

М. А. Сапожков

ЭЛЕКТРО- АКУСТИКА

ДОПУЩЕНО МИНИСТЕРСТВОМ ВЫСШЕГО
И СРЕДНЕГО СПЕЦИАЛЬНОГО ОБРАЗОВАНИЯ СССР
В КАЧЕСТВЕ УЧЕБНИКА ДЛЯ СТУДЕНТОВ
ВЫСШИХ УЧЕБНЫХ ЗАВЕДЕНИЙ,
ОБУЧАЮЩИХСЯ ПО СПЕЦИАЛЬНОСТИ
«РАДИОСВЯЗЬ И РАДИОВЕЩАНИЕ»



Издательство «Связь»
Москва 1978

6Ф2.7
С19
УДК 534.621

Сапожков М. А.

С19 Электроакустика. Учебник для вузов. М.,
«Связь», 1978.

272 с. с ил.

Рассмотрены вопросы электроакустики, а также смежных с нею фундаментальных разделов акустики применительно к системам вещания, радиотелефонной связи, звукоусиления, звукового сопровождения телевидения, записи и воспроизведения звука и т. д., а именно, распространение звука, характеристики слуха, акустических сигналов, электроакустической аппаратуры, помещений, радио- и телестудий, систем звукоусиления и озвучения, а также вопросы передачи акустических сигналов, в том числе понятность и разборчивость речи, и методика акустических измерений.

Книга предназначена в качестве учебника для студентов и будет полезна инженерам, работающим в области радиосвязи и вещания.

С $\frac{30403-035}{045(01)-78}$ 35-78

6Ф2.7

РЕЦЕНЗЕНТЫ: В. К. ИОФЕ, Г. С. ГЕНЗЕЛЬ

ИБ № 510

Михаил Андреевич Сапожков

ЭЛЕКТРОАКУСТИКА

Редактор *И. С. Балашова*
Обл. художника *В. Д. Хромилина*
Художественный редактор *А. И. Моисеев*
Технический редактор *К. Г. Маркоч*
Корректор *И. М. Худякова*

Сдано в набор 1/IX 1977 г. Подп. в печ. 1/XII 1977 г.
Т-19951 Формат 84×108^{1/32} Бумага писч. № 2 14,28 усл.-печ. л.
14,7 уч.-изд. л. Тираж 30 000 экз. Изд. № 17045 Зак. № 228 Цена 75 коп.
Издательство «Связь». Москва 101000, Чистопрудный бульвар, д. 2

Типография издательства «Связь» Госкомиздата СССР
Москва 101000, ул. Кирова, д. 40

© Издательство «Связь», 1978 г.

П р е д и с л о в и е

Используемые в настоящее время учебные пособия по курсу акустики устарели и не соответствуют программе ни по содержанию, ни по объему. Данный учебник написан в соответствии с программой курса электроакустики, утвержденной Министерством связи СССР.

Он предназначен для студентов, специализирующихся по радиосвязи и вещанию. Так как вопросам электроакустики согласно программе уделено менее половины объема учебника, то более точным было бы название «Техническая акустика». Но поскольку в учебных планах и в программе этот курс назван электроакустикой, то данному учебнику было присвоено это название.

По объему учебник соответствует времени, отведенному на чтение курса (40 часов), поэтому в нем рассматриваются только те вопросы, с которыми должен быть знаком инженер по эксплуатации средств связи и вещания, включая радиообслуживание и звуковое сопровождение телевидения, а также вопросы проектирования систем радиосвязи и вещания. Ряд второстепенных вопросов изложен кратко, со ссылкой на наиболее доступные источники.

При изложении большинства вопросов приведена преимущественно физическая трактовка. Материал, изложенный в других курсах, предшествующих данному, снабжен ссылками на источники. Приводимые чертежи аппаратуры даны без точного соблюдения масштаба и соразмерности отдельных деталей, так как их основное назначение — показать принцип действия соответствующего прибора.

Выражаю благодарность д-ру техн. наук В. К. Иофе и канд. техн. наук Г. Н. Сталь за предварительный просмотр рукописи, ценные советы и замечания, а также канд. техн. наук Г. С. Гензелю за ценные замечания, послужившие улучшению излагаемого материала.

Все замечания следует направлять в издательство «Связь»: 101000, Москва, Чистопрудный бульвар, д. 2.

Автор

В в е д е н и е

В трактах радиотелефонной связи, вещания, звукового сопровождения телевидения, звукозаписи и воспроизведения, звукоусиления, массового радиообслуживания, диспетчерской связи¹⁾ и т. д. начальные и конечные звенья тракта — акустические. Тракт начинается от источника звуковых колебаний (голос человека, музыкальные инструменты, различного рода источники шумов), затем идет звено тракта в виде воздушной среды помещения или открытого пространства. Начальная акустическая часть тракта заканчивается преобразователем акустических колебаний в электрические (микрофон). После него идут различные электрические системы, а 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 ушной раковиной при приеме на телефон. Каждое из акустических звеньев тракта обладает соответствующими свойствами, которые надо знать, чтобы уметь правильно пользоваться ими.

