротивление нагрузки, Ом.

Характеристику направленности микрофона снимают по схеме рис. 12.6, причем в зависимости от задания или на нескольких частотах, используя тональный генератор, или для шумового сигнала в третьоктавных полосах, или для заданной полосы частот, используя вместо третьоктавных фильтров соответствующий полосовой фильтр. Для съемки характеристики направленности испытуемый микрофон укрепляют на поворотном диске с лимбом. Диск вращают вручную или автоматически, синхронно с регистрирующим столиком. Характеристику снимают в одной плоскости, проходящей через рабочую ось микрофона, если он представляет собой тело вращения вокруг своей оси. Для других форм микрофонов характеристику снимают для заданных плоскостей, проходящих через рабочую ось. Угол поворота отсчитывают между рабочей осью и направлением на источник звука. Нормируют характеристику направленности по осевой чувствительности, т. е. величины чувствительности, измеренные под углом θ к оси микрофона (E_θ), делят на его осевую чувствительность E_{oc} . Определяют уровень чувствительности $N_\theta = -20 \lg (E_\theta/E_{oc})$ под углом θ .

Перепад чувствительности фронт/тыл определяют как разность уровней чувствительности под углами 0 и 180° между рабочей осью микрофона и направлением на источник звука. Этот перепад определяют для ряда частот номинального диапазона или для заданной полосы частот. По измеренным данным находят средний перепад чувствительности как отношение средних чувствительностей, измеренных для углов 0 и 180°.

Уровень эквивалентного звукового давления, обусловленного собственными шумами микрофона и различными помехами, раздельно для каждой помехи измеряют в заглушенной камере по схеме рис. 12.6 в отсутствие источника звука и вычисляют по формуле

$$L_{ш} = 20 \lg \frac{U_{вых}}{E_{действ} p_0},$$

где $U_{вых}$ — напряжение на выходе микрофона, мВ; p_0 — звуковое давление,

равное $2 \cdot 10^{-5}$ Па; $E_{действ} = \sqrt{\sum_{k=1}^6 E_{oc}/6}$ — действующая речевая чувствитель-

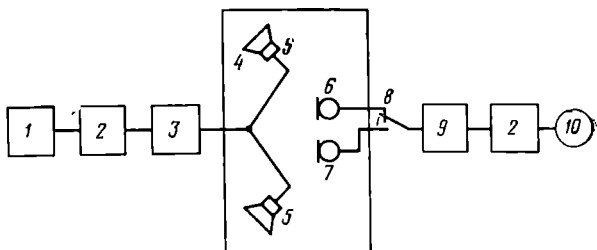
ность микрофона по свободному полю, мВ/Па; E_{oc} — значения чувствительности (в милливольтх на паскаль), измеренные на частотах 200, 250, 315, 400, 500, 630 Гц (или средних частотах третьоктавных фильтров).

Измерение характеристик микрофона в реверберационной камере (в диффузном поле). В этой камере измеряют диффузную чувствительность микрофо-

на. Размещая измерительный микрофон в зоне чисто диффузного поля (рис. 12.7) поблизости от испытуемого микрофона, измеряют развиваемые ими вы-

Рис. 12.7. Схема измерения диффузной чувствительности микрофона:

1 — генератор белого шума; 2 — третьоктавный фильтр; 3 — мощный усилитель; 4 — реверберационная камера; 5 — громкоговорители; 6 — испытуемый микрофон; 7 — измерительный микрофон; 8 — переключатель; 9 — усилитель микрофонный; 10 — милливольтметр



ходные напряжения $U'_{\text{диф}}$ и $U_{\text{диф}}$. Чувствительность по диффузному полю вычисляют по формуле $E_{\text{диф}} = E'_{\text{диф}} U_{\text{диф}} / U'_{\text{диф}}$, где $E'_{\text{диф}}$ — чувствительность измерительного микрофона по диффузному полю, мВ/Па.

Чувствительность микрофона по диффузному полю можно также вычислить по формуле [12.2]

$$E_{\text{диф}} = \sqrt{0,018 (E_{0^\circ}^2 + E_{180^\circ}^2) + 0,129 (E_{30^\circ}^2 + E_{150^\circ}^2) + 0,224 (E_{60^\circ}^2 + \rightarrow \\ \rightarrow + E_{120^\circ}^2) + 0,258 E_{90^\circ}^2},$$

где E_{0° , E_{30° , ... — чувствительность микрофона под соответствующими углами (измеренная или определенная из характеристики направленности). Числовые коэффициенты представляют собой относительные величины широтных поясов на сферической поверхности под разными углами к оси сферы, т. е. к оси микрофона. Аналогично измерениям в заглушенной камере снимают частотную характеристику чувствительности микрофона в диффузном поле и определяют среднюю чувствительность и уровень чувствительности.

Коэффициент направленности вычисляют по формуле $\Omega_m = E_{\text{ос}}^2 / E_{\text{диф}}^2$, где $E_{\text{ос}}$ и $E_{\text{диф}}$ — чувствительности по свободному и диффузному полю, мВ/Па. Индекс направленности вычисляют по формуле $q_m = 10 \lg \Omega_m$ или по рис. 5.13 для R^2 , где R — отношение чувствительности под углом к осевой чувствительности.

Градуировка микрофона в резонансной трубе (рис. 12.8а). Градуируемый микрофон 3 (обычно это измерительный конденсаторный микрофон) располагают в вырезе трубы 6 так, чтобы не сужать поперечного сечения трубы. В оба конца трубы вставляют (очень плотно, чтобы не было утечки) одинаковые обратимые преобразователи, например электродинамические или электромагнитные телефоны (P_1 , P_2) (поверхность их амбушюров должна быть по возможности хорошо отражающей). Трубу возбуждают на резонансных частотах ($f_p = 340/l$, где l — длина трубы), тогда в середине трубы и у поверхности преобразователей будут пучности колебаний с одинаковыми амплитудами. При первом измерении преобразователь P_1 работает излучателем, а P_2 — приемником. Этот приемник развивает ЭДС на выходе U_p . Во втором измерении преобразователь P_2 работает излучателем, а P_1 служит только отражателем. Регистрируют ток i_p , проходящий через излучатель P_2 . В обоих измерениях ЭДС U_m , развиваемая градуируемым микрофоном, устанавливается одинаковой, что свидетельствует об одинаковом звуковом давлении $p_{\text{макс}}$ в пучностях звуковых волн как в середине трубы, так и у ее концов.