Акустические звенья тракта зачастую бывают определяющими в отношении качества вещания и играют значительную роль в обеспечении качества речевой связи.

¹⁾ В дальнейшем для краткости везде вместо этого перечня будут использованы термины «в трактах вещания и связи» или «в электроакустических трактах».

ЗВУКОВОЕ ПОЛЕ В НЕОГРАНИЧЕННОМ ПРОСТРАНСТВЕ

1.1. ОПРЕДЕЛЕНИЯ

Звуковым полем называют пространство, в котором происходит распространение звуковых колебаний. Звуковые колебания в жидкой и газообразной средах представляют собой продольные колебания, так как частицы среды колеблются вдоль линии распространения звука. Вследствие этого образуются сгущения 1 и разрежения 2 среды,двигающиеся от источника колебаний (рис. 1.1) с определенной скоростью, называемой *скоростью звука*. Скорость звука в воздухе при температуре 20°C и нормальном атмосферном давлении приблизительно равна 340 м/с.

Волнообразное изменение плотности среды, вызванное звуковыми колебаниями, называют *звуковой волной*. Направление распространения звуковых волн — *звуковым лучом*, а поверхность, соединяющую смежные точки поля с одинаковой фазой колебания (например, точки максимального сгущения или разрежения), — *фронтом волны*. Звуковые лучи пересекают фронт волны под прямым углом. В общем случае фронт волны имеет сложную форму, но в большинстве практических случаев можно ограничиться соотношениями, полученными для *плоской* и *сферической* форм фронта, а иногда еще и цилиндрической.

Если *период колебаний* T , то *частота колебаний* $f = 1/T$, а *длина звуковой волны*, равная расстоянию между соседними фронтами, находящимися в одинаковой фазе (см. рис. 1.1), — $\lambda = cT = c/f$, где c — скорость звука.

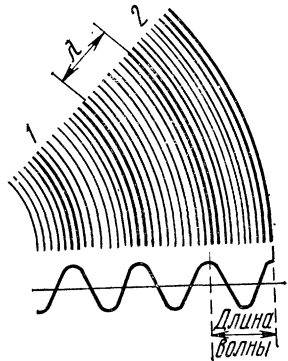


Рис. 1.1. Распространение звуковых волн

В системах связи и вещания частоты колебаний лежат в пределах от 20—30 до 15 000—20 000 Гц, соответственно длины звуковых волн — от 17—11,3 м до 2,27—1,7 см.

Частоты колебаний подразделяют на *низкие, средние и высокие звуковые частоты*. К низким относят частоты, лежащие в пределах от 20 до 200—500 Гц, к высоким звуковым частотам от 2000—5000 до 20 000 Гц, к средним — промежуточные между высокими и низкими. Обычно для краткости прилагательное «звуковые» опускают, особенно в тех случаях, когда речь идет только об акустических процессах и трактах (и не рассматриваются вопросы, относящиеся к радиочастотам). Частоты, лежащие ниже 20 Гц, называют инфразвуковыми, а выше 20 кГц — ультразвуковыми.

Звуковое поле характеризуют рядом линейных и энергетических величин.

1.2. ЛИНЕЙНЫЕ ХАРАКТЕРИСТИКИ

Звуковое давление. Положим, что давление среды в отсутствие звуковых колебаний равно $p_{a.c.}$, это давление называют *статическим*. При прохождении звуковой волны давление в каждой точке среды будет непрерывно изменяться: в моменты сгущения частиц оно больше статического, а в моменты разрежения — меньше. Разность между мгновенным давлением $p_{a.m.}$ и статическим $p_{a.c.}$ в той же точке среды, т. е. переменная составляющая давления¹⁾, называется *звуковым давлением* $p = p_{a.m.} - p_{a.c.}$

Звуковое давление — величина знакопеременная. Давление p — сила, действующая на единицу площади, т. е. $p = F/S$. Поэтому за единицу давления в системе СИ принимают ньютон на квадратный метр, а в абсолютной CGS системе единиц — дину на квадратный сантиметр²⁾: $1 \text{ Н/м}^2 = 1 \text{ Па (паскаль)} = 10 \text{ дин/см}^2$. В системах связи и вещания имеют дело с звуковыми давлениями, по амплитуде, не превышающими 100 Па, т. е., по крайней мере, в 1000 раз меньше, чем нормальное атмосферное давление.

¹⁾ Часто звуковое давление называют избыточным давлением среды. Такое название ассоциируется с положительным приращением давления.

²⁾ Ранее эту единицу называли «бар».