Для заторможенного преобразователя-излучателя¹ коэффициент электро-механической связи

$$K_1 = \mathcal{F} / i_p = p_{\text{макс}} S / i_p,$$

¹ Заторможенность излучателя означает, что скорость его колебаний сделана равной нулю (см. § 4.4).

где \mathcal{T} — усилие, развиваемое излучателем; S — сечение трубы (оно должно быть равно площади излучателя); p_{\max} — звуковое давление около излучателя (и в пучностях).

Заторможность излучателя получается вследствие того, что около излучателя имеет место узел скорости колебаний u_{\min} , так как у излучателя хорошо отражающая поверхность.

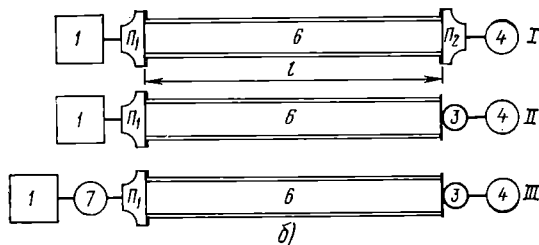
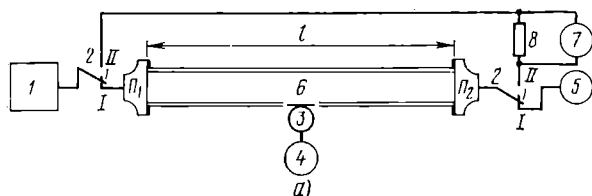


Рис. 12.8. Градуировка микрофона:

а) в резонансной трубе; б) в антирезонансной: 1 — генератор тональный; 2 — переключатель; 3 — градуируемый микрофон; 4 — милливольтметр, градуированный в паскалях или в децибелах; 5 — милливольтметр; 6 — труба; 7 — миллиамперметр; 8 — шунт; Π_1 — первый обратимый преобразователь; Π_2 — второй обратимый преобразователь

Коэффициент электромеханической связи приемника $K_2 = U_{\pi}/v_{\min}$, где v_{\min} — скорость колебаний около приемника звука (и в узлах).

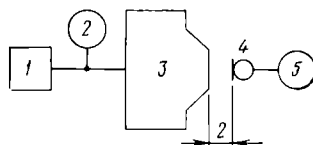
На основании теоремы взаимности $p_{\max} S/i_{\pi} = U_{\pi}/v_{\min} = K_{\text{св}}$. Так как в случае неполного отражения от концов трубы $p_{\max}/v_{\max} = p_{\min}/v_{\min} = \rho c/a_{\text{б.в.}}$, где ρc — удельное акустическое сопротивление воздуха; $a_{\text{б.в.}} = p_{\min}/p_{\max}$ — коэффициент бегущей волны, то звуковое давление в пучности $p = p_{\max} = \sqrt{U_{\pi} i_{\pi} \rho c / S a_{\text{б.в.}}}$. Следовательно, чувствительность градуируемого микрофона (по давлению) $E_{\text{д}} = U_{\pi}/p$.

Градуировка микрофона в антирезонансной трубе. Так же, как и в предыдущем случае, для градуировки пользуются одинаковыми обратимыми преобразователями Π_1 , Π_2 (например, телефонами), вставляемыми в концы трубы 6. Трубу (рис. 12.8б) возбуждают на антирезонансных частотах ($f_{\text{а.р.}} = 340(2n+1)/l$). В первом измерении преобразователь Π_1 служит излучателем, а Π_2 — приемником звука. Регистрируют ЭДС U_{π} , развиваемую последним. Во втором измерении заменяют Π_2 градуируемым микрофоном 3, записывают ЭДС U_{π} , развиваемую им. В третьем измерении заменяют излучатель Π_1 другим обратимым преобразователем Π_2 и записывают ток i_{π} в нем для того же значения ЭДС градуируемого микрофона. На основе теоремы взаимности имеем $pS/i_{\pi} = U_{\pi}/v$. Так как для антирезонанса волновое акустическое сопротивление трубы равно акустическому сопротивлению плоской волны в неограниченном пространстве, то $U_{\pi} = p/\rho c$, откуда звуковое давление получается равным $p = \sqrt{U_{\pi} i_{\pi} \rho c / S}$, откуда имеем для чувствительности микрофона (по давлению) $E_{\text{д}} = U_{\pi}/p$. Заметим, что в данном случае звуковое давление вследствие антирезонанса невелико и утечка в щели между преобразователями и трубой не играет заметной роли.

В обоих случаях измерения в трубах получают чувствительность микрофона по давлению. Если размеры микрофона невелики в сравнении с длиной волны, то эта чувствительность будет равна чувствительности по полю.

Измерение характеристик микрофонов ближнего действия. Эти измерения проводят с помощью искусственного рта 3 (см. рис. 12.3). Микрофон устанавливают на расстоянии 1,5—2,5 см от отверстия рта (рис. 12.9) и измеряют

Рис. 12.9. Схема измерения чувствительности микрофона ближнего действия: 1 — генератор; 2 — вольтметр; 3 — искусственный рот; 4 — испытуемый микрофон; 5 — милливольтметр



развиваемое им напряжение при звуковом давлении в точке микрофона, равном 1 Па. Устройство предварительно градуируют эталонным измерителем звукового давления по напряжению на его входе. Измерения рекомендуют проводить в заглушенной ящике или вдали от отражающих поверхностей. Характеристику направленности микрофона снимают в заглушенной камере (т. е. только для удаленного источника звука). Отношение чувствительностей микрофона, измеренных в ближнем поле с искусственным ртом и в диффузном поле (см. рис. 12.7), определяет шумостойкость микрофона. Остальные параметры определяют так же, как и для обычных микрофонов.