Скорость колебаний. Если давления неодинаковы в соседних точках среды, то ее частицы стремятся сместиться в сторону минимального давления. При знакопеременной разности давлений возникает колебательное движение частиц среды около своего статического положения. Скорость колебаний этих частиц $v = du/dt$, где u — смещение частиц. Скорость колебаний обычно измеряют в метрах или сантиметрах в секунду. Не следует путать эту скорость со скоростью звука. Скорость звука — постоянная величина для данной среды и метеорологических условий, а скорость колебаний — переменная, причем если частица среды перемещается по направлению распространения волны, то скорость считают положительной, а при обратном перемещении частицы — отрицательной.

Определим связь между звуковым давлением и скоростью колебаний. Возьмем элементарный объем, заключенный между фронтами волн, находящимися на расстоянии Δr друг от друга, с боковыми поверхностями, расположенными

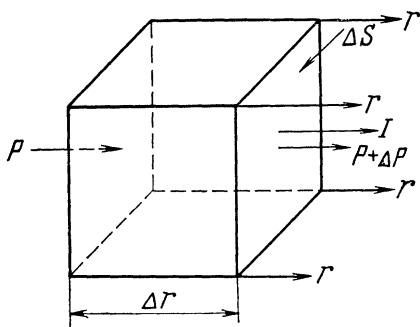


Рис. (1.2). К выводу уравнения движения

вдоль звуковых лучей (рис. 1.2). Как видно из рисунка, среда в этом объеме находится под действием разности давлений p и $p + \Delta p$, следовательно, испытываемая ею сила

$$\Delta F = [p - (p + \Delta p)] \Delta S = -\Delta p \Delta S,$$

где ΔS — площадь, выделенная на поверхности фронта волны. С другой стороны, по второму закону Ньютона сила инерции

$$\Delta F = \Delta m \frac{dv}{dt} = \rho_0 \Delta r \Delta S \frac{dv}{dt},$$

где Δm — масса среды, заключенной в этом объеме; ρ_0 — средняя плотность среды¹⁾.

¹⁾ Так как в вещании и связи имеют дело с изменением плотности среды не более чем на 0,1%, в дальнейшем индекс у ρ опускаем.

Приравнивая обе силы ¹⁾, получаем

$$\Delta p = -\rho \Delta r \frac{dv}{dt}.$$

Так как p и v зависят как от координат, так и от времени, то, переходя к производным, имеем

$$-\frac{1}{\rho} \frac{\partial p}{\partial r} = \frac{\partial v}{\partial t} = \frac{\partial^2 u}{\partial t^2}. \quad (1.1)$$

Это уравнение называется *уравнением движения среды*.

Деформация идеальной (невязкой) газообразной среды, появляющаяся при распространении в ней звуковой волны, является адиабатической, так как звуковые процессы происходят быстро, без теплообмена. Поэтому эти процессы подчиняются закону Бойля-Мариотта с поправкой Пуассона.

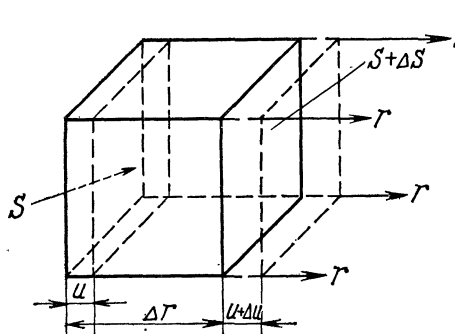


Рис. 1.3. К выводу уравнения непрерывности

величину u , а справа — на величину $u + \Delta u$, тогда при условии непрерывности среды этот объем будет

$$V_2 = V_1 + (S + \Delta S)(u + \Delta u) - Su.$$

Разделим обе части выражения на V_1 и в правой части заменим V_1 на $(S + 0,5\Delta S)\Delta r$.

При пренебрежении членами второго порядка малости получим

$$\frac{V_2}{V_1} = 1 + \frac{\Delta u}{\Delta r} + \frac{u}{S} \frac{\Delta S}{\Delta r}.$$

Заметим, что последний член в этом выражении обусловлен расхождением (*дивергенцией*) фронта волны.

При звуковых колебаниях полное давление газообразной среды

$$p_2 = p_1 + \Delta p_1 = p_{ac} + p,$$

где p_{ac} — статическое давление; p — звуковое давление. Следова-

¹⁾ При условии пренебрежения вязкостью среды, что вполне оправдывается в практических случаях.