Измерение внутреннего сопротивления микрофона (рис. 12.10). Внутреннее сопротивление измеряют, например, путем изменения величины нагрузочного активного сопротивления 7. Сопротивление нагрузки, при котором получается

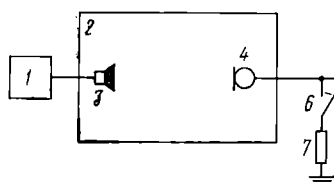


Рис. 12.10. Схема измерения внутреннего сопротивления микрофона: 1 — генератор; 2 — заглушенная камера; 3 — громкоговоритель; 4 — испытуемый микрофон; 5 — милливольтметр; 6 — ключ; 7 — магазин сопротивлений

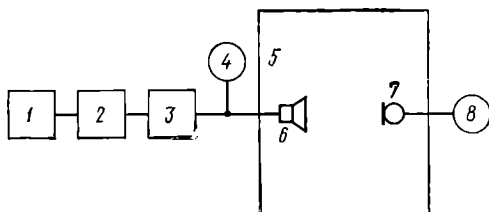


Рис. 12.11. Схема измерения чувствительности громкоговорителя: 1 — генератор тональный или белого шума с фильтром розового шума; 2 — третьоктавный фильтр (применяют при измерениях с шумом); 3 — мощный усилитель; 4 — вольтметр; 5 — заглушенная камера; 6 — испытуемый громкоговоритель; 7 — измерительный микрофон; 8 — милливольтметр, градуированный в паскалях или децибелах

уменьшение выходного напряжения вдвое по сравнению с холостым ходом, соответствует внутреннему сопротивлению микрофона.

Измерение характеристик громкоговорителей в заглушенной камере [12.3]. Для снятия характеристик громкоговорителя измерительный микрофон 7 устанавливают на расстоянии $r = (2 \div 4) d$ от него, где d — средний размер излучателя (рис. 12.11). Напряжение, подводимое к громкоговорителю, устанавливают соответственно формуле $U = \sqrt{0,1 P_{\text{ном}} R_{\text{ном}}}$, где $P_{\text{ном}}$ — номинальная мощность громкоговорителя; $R_{\text{ном}}$ — его номинальное входное сопротивление. (Для громкоговорителей мощностью менее 0,5 Вт напряжение берут ближе к номинальному.) При испытаниях на номинальную мощность синусоидальное напряжение берут равным номинальному, а шумовое — равным 0,707 номинального.

Измерителем звукового давления 7—8 регистрируют звуковое давление, развиваемое громкоговорителем в зависимости от частоты, на которой возбуждают громкоговоритель (при тональном возбуждении), или средней частоты

третьоктавного фильтра (при возбуждении от генератора белого шума). Это давление вычисляют по формуле $p = U_0/E_{oc}$, где U_0 — напряжение, развиваемое измерительным микрофоном, мВ; E_{oc} — осевая чувствительность измерительного микрофона (мВ/Па) на заданной частоте. Измерения ведут на частотах предпочтительного ряда с регистрацией пиков и провалов частотной характеристики не уже 1/8 октавы (для шумового возбуждения этого не требуется). Более предпочтительно измерение с плавным изменением частоты генератора и регистрацией характеристики на бланке (для этого диск генератора и валик с бланком должны вращаться синхронно).

Среднее звуковое давление по данным частотной характеристики вычисляют по формуле $p_{cp} = \sqrt{\sum_{k=1}^n p_k^2/n}$, где p_k — звуковое давление, развиваемое громкоговорителем на частоте f_k (или средней частоте k -го третьоктавного фильтра); n — число точек измерения (оно не должно быть менее 10). При неравномерности частотной характеристики менее 12 дБ можно вычислять среднее арифметическое значение по формуле $p_{cp} = \sum_{k=1}^n p_k/n$. Среднее стандартное звуковое давление $p_{cp,ст}$ вычисляют по формуле

$$p_{cp,ст} = p_{cp} \frac{l}{l_0} \sqrt{\frac{P_0}{P}},$$

где p_{cp} — среднее звуковое давление, развиваемое громкоговорителем в номинальном диапазоне частот (см. выше), Па; l — расстояние от рабочего центра громкоговорителя до измерительного микрофона, м; P — электрическая мощность, Вт; $P_0 = 0,1$ Вт; $l_0 = 1$ м.

Характеристическую чувствительность громкоговорителя на рабочей оси вычисляют по формуле в паскалях на ватт

$$E_x = p_{cp} l / (\sqrt{P} l_0),$$

где p_{cp} — среднее звуковое давление в номинальном диапазоне частот (см. выше), Па; P — электрическая мощность, подводимая к громкоговорителю, Вт; l — расстояние от рабочего центра громкоговорителя до измерительного микрофона, м; $l_0 = 1$ м.

Эффективно воспроизводимый диапазон частот находят по частотной характеристике громкоговорителя путем определения частот, соответствующих точкам пересечения прямой, параллельной оси частот, с частотной характеристикой громкоговорителя (см. рис. 11.1). Прямую линию проводят на 10 дБ ниже уровня среднего звукового давления в октавной полосе частот, соответствующей максимальной чувствительности громкоговорителя. Этот уровень

вычисляют по формуле $N_{max} = 20 \lg (p_{cp,окт}/p_0)$, где $p_{cp,окт} = \sum_{k=1}^n p_k/n$ — среднее звуковое давление; $p_0 = 2 \cdot 10^{-5}$ Па; p_k — звуковое давление, развиваемое громкоговорителем на частоте f_k (или средней частоте k -го третьоктавного фильтра), Па; n — количество точек отсчета. Для синусоидального сигнала оно должно быть не менее 7 (через 1/6 октавы), для третьоктавных фильтров — 3.