тельно, $p_2/p_1 = 1 + p/p_{ac}$. Подставив V_2/V_1 и p_2/p_1 в уравнение закона Пуассона, получим

$$1 + \frac{\Delta u}{\Delta r} + \frac{u}{S} \frac{\Delta S}{\Delta r} = \left(1 + \frac{p}{p_{ac}}\right)^{-1/\gamma}.$$

Как указывалось ранее, $p \ll p_{ac}$, поэтому

$$1 + \frac{\Delta u}{\Delta r} + \frac{u}{S} \frac{\Delta S}{\Delta r} = 1 - \frac{1}{\gamma} \frac{p}{p_{ac}} \quad \text{или} \quad \frac{\Delta u}{\Delta r} + \frac{u}{S} \frac{\Delta S}{\Delta r} = -\frac{p}{\gamma p_{ac}}.$$

Переходя к производным, находим

$$-\frac{p}{\gamma p_{ac}} = \frac{\partial u}{\partial r} + \frac{u}{S} \frac{dS}{dr}. \quad (1.2)$$

Это уравнение называют *уравнением состояния среды*. Если это уравнение продифференцировать дважды по t и переставить порядок дифференцирования, то получим

$$-\frac{1}{\gamma p_{ac}} \frac{\partial^2 p}{\partial t^2} = \frac{\partial}{\partial r} \left(\frac{\partial^2 u}{\partial t^2} \right) + \frac{dS}{S dr} \frac{\partial^2 u}{\partial t^2}.$$

Подставляя в него производную $\partial^2 u / \partial t^2$ из уравнения движения (1.1), получим уравнение для звукового давления

$$\frac{\partial^2 p}{\partial t^2} = \frac{\gamma p_{ac}}{\rho} \left(\frac{\partial^2 p}{\partial r^2} + \frac{dS}{S dr} \frac{\partial p}{\partial r} \right).$$

Заменяя в нем

$$\gamma p_{ac} / \rho = c^2, \quad (1.3)$$

получим

$$\frac{\partial^2 p}{\partial t^2} = c^2 \left(\frac{\partial^2 p}{\partial r^2} + \frac{dS}{S dr} \frac{\partial p}{\partial r} \right). \quad (1.4)$$

Это уравнение называют *волновым уравнением Вебстера*.

Общее решение *волнового уравнения* имеет вид

$$p = A(r) \left[f_1 \left(t - \frac{r}{c} \right) + f_2 \left(t + \frac{r}{c} \right) \right]. \quad (1.5)$$

Если в первую составляющую решения вместо t подставить $t + \Delta t$, то для неизменности аргумента следует вместо r подставить $r + \Delta r = r + c \Delta t$. Следовательно, первая составляющая представляет собой волну, распространяющуюся в сторону положительных значений r , вторая — в обратном направлении. Из тех же данных следует, что c — скорость распространения волны, так как $c = \Delta r / \Delta t$. Таким образом, скорость звука $c = \sqrt{\gamma p_{ac} / \rho}$, т. е. определяется статическим давлением среды и ее плотностью.

Акустическое сопротивление. Разность давлений является причиной движения частиц среды, а разность потенциалов — причиной движения электрических зарядов. Скорость колебаний частиц среды аналогична скорости движения зарядов — силе тока. Аналогично электрическому сопротивлению введено понятие волнового акустического сопротивления. Удельным волновым акустическим сопротивлением называют отношение звукового давления к скорости колебаний. Удельным оно называется потому, что представляет собой сопротивление для единицы площади фронта волны. Для краткости его часто называют акустическим сопротивлением

$$z_a = p/v. \quad (1.6)$$

Акустическое сопротивление определяется прежде всего свойствами среды. В ряде случаев оно зависит от частоты колебаний и от формы фронта волны. В общем виде оно комплексное:

$$z_a = \omega_a + i q_a, \quad (1.7)$$

где ω_a и q_a — активная и реактивная составляющие акустического сопротивления. Наличие реактивной составляющей свидетельствует о том, что между звуковым давлением и скоростью колебаний есть сдвиг фаз. Этот сдвиг определяется из соотношения

$$\operatorname{tg} \psi = q_a/\omega_a. \quad (1.8)$$

1.3. ЭНЕРГЕТИЧЕСКИЕ ХАРАКТЕРИСТИКИ

Интенсивность звука. Акустические колебания — частный случай механических колебаний, поэтому мгновенное значение акустической мощности, как и в механике, определяется произведением мгновенных значений силы F и скорости колебаний v , т. е. $P = Fv$. Если имеется в виду сила, действующая на единицу площади, т. е. давление, то следует говорить об удельной мощности колебаний $P_{уд}$ (называемой вектором Умова), равной произведению звукового давления p и скорости колебаний v , т. е.

$$P_{уд} = pv = Fv/S = P/S.$$

Если в рассматриваемой точке звукового поля мгновенные значения давления и скорости колебаний име-

ют одинаковый знак, то вектор Умова направлен в сторону распространения волны, т. е. энергия движется от источника звука; если они имеют разные знаки, то — против движения волны, т. е. энергия движется к источнику звука. Последнее возможно только при наличии сдвига фаз между звуковым давлением и скоростью колебаний и означает наличие реактивной составляющей мощности. Наибольший интерес представляет среднее значение удельной мощности колебаний $I = \overline{P}_{\text{уд}}$, распространяющейся в положительном направлении, т. е. среднее значение потока энергии через единицу площади, двигающегося от источника звука к возможному приемнику звука. Это среднее значение называют *интенсивностью или силой звука*. Итак, интенсивностью звука называют (среднее) количество звуковой энергии, проходящей в единицу времени через единицу площади, перпендикулярной направлению распространения звуковой волны. В системе СИ единица интенсивности Вт/м^2 , а в абсолютной CGS системе единиц — $\text{эрг/с} \cdot \text{см}^2$: $1 \text{ Вт/м}^2 = 10^3 \text{ эрг/с} \cdot \text{см}^2$. Для периодических и сложных звуков интенсивность выражается формулами:

$$I = \frac{1}{T} \int_0^T p v dt; \quad I = \frac{1}{T_{\text{макс}}} \int_0^{T_{\text{макс}}} p v dt, \quad (1.9)$$

где $T_{\text{макс}} \gg 1/f_{\text{н}}$; $f_{\text{н}}$ — частота наиболее низкочастотной составляющей звука.

Для синусоидальных колебаний интенсивность звука

$$I = \frac{p_m v_m}{2} \cos \psi = \frac{p_m^2}{2 |z_a|} \cos \psi = \frac{p_s^2}{|z_a|} \cos \psi, \quad (1.10)$$

где p_m и v_m — амплитуды звукового давления и скорости колебаний; ψ — сдвиг фаз между ними; p_s — действующее значение звукового давления; $|z_a|$ — модуль акустического сопротивления.

Интенсивность звука представляет собой активную составляющую удельной мощности звуковых колебаний.

Реактивная составляющая мощности колебаний непрерывно колеблется в звуковом поле то в сторону распространения волны, то в обратную. Эта часть мощности колебаний представляет собой запас энергии в зву-

ковом поле аналогично запасу энергии в электрическом и магнитном полях электрического тока.

Плотность энергии. Среднее количество звуковой энергии, приходящееся на единицу объема, называют *плотностью энергии*. Единицей плотности энергии в системе СИ является Дж/м³, а в абсолютной CGS системе — эрг/см³.

Для определения связи между интенсивностью звука и плотностью энергии выделим объем по направлению движения волны (см. рис. 1.2). Энергия, находившаяся в нем к моменту рассмотрения и равная $\Delta W = \varepsilon \Delta V = \varepsilon \Delta r \Delta S$, выйдет из него за время $\Delta t = \Delta r / c$, где c — скорость звука; ε — плотность энергии. Поток этой энергии

$$\Delta W / \Delta t = c \varepsilon \Delta r \Delta S / \Delta r = c \varepsilon \Delta S.$$

Так как согласно определению интенсивность звука $I = \Delta W / \Delta S \Delta t$, то, подставляя в него предыдущее выражение, получаем

$$I = c \varepsilon \Delta S / \Delta S = c \varepsilon,$$

откуда

$$\varepsilon = \Delta W / \Delta V = I / c, \quad (1.11)$$

а с учетом (1.10) находим

$$\varepsilon_a / \varepsilon_b = I_a / I_b = p_a^2 / p_b^2. \quad (1.12)$$

1.4. ПЛОСКАЯ ВОЛНА

Фронт плоской волны представляет собой плоскость. Согласно определению фронта волны звуковые лучи пересекают его под прямым углом, поэтому в плоской волне они параллельны между собой. Так как поток энергии при этом не расходится, интенсивность звука не должна была бы уменьшаться с удалением от источника звука. Тем не менее она уменьшается из-за молекулярного затухания, вязкости среды, запыленности ее, рассеяния и т. п. потерь. Однако эти потери так малы, что с ними можно не считаться при распространении волны на небольшие расстояния. Поэтому обычно полагают, что интенсивность звука в плоской волне не зависит от расстояния до источника звука.

Поскольку $I = \text{const}$, то амплитуды звукового давления и скорости колебаний тоже не зависят от этого расстояния: $p_m = \text{const}$; $v_m = \text{const}$.

Выведем основные уравнения для плоской волны. Уравнение (1.4) имеет вид $\partial^2 p / \partial t^2 = c^2 \partial^2 p / \partial r^2$, так как $dS/dr = 0$. Частное решение волнового уравнения для плоской волны, распространяющейся в положительном направлении, имеет вид $p = p_m e^{i\omega(t - \frac{r}{c})}$, где p_m — амплитуда звукового давления; ω — угловая частота колебаний; $\omega/c = \nu = 2\pi/\lambda$ — волновое число.

Подставляя звуковое давление в уравнение движения (1.1) и интегрируя во времени, получим скорость колебаний $v = v_m e^{i\omega(t - \frac{r}{c})}$, где $v_m = p_m / \rho c$ — амплитуда скорости колебаний.