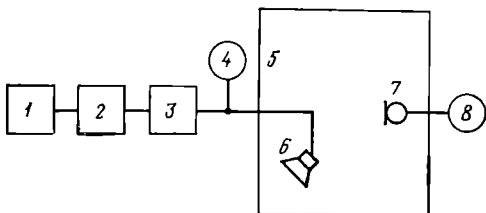
Неравномерность частотной характеристики громкоговорителя определяют соответственно § 11.2 (рис. 11.1 и 11.2) в номинальном и рабочем диапазонах частот.

Диаграмму направленности громкоговорителя снимают в заглушенной камере по схеме рис. 12.11 с поворотом громкоговорителя вокруг оси, проходящей через его рабочий центр перпендикулярно его рабочей оси. Громкоговоритель вращают или вручную, или автоматически, синхронно с поворотом столика, на котором закреплен бланк диаграммы направленности. Для громкоговорителей с разными размерами продольной и поперечной осей излучателя

снимают две диаграммы направленности: в плоскостях, проходящих через рабочую ось и соответственно через продольную и поперечную оси излучателя. Диаграммы направленности снимают или для ряда частот, или для основной части диапазона. В последнем случае к громкоговорителю подается шумовое напряжение через полосовой фильтр, имеющий полосу, равную основной.

В тех случаях, когда размеры камеры не позволяют проводить измерения характеристик громкоговорителей направленности (например, для больших звуковых колонок и рупорных громкоговорителей), проводят измерения на моделях этих громкоговорителей с соответствующим повышением частоты измерений.

Рис. 12.12. Схема измерения акустической мощности громкоговорителя: 1 — генератор белого шума с фильтром розового шума; 2 — трехтактный фильтр; 3 — мощный усилитель; 4 — вольтметр; 5 — реверберационная камера; 6 — испытуемый громкоговоритель; 7 — измерительный микрофон; 8 — милливольтметр, градуированный в паскалях или децибелах



Измерение характеристик громкоговорителей в реверберационной камере (рис. 12.12). В этой камере измеряют излучаемую мощность громкоговорителя, которую можно определить и по формуле

$$P_a = \frac{p^2 \cdot 0,161V}{4 \cdot 412T} \approx 10^{-4} \frac{p^2 V}{T},$$

где T — время реверберации в камере, с; p — звуковое давление диффузного поля, Па; V — объем камеры, м³.

Правда, эта мощность несколько меньше той, которую развивает громкоговоритель в открытом пространстве, так как вследствие реакции диффузного поля на излучатель уменьшается его сопротивление излучения, но эта поправка обычно находится в пределах точности измерений.

Зная излучаемую мощность P_a и звуковое давление p_1 , развиваемое громкоговорителем в заглушенной камере на расстоянии 1 м от его рабочего центра, можно найти коэффициент осевой концентрации

$$\Omega = \frac{4\pi p_1^2}{\rho c P_a} = 3,05 \cdot 10^{-2} \frac{p_1^2}{P_a},$$

где $p_1 = p_r/r$; p_r — звуковое давление, измеренное на расстоянии r (в метрах).

Измерение коэффициента нелинейных искажений¹ ведут при подведении к громкоговорителю номинального напряжения по схеме рис. 12.11. Для измерения этого коэффициента к измерительному микрофону подключают измеритель нелинейных искажений или анализатор гармоник.

При измерении коэффициента гармонических искажений к громкоговорителю подводится синусоидальное напряжение [12.3] на заданных частотах и измеряются выходные напряжения измерительного микрофона U_k на основной частоте и гармониках (обычно второй и третьей). Суммарный коэффициент гармонических искажений в процентах

$$K_{г.н} = K_{г.н} = \sqrt{U_2^2 + U_3^2} \cdot 100/U_1.$$

При измерении коэффициента интермодуляционных искажений к громкоговорителю подается напряжение от двух тональных генераторов, частоты ко-

¹ Под этим коэффициентом подразумеваются коэффициенты гармонических и интермодуляционных искажений n -го порядка и суммарные.

торых f_1 и f_2 устанавливаются следующим образом: частота f_1 берется из предпочтительного ряда (см. § 2.2) на $1/3$ выше нижней границы номинального диапазона, частоты f_2 должны быть не ниже $6f_1$ (оговариваются в технической документации). Напряжения генераторов устанавливаются в соотношении 4:1 при общем напряжении, равном номинальному. Анализатором гармоник определяют напряжение на выходе измерительного микрофона на частотах f_2 , $f_2 \pm f_1$ и $f_2 \pm 2f_1$. Суммарный коэффициент интермодуляционных искажений в процентах определяется по формуле

$$K_{н.и} = K_{и.и} = \left[\sqrt{(U_{(f_2-f_1)} + U_{(f_2+f_1)})^2 + (U_{(f_2-2f_1)} + U_{(f_2+2f_1)})^2 / U_{f_2}} \right] \cdot 100,$$

где $U_{(f_2-f_1)}$, $U_{(f_2+f_1)}$, $U_{(f_2-2f_1)}$, $U_{(f_2+2f_1)}$ и U_{f_2} — напряжения (звуковые давления) на соответствующих частотах.

Измерение входного сопротивления громкоговорителей. Эти измерения проводят так же, как и в случае измерения любого комплексного сопротивления. Измеряют его на предпочтительном ряде частот (см. § 2.2) с интервалом $1/3$ октавы от $0,5 f_m$ до $1,5 f_m$ и через октаву в остальном диапазоне частот. При этом обязательно находят максимум и минимум модуля входного сопротивления. Первому соответствует частота механического резонанса f_m , второму — частота электромеханического резонанса $f_{э.м.}$

Наиболее распространенная схема измерения входного сопротивления приведена на рис. 12.13. Она основана на сравнении сопротивления громкоговори-

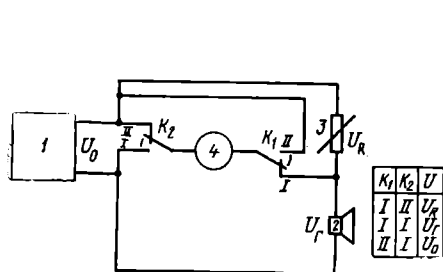


Рис. 12.13. Схема измерения входного сопротивления громкоговорителя:

1 — звуковой генератор; 2 — громкоговоритель; 3 — магазин сопротивлений; 4 — вольтметр; K_1 и K_2 — ключи для переключения вольтметра; U_0 — общее напряжение; U_g — напряжение на громкоговорителе; U_r — напряжение на сопротивлении

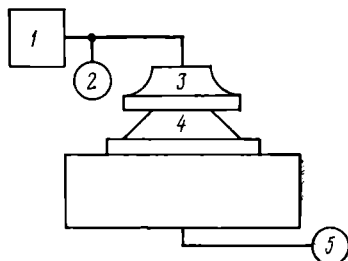


Рис. 12.14. Схема измерения чувствительности телефона:

1 — генератор тональный; 2 — вольтметр; 3 — испытуемый телефон; 4 — искусственное ухо; 5 — вольтметр искусственного уха, градуированный в паскалях или децибелах

теля и магазина сопротивлений. Подбирают последнее так, чтобы напряжение на громкоговорителе U_g и на магазине U_r было одинаковым. Величина сопротивления магазина при этом равна модулю $z_{вх}$. Если надо знать фазовый угол входного сопротивления, то измеряют при этом напряжение на выходе звукового генератора U_0 . Угол определяют из выражения $\cos \varphi = (U_0^2 / 2U_{г.р}^2) - 1$.

Снятие характеристик телефона. Эти характеристики снимают при расположении телефона 3 на искусственном ухе 4 (рис. 12.14). Измеряют частотную характеристику чувствительности телефона по схеме рис. 12.19. Чувствительность определяют по формуле $E_T = p / U_{вх}$, где $U_{вх}$ — напряжение, подводимое к телефону; p — звуковое давление, развиваемое телефоном в искусственном ухе. Для измерения отдачи последовательно с телефоном включают активное сопротивление, численно равное модулю сопротивления телефона на частоте 1000 Гц при подведении к схеме 1 мВ·А. Измерение входного сопротивления и коэффициента нелинейных искажений проводят, как и для громкоговорителей.

Измерение времени реверберации в заданных помещениях. Для этой цели используют ревербометр (см. рис. 12.2). Так как в реальных помещениях нельзя гарантировать диффузность поля, то измерения проводят воющим тоном или полосами шума и в ряде точек (например, с качающимся микрофоном) (рис. 12.15а). Если бы поле в помещении было диффузным, то достаточно было бы найти временную задержку, при которой уровень снизится на 60 дБ (это и было бы временем стандартной реверберации). Можно также определить снижение уровня ΔL для определенной величины задержки τ и вычислить время стандартной реверберации по формуле $T=60 \tau/\Delta L$. Но так как звуковое поле в той или иной степени отклоняется от диффузного, особенно в

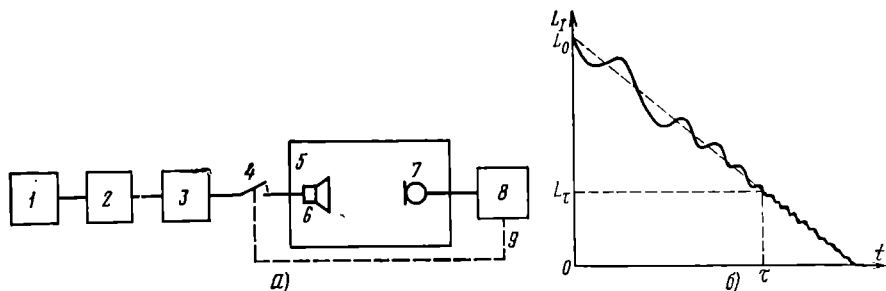


Рис. 12.15. Измерение времени реверберации: а) схема: 1 — генератор тональный или белого шума; 2 — третьоктавный фильтр (при измерении с шумом); 3 — мощный усилитель; 4 — выключатель звука; 5 — испытуемое помещение или реверберационная камера (при измерении коэффициентов поглощения); 6 — громкоговоритель; 7 — измерительный микрофон; 8 — ревербометр (см. рис. 12.7); 9 — цепь выключения громкоговорителя; б) иллюстрация вычисления времени реверберации

обычных помещениях, то приходится измерять перепад уровней для нескольких значений временной задержки и усреднять полученные результаты или же строить кривую затухания уровней по измеренным перепадам их и затем графически определять время стандартной реверберации (см. рис. 12.15б). В практике применяются и ревербометры интегрального типа. В них происходит интегрирование уровней во времени с момента выключения источника звука L_0 до достижения заданного порогового уровня L_T . Если начальный уровень L_0 задан, то время реверберации $T=120 B/(L_0^2-L_T^2)$, где B — интегральное значение показаний прибора ($B=\int_0^{\tau} L dt$).

Измерение коэффициентов поглощения звука в реверберационной камере. В этом случае измеряют диффузный коэффициент поглощения, обычно используемый при расчетах времени реверберации. В реверберационной камере измеряют время реверберации до (T_1) и после (T_2) внесения туда поглощающего материала площадью S_x . Соответственно коэффициент поглощения

$$\alpha_x = 0,161 \frac{V}{S_x} \left[\frac{1}{T_2} - \frac{1}{T_1} \right],$$

где V — объем камеры, m^3 .

При этих измерениях материал должен быть расположен так, как он будет использован (например, с учетом того материала, который будет находиться за ним). Размеры образцов должны быть такими же, как и в натуре, или во всяком случае быть больше самой длинной волны.