Из этих выражений находим удельное акустическое сопротивление (1.6) для плоской волны:

$$z_a = p/v = p_m/v_m = \rho c. \quad (1.13)$$

Для нормального атмосферного давления и температуры 20°C акустическое сопротивление $\rho c = 412 \text{ кг/м}^2 \cdot \text{с} = 41,2 \text{ г/см}^2 \cdot \text{с}$. Акустическое сопротивление для плоской волны определяется только скоростью звука и плотностью среды и является активным, вследствие чего давление и скорость колебаний находятся в одинаковой фазе, т. е. $\psi = 0$, поэтому интенсивность звука [см. ф-лу (1.10)] $I = 0,5 \times p_m v_m = p_a v_a$, где p_a и v_a — действующие значения звукового давления и скорости колебаний. Подставляя в это выражение (1.13), получаем наиболее часто используемое выражение для определения интенсивности звука

$$I = p_a^2 / \rho c. \quad (1.14)$$

1.5. СФЕРИЧЕСКАЯ ВОЛНА

Фронт такой волны представляет собой сферическую поверхность, а звуковые лучи согласно определению фронта волны совпадают с радиусами сферы (рис. 1.4). В результате расхождения волн интенсивность звука убывает с удалением от источника. Так как потери энергии в среде малы, как и в случае плоской волны, то при распространении волны на небольшие расстояния с ними можно не считаться. Поэтому средний поток энергии через сферическую поверхность с радиусом r_a (рис. 1.4) будет тот же самый, что и через любую другую сферическую поверхность с большим ра-

диусом r_b , если в промежутке между ними нет источника или поглотителя энергии. Следовательно, мощность звуковой волны

$$P_a = 4\pi r_a^2 I_a = 4\pi r_b^2 I_b, \quad (1.15)$$

где I_a и I_b — интенсивность звука для радиусов r_a и r_b . Отсюда получим квадратичный закон убывания интенсивности звука в сферической волне

$$I_a/I_b = r_b^2/r_a^2 \text{ или } I = I_1/r^2, \quad (1.15a)$$

где I_1 — интенсивность на расстоянии единицы длины (обычно 1 м) от центра сферы.

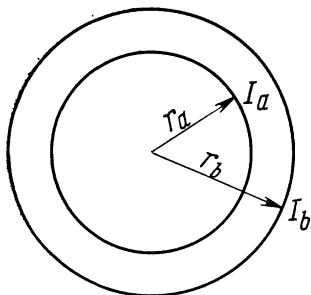


Рис. 1.4. Сферическая волна

Волновое уравнение для этого случая может быть получено из (1.4) путем подстановки в него выражения для поверхности шарового сектора $S = \Omega r^2$, где Ω — телесный угол сектора, а r — расстояние от центра сферической волны.

Так как $dS/Sdr = 2\Omega r/\Omega r^2 = 2/r$, то волновое уравнение (1.4) будет

$$\frac{\partial^2 p}{\partial t^2} = c^2 \left(\frac{\partial^2 p}{\partial r^2} + \frac{2}{r} \frac{\partial p}{\partial r} \right).$$

Заменяв в нем переменную p на pr , получим волновое уравнение в более наглядной форме:

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

Частное решение этого уравнения для расходящейся волны (распространяющейся в положительном направлении) имеет вид

$$p = \frac{p_1}{r} e^{i\omega \left(t - \frac{r}{c} \right)} = p_m e^{i\omega \left(t - \frac{r}{c} \right)}, \quad (1.16)$$

$$\text{где } p_m = p_1/r; \quad (1.16a)$$

p_1 — амплитуда звукового давления на расстоянии единицы длины от центра сферы.

Как видно из формулы, амплитуда звукового давления уменьшается с увеличением расстояния от центра источника сферической волны по гиперболическому закону.

Подставляя выражение (1.16) в уравнение движения (1.1) и интегрируя его по времени, получаем уравнение для скорости колебаний в сферической волне:

$$v = \frac{p_1}{r \rho c} \left(1 + \frac{c}{i \omega r} \right) e^{i \omega \left(t - \frac{r}{c} \right)} = v_m e^{i \left[\omega \left(t - \frac{r}{c} \right) - \psi \right]}. \quad (1.17)$$

Из этого выражения следует, что скорость колебаний не совпадает по фазе с звуковым давлением (1.16). Из (1.16) и (1.17) получаем акустическое сопротивление для сферической волны

$$z_a = p/v = \rho c i \omega r / (c + i \omega r). \quad (1.18)$$

Как видим, акустическое сопротивление содержит активную и реактивную составляющие [см. (1.7)]:

$$\omega_a = \rho c \frac{\omega^2 r^2}{c^2 + \omega^2 r^2} \quad \text{и} \quad q_a = \rho c \frac{\omega r c}{c^2 + \omega^2 r^2}. \quad (1.18a)$$

Модуль этого сопротивления

$$|z_a| = \frac{p_m}{v_m} = \rho c \frac{\omega r}{\sqrt{c^2 + \omega^2 r^2}} = \rho c \cos \psi, \quad (1.18b)$$

где ψ — сдвиг фаз между звуковым давлением и скоростью колебаний (1.8):

$$\operatorname{tg} \psi = q_a / \omega_a = c / \omega r = \lambda / 2\pi r. \quad (1.19)$$

Из выражения (1.18б) следует, что акустическое сопротивление в сферической волне по модулю никогда не превышает сопротивления в плоской волне [см. (1.13)]. А из выражения (1.19) следует, что чем больше отношение длины волны к ее радиусу (т. е. расстоянию от центра источника звука), тем ближе сдвиг фаз к 90° ; с уменьшением этого отношения сдвиг фаз стремится к нулю, т. е. сферическая волна приближается к плоской. Например, для частоты 100 Гц (длина волны $\lambda = 340/100 = 3,4$ м) при расстоянии от центра источника звука 0,25 м сдвиг фаз получается равным 65° , а для частоты 5000 Гц ($\lambda = 6,8$ см) при расстоянии 1 м сдвиг фаз получается около $0,5^\circ$.

Интенсивность звука для синусоидальных колебаний в сферической волне определяется выражением (1.10) с учетом (1.18б):

$$I = \frac{p_a^2}{|z_a|} \cos \psi.$$

Если в это выражение подставить значение $|z_a|$ из (1.18б), получим, что интенсивность колебаний

$$I = p_m^2 / 2\rho c = p_s^2 / \rho c. \quad (1.20)$$

Подставляя в (1.20) амплитуду звукового давления из (1.16а) и учитывая (1.15а), получаем

$$I = p_{13}^2 / \rho c r^2 = I_1 / r^2, \quad (1.21)$$

где $I_1 = p_{13}^2 / \rho c$.

1.6. ЦИЛИНДРИЧЕСКАЯ ВОЛНА

Для цилиндрической волны интенсивность звука можно определить при условии, что поток энергии не расходится вдоль образующей цилиндра. Аналогично предыдущему случаю (см. рис. 1.4) для высоты цилиндра h :

$$P_a = 2\pi h r_a I_a = 2\pi h r_b I_b, \text{ т. е.}$$

$$I_a / I_b = r_b / r_a \quad (1.22)$$

или $I = I_1 / r$, следовательно, для цилиндрической волны интенсивность звука обратно пропорциональна расстоянию от оси цилиндра.

Волновое уравнение (1.4) в этом случае имеет вид

$$\frac{\partial^2 p}{\partial t^2} = c^2 \left(\frac{\partial^2 p}{\partial r^2} + \frac{1}{r} \frac{\partial p}{\partial r} \right),$$

так как $dS/Sdr = 1/r$. Амплитуда звукового давления изменяется по закону функций Бесселя первого и второго рода (см. [2], с. 73).

В заключение объясним причину появления сдвига фаз между звуковым давлением и скоростью колебаний. Сдвиг фаз появляется только в тех случаях, когда звуковые лучи расходятся или сходятся. В случае плоской волны звуковые лучи идут параллельно, поэтому каждый слой среды, заключенный между соседними фронтами волны, отстоящими на одинаковом расстоянии друг от друга, имеет одинаковую массу. Массы этих слоев можно представить в виде цепочки одинаковых шаров (рис. 1.5). Если толкнуть первый шар, то он дойдет до второго и сообщит ему поступательное движение, а сам остановится, затем также будет приведен в движение третий шар, а второй остановится и так далее, т. е. энергия, сообщенная первому шару, будет передаваться последовательно все дальше и дальше. Реактивная составляющая мощности звуковой волны отсутствует. Рассмотрим случай расходящейся волны, когда каждый последующий слой имеет большую массу. Масса шара будет увеличиваться с увеличением его номера, причем сначала

быстро, а потом все медленнее и медленнее (рис. 1.6). Первый шар после столкновения отдает второму только часть энергии и движется назад, второй приведет в движение третий, но затем тоже пойдет назад. Таким

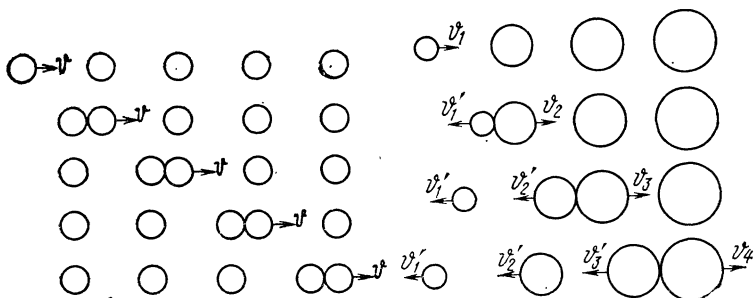


Рис. 1.5. Передача энергии в плоской волне

Рис. 1.6. Передача энергии в сферической волне

образом, часть энергии будет отражаться, т. е. появляется реактивная составляющая мощности, которая определяет реактивную составляющую акустического сопротивления и появление сдвига фаз между давлением и скоростью колебаний.