Измерение коэффициентов поглощения в трубе (см. рис. 12.5). Если в прямой волне звуковое давление $p_{пр}$, а в отраженной $p_{отр}$, то в пучности оно будет равно $p_{\max} = |p_{пр}| + |p_{отр}|$, а в узле $p_{\min} = |p_{пр}| - |p_{отр}|$, где $p_{отр} =$

$= p_{\text{пр}} \beta_{\text{отр}}$, $\beta_{\text{отр}} = p_{\text{отр}} / p_{\text{пад}}$ — коэффициент отражения по давлению. Коэффициент отражения по интенсивности

$$\alpha_{\text{отр}} = |\beta|^2 = \left| \frac{p_{\text{отр}}}{p_{\text{пр}}} \right|^2 = \left[\frac{p_{\text{макс}} - p_{\text{мин}}}{p_{\text{макс}} + p_{\text{мин}}} \right]^2$$

а коэффициент поглощения

$$\alpha = 1 - \alpha_{\text{отр}} = 1 - \left[\frac{p_{\text{макс}} - p_{\text{мин}}}{p_{\text{макс}} + p_{\text{мин}}} \right]^2 = \frac{2p_{\text{макс}}p_{\text{мин}}}{(p_{\text{макс}} + p_{\text{мин}})^2}$$

Расстояние между соседними пучностями или узлами дает возможность проконтролировать частоту колебаний, так как $\Delta l = c/2f$. С помощью этой трубы можно определить величины акустического сопротивления отражающего материала. Для этого требуется измерить расстояние Δl между отражающим материалом и ближайшим к нему узлом звукового давления $p_{\text{мин}}$. Сдвиг фаз при отражении волны давления определится из формулы

$$\varphi = \pi - 2\omega \Delta l / c.$$

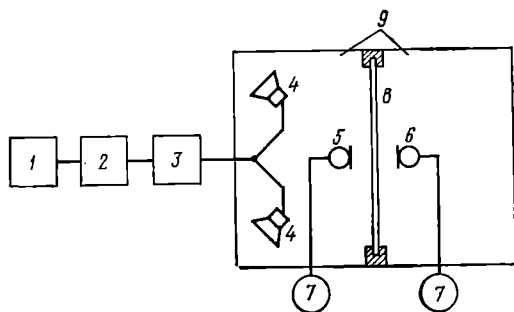
Коэффициент отражения в комплексном виде

$$\beta_{\text{отр}} = \left| \frac{p_{\text{макс}} - p_{\text{мин}}}{p_{\text{макс}} + p_{\text{мин}}} \right| e^{i \left(\pi - \frac{2\omega \Delta l}{c} \right)} = w + iq.$$

Измерение звукоизоляции перегородок. Эти измерения сводятся к измерениям уровней звукового давления перед перегородкой L_1 и после нее L_2 . Измерения проводят в реверберационной камере (рис. 12.16). Перегородку 8

Рис. 12.16. Схема измерения звукоизоляции перегородок:

1 — генератор тональный или белого шума; 2 — третьоктавный фильтр (при измерении с шумом); 3 — мощный усилитель; 4 — громкоговорители; 5 и 6 — измерительные микрофоны; 7 — милливольтметры; 8 — испытываемая перегородка; 9 — реверберационная камера



плотно монтируют в толстую стену без щелей с виброизоляцией от других стен. Размеры перегородок берут по возможности натуральной величины, но не менее 10 м^2 и минимальные размеры не менее $2,5 \text{ м}$. Звукоизоляция перегородки с учетом увеличения уровня в реверберационной камере $Q_{\text{пер}} = L_1 - L_2 + 10 \lg(S_{\text{пер}}/A)$, где $S_{\text{пер}}$ — площадь перегородки; A — общее поглощение в реверберационной камере после перегородки.

Объем камеры должен быть не менее 50 м^3 , измерительные точки (три для частот выше 500 Гц и шесть ниже ее) должны находиться на расстоянии не менее 1 м от ограждающих поверхностей камеры и не менее чем на величину $A/5$ от источника шума. Измерения ведут в октавных или третьоктавных полосах частот (см. табл. 2.3) в диапазоне $100\text{—}3150 \text{ Гц}$. Уровни измеряют шумометром с полосовыми фильтрами. Средний уровень для каждой полосы определяется как среднее арифметическое из значений, измеренных во всех точках.

СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ

Ко всем разделам

1. Иофе В. К. и Янпольский А. А. Расчетные графики и таблицы по электроакустике. М.—Л., Госэнергоиздат, 1954.
2. Сапожков М. А. Электроакустика. Учебник для вузов связи. М.: «Связь», 1978.
3. Дрейзен И. Г. Электроакустика и звуковое вещание. М.: Связьиздат, 1961.
4. Римский-Корсаков А. В. Электроакустика. М.: «Связь», 1973.
5. Taschenbuch der Technischen Akustik. Hrsg. Heckl/Müller, Springer-Verlag, Berlin, 1975.
6. Иофе В. К. Электроакустика. М.: Связьиздат, 1954.

По разделам

- 1.1. Скучик Е. Основы акустики. В 2 томах. М.: «Мир», 1976.
- 1.2. Стретт В. (лорд Рэлей). Теория звука: Пер. с английского под ред. С. М. Рытова. Изд. 2-е. М.: Гостехиздат, 1955.
- 1.3. Морз Ф. Колебания и звук: Пер. с англ./Под ред. С. Н. Ржевкина. М.—Л.: Гос. техн. теорет. изд., 1949.
- 1.4. Ржевкин С. Н. Курс лекций по теории звука. М.: Изд-во МГУ, 1960.
- 1.5. Фурдуев В. В. Акустические основы вещания. М.: Связьиздат, 1960.
- 1.6. Акустические единицы. ГОСТ 8849—58. Введен 1.1.1958. М., 1957.
- 2.1. Ржевкин С. Н. Слух и речь в свете современных исследований. М.—Л.: ОНТИ НКПТ СССР, 1936.
- 2.2. Цвикер В., Фельдкеллер Р. Ухо как приемник информации: Пер. с немецкого под ред. Б. Г. Белкина. М.: «Связь», 1971.
- 2.3. Fletcher H. Speech and Hearing in Communication. D. Van Nostrand Co, Inc. New York, 1953.
- 3.1. Харкевич А. А. Спектры и анализ. М.: ГИТТЛ, 1953.
- 3.2. Сапожков М. А. Речевой сигнал в кибернетике и связи. М.: Связьиздат, 1963.
- 3.3. Шитов Л. В., Белкин Б. Г. Статистические характеристики сигналов, представляющих натуральные звучания, и их применение при исследовании электроакустических систем. Труды НИКФИ, вып. 56. М.: 1970.
- 3.4. Фланеган Дж. Анализ, синтез и восприятие речи. Пер. с англ. под ред. А. А. Пирогова. М.: «Связь», 1968.
- 4.1. Харкевич А. А. Теория электроакустических аппаратов. М.: Связьиздат. 1940.
- 4.2. Харкевич А. А. Теория преобразователей. М.—Л.: Госэнергоиздат, 1948.
- 4.3. Фурдуев В. В. Теоремы взаимности в механических, акустических и электромеханических четырехполюсниках. М.: Гостехиздат, 1948.
- 5.1. Эфрусси М. М. Микрофоны и их применение. М.: «Энергия», 1974.
- 5.2. Козюренко Ю. И. Звукозапись с микрофона. М.: «Энергия», 1975.
- 5.3. ГОСТ 16123—70. Микрофоны. Методы электроакустических испытаний и измерений.
- 5.4. ГОСТ 6995—73. Микрофоны динамические катушечные. Общие технические условия.
- 5.5. ГОСТ 13492—68. Микрофоны угольные для телефонных аппаратов общего применения.
- 5.6. ГОСТ 12368—66*. Соединители штепсельные низкочастотные.
- 6.1. Эфрусси М. М. Громкоговорители и их применение. М.: «Энергия», 1976.
- 6.2. Скляров В. Е. Стереофонические головные телефоны и их применение./ М.: «Энергия», 1977.
- 6.3. Болотников И. М. Громкоговорители. М.: «Искусство», 1971.
- 6.4. Шифман Д. Х. Громкоговорители. М.: «Энергия», 1965.
- 6.5. ГОСТ 13491—68. Телефоны электромагнитные для телефонных аппаратов общего применения.

- 6.6. ГОСТ 1010—73. Головки громкоговорителей динамические прямого излучения. Общие технические условия.
- 6.7. ГОСТ 12089—66. Громкоговорители рупорные общего назначения. Общие технические условия.
- 6.8. ГОСТ 5961—76. Громкоговорители абонентские. Общие технические условия.
- 6.9. ГОСТ 16122—70*. Громкоговорители. Методы электроакустических испытаний и измерений.
- 7.1. Маньковский В. С. Акустика студий и залов для звуковоспроизведения. М.: «Искусство», 1966.
- 7.2. Кнудсен В. О. Архитектурная акустика. Х.—К.: ОНТИ, 1936.
- 7.3. Лифшиц С. Я. Курс архитектурной акустики. М.: ОНТИ, 1937.
- 8.1. Молодая Н. Т. Акустическое проектирование радиовещательных студий. М.: Связьиздат, 1963.
- 8.2. Рудник В. М., Муравьева С. Г., Айзенберг Н. Б., Тумаркина Е. С. Звукопоглощающие материалы и конструкции. М.: «Связь», 1970.
- 9.1. Дрейзен И. Г. Курс электроакустики. Ч. 2. М.: Связьиздат, 1940.
- 9.2. Папернов Л. З. Озвучение открытых пространств. М.: Связьиздат, 1963.
- 9.3. Сапожков М. А. Звукофикация помещений. М.: «Связь», 1979.
- 9.4. Папернов Л. З., Молодая Н. Т., Метер Ч. М. Проектирование и расчет звукоусиления и озвучения закрытых помещений. М.: «Связь», 1970.
- 10.1. Аполлонова Л. П., Шумова Н. Д. Механическая звукозапись, Изд. 2-е. М.: «Энергия», 1978.
- 10.2. Вроблевский А. А., Корольков В. Г., Мазо Я. А. и др. Физические основы магнитной звукозаписи. М.: «Энергия», 1970.
- 10.3. Цирулина З. В. Основы звукозаписи. М.: «Искусство», 1970.
- 10.4. Бургов В. А. Физика магнитной звукозаписи. М.: «Искусство», 1970.
- 10.5. Мазо Я. А. Магнитная лента. Изд. 2-е, перераб. и доп. М.: «Энергия», 1975.
- 10.6. Ефимов Е. Г. Магнитные головки. Изд. 2-е, перераб. и доп. М.: «Энергия», 1976. (Массовая радиобиблиотека. Вып. 917.)
- 11.1. Покровский Н. Б. Расчет и измерение разборчивости речи. М.: Связьиздат, 1962.
- 11.2. Сапожков М. А. Защита трактов радио и проводной связи от помех и шумов. М.: Связьиздат, 1959.
- 11.3. Вокодерная телефония. Под ред. А. А. Пирогова. М.: «Связь», 1974.
- 11.4. ГОСТ 16600—72. Передача речи по трактам радиотелефонной связи. Требования к разборчивости речи и методы артикуляционных измерений.
- 11.5. ГОСТ 7153—68*. Аппараты телефонные общего применения. Методы испытаний.
- 11.6. Горон И. Е., Римский-Корсаков А. В. Исследование заметности искажений и помех в радиовещательном тракте. Пленарный доклад, VI Всесоюзная акустическая конференция. М., 1968.
- 11.7. ГОСТ 8031—56. Тональный метод измерения разборчивости речи.
- 12.1. Беранек Л. Акустические измерения. М.: ИИЛ, 1952.
- 12.2. ГОСТ 16123—70. Микрофоны. Методы электроакустических испытаний.
- 12.3. ГОСТ 16122—70. Громкоговорители. Методы электроакустических испытаний.
- 12.4. ГОСТ 15116—69. Звукоизоляция. Метод измерений. Показатель звукоизоляции.
- 12.5. ГОСТ 16600—72. Передача речи по трактам радиотелефонной связи. Требования к разборчивости речи и методы артикуляционных измерений.
- 12.6. ГОСТ 7153—68. Аппараты телефонные общего применения. Методы испытаний.
- 12.7. ГОСТ 20445—75. Методы измерений шумов на рабочих местах.
- 12.8. ГОСТ 6496—74. Ларингофоны. Методы электроакустических испытаний.
- 12.9. ГОСТ 12090—66. Частоты для акустических измерений.

ОГЛАВЛЕНИЕ

Стр.

Предисловие	3
Список обозначений	4
Введение	5
Раздел 1. ЗВУКОВЫЕ КОЛЕБАНИЯ И ВОЛНЫ	6
1.1. Определения	6
1.2. Линейные характеристики звукового поля	8
1.3. Энергетические характеристики звукового поля	9
1.4. Уровни	10
1.5. Плоская волна	12
1.6. Сферическая волна	13
1.7. Цилиндрическая волна	15
1.8. Интерференция волн	16
1.9. Отражение звука	16
1.10. Преломление звука	18
1.11. Дифракция волн	19
1.12. Затухание волн	20
1.13. Распространение звука в трубах	21
Раздел 2. ОСНОВНЫЕ СВОЙСТВА СЛУХА	23
2.1. Введение	23
2.2. Восприятие по частоте	23
2.3. Восприятие по амплитуде	28
2.4. Временные характеристики слуха	39
2.5. Восприятие импульсов	41
2.6. Нелинейные свойства слуха	42
2.7. Бинауральный эффект	43
Раздел 3. ПЕРВИЧНЫЕ АКУСТИЧЕСКИЕ СИГНАЛЫ И ИХ ИСТОЧНИКИ	44
3.1. Введение	44
3.2. Динамический диапазон и уровни	44
3.3. Частотный диапазон и спектры	49
3.4. Временные характеристики акустического сигнала	55
3.5. Пространственное распределение интенсивности речи вокруг головы	56
3.6. Первичный речевой сигнал	60
3.7. Гортань как источник звуковых колебаний	62
Раздел 4. ЭЛЕКТРОМЕХАНОАКУСТИЧЕСКИЕ СИСТЕМЫ И МАТЕРИАЛЫ	63
4.1. Введение	63
4.2. Электромеханические аналогии	65
4.3. Электроакустические аналогии	76
4.4. Электромеханические преобразователи	76
4.5. Методы составления аналоговых схем	79
4.6. Материалы, применяемые в электроакустической аппаратуре и акустических устройствах	81
Раздел 5. МИКРОФОНЫ	84
5.1. Определения, классификация, основные параметры	84
5.2. Чувствительность и сопротивление	85
5.3. Принципы устройства микрофона	87
5.4. Направленные свойства микрофонов	96
5.5. Технические требования к микрофонам	104
5.6. Описание некоторых типов микрофонов	110
5.7. Эксплуатация микрофонов	137
Раздел 6. ГРОМКОГОВОРИТЕЛИ И ТЕЛЕФОНЫ	143
6.1. Определения, классификация, основные параметры	143
6.2. Основные характеристики телефонов и громкоговорителей	146
6.3. Требования к громкоговорителям и телефонам	157
6.4. Описание некоторых типов телефонов, громкоговорителей и акустических систем	162
6.5. Расчеты и конструкции акустических оформлений	179
6.6. Включение громкоговорителей в акустические системы	187
Раздел 7. АКУСТИКА ПОМЕЩЕНИЙ	190
7.1. Характеристики помещений	190
7.2. Поглощающие материалы и их конструкции	199
7.3. Звукоизоляция помещений	207
Раздел 8. РАДИОВЕЩАТЕЛЬНЫЕ И ТЕЛЕВИЗИОННЫЕ СТУДИИ	210
8.1. Типы студий	210
8.2. Оптимальная реверберация в студии	210
8.3. Звукоизоляция студий	212
8.4. Электроакустическое оборудование студий и комнат прослушивания	216

	Стр.
Раздел 9. ОЗВУЧЕНИЕ И ЗВУКОУСИЛЕНИЕ	221
9.1. Основные показатели систем озвучения	221
9.2. Особенности озвучения открытых пространств	223
9.3. Сосредоточенные системы озвучения	223
9.4. Зональные системы озвучения	233
9.5. Особенности озвучения помещений	235
9.6. Сосредоточенные системы озвучения помещений	235
9.7. Распределенные системы	236
9.8. Звукоусиление	241
9.9. Звукоусилительная аппаратура	246
Раздел 10. ЗАПИСЬ И ВОСПРОИЗВЕДЕНИЕ ЗВУКА	250
10.1. Основные системы записи и воспроизведения звука	250
10.2. Грампластинки	254
10.3. Аппаратура для воспроизведения грамзаписи	256
10.4. Фотографические фонограммы	261
10.5. Магнитофоны	266
10.6. Магнитные ленты	277
10.7. Проектирование аппаратной звукозаписи	282
10.8. Технология магнитной звукозаписи	284
Раздел 11. ПЕРЕДАЧА АКУСТИЧЕСКИХ СИГНАЛОВ	285
11.1. Определения	295
11.2. Искажения сигналов	286
11.3. Шумы и помехи в трактах связи	290
11.4. Допустимые величины искажений вещательных сигналов	291
11.5. Понятность и разборчивость речи	292
Раздел 12. АКУСТИЧЕСКИЕ ИЗМЕРЕНИЯ	296
12.1. Измерительная аппаратура и оборудование	296
12.2. Методы измерений основных характеристик аппаратуры и помещений	299
Список литературы	309

ИБ № 317

**Виктор Кивович Иофе,
Вадим Георгиевич Корольков,
Михаил Андреевич Сапожков**

СПРАВОЧНИК ПО АКУСТИКЕ

Ответственный редактор М. А. Сапожков
Редактор Л. И. Венгренюк
Обл. художника А. А. Данилина
Художественный редактор Р. А. Клочков
Технический редактор К. Г. Маркоч
Корректор Г. Ф. Кцолева

Сдано в набор 23/XI 1978 г. Подп. в печ. 20/II 1979 г.
Т-03152 Формат 60×90/16 Бумага тип. № 2 Гарнитура литературная.
Печать высокая 19,5 усл. печ. л. 28,0 уч.-изд. л. Тираж 31 500 экз.
Изд. № 17891 Зак. № 294 Цена 1 р. 70 к.
Издательство «Связь», Москва 101000, Чистопрудный бульвар, д. 2

Типография издательства «Связь» Госкомиздата СССР
Москва 101000, ул. Кирова, д. 40