Шары, удаленные от первого, будут передавать почти всю энергию шарам, находящимся впереди, так как их массы будут почти одинаковыми.

Если массу каждого шара взять равной массе воздуха, заключенной между фронтами волны, находящимися друг от друга на расстоянии полуволны, то чем больше длина волны, тем резче будет изменяться масса шаров по мере увеличения их номеров, тем большая часть энергии будет отражаться при столкновении шаров и тем больший будет сдвиг фаз (1.19).

Для малых длин волн массы соседних шаров отличаются незначительно, поэтому отражение энергии будет меньшим, что и следует из выражения (1.19).

Глава 2

ОСНОВНЫЕ СВОЙСТВА СЛУХА

2.1. СТРОЕНИЕ УХА

Все передачи по системам вещания и связи предназначены для приема их человеком. Поэтому для правиль-

ного проектирования и эксплуатации этих систем необходимо знать свойства слуха человека, тем более что органы слуха являются своеобразным приемником звука.

Ухо состоит из трех частей: наружного, среднего и внутреннего. Две первые части уха служат передаточным устройством для подведения звуковых колебаний к слуховому анализатору, находящемуся во внутреннем ухе — улитке. Это передаточное устройство служит рычажной системой, превращающей воздушные колебания с большой амплитудой скорости колебаний и небольшим давлением в механические колебания с малой амплитудой скорости и большим давлением. Коэффициент трансформации в среднем равен 50—60 (см. [4], с. 15). Кроме того, передаточное устройство вносит коррекцию в частотную характеристику следующего звена восприятия — улитки.

Продольный и поперечный разрезы улитки даны на рис. 2.1, причем продольный разрез дан для улитки в развернутом виде, при этом опущены некоторые дета-

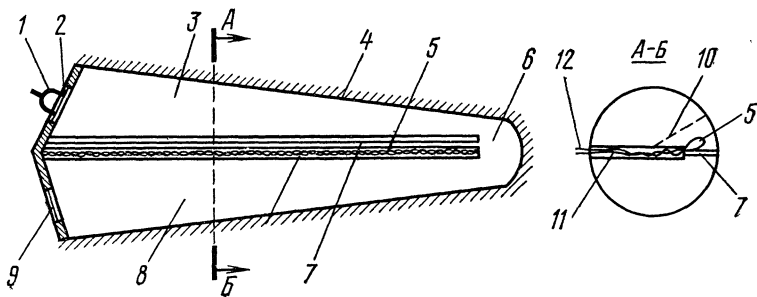


Рис. 2.1. Строение улитки:

1 — косточка («стремечко»); 2 — мембрана овального окна; 3 — вестибулярный ход; 4 — костная оболочка; 5 — орган Корти; 6 — геликотрема; 7 — основная мембрана; 8 — барабанный ход; 9 — мембрана круглого окна; 10 — Рейснера мембрана; 11 — костная перегородка; 12 — слуховой нерв

ли, без которых можно обойтись при рассмотрении процессов восприятия звука. Улитка сообщается со средним ухом через две мембраны, закрывающие отверстия овального 2 и круглого 9 окон, находящихся у основания улитки. К мембране овального окна прикреплено стремечко 1. Внутреннее пространство улитки заполнено жидкостью — лимфой. Вестибулярный 3 и барабанный 8 ходы (каналы) соединяются между собой у вер-

шины улитки через небольшое отверстие, называемое геликотремой 6. По всей длине улитки от основания ее до геликотремы расположена основная мембрана 7, состоящая из нескольких тысяч волокон, натянутых поперек улитки. Волокна слабо связаны друг с другом и поэтому могут колебаться независимо. Вдоль основной мембраны расположен орган Корти 5, содержащий около 22 000 чувствительных нервных окончаний в виде волосковых клеток. Клетки расположены как вдоль основной мембраны на некотором расстоянии от нее, так и по глубине органа Корти в несколько рядов (см. [4], с. 10—15).

2.2. ВОСПРИЯТИЕ ПО ЧАСТОТЕ

При звуковых колебаниях стремечко приводит в движение мембрану овального окна. Под действием этих колебаний мембрана круглого окна колеблется в такт с мембраной овального, так как лимфа практически несжимаема. Лимфа колеблется касательно к поверхности основной мембраны, поперек к ее волокнам. На колебания лимфы отзываются (резонируют) в зависимости от частоты колебаний только вполне определенные волокна. Около геликотремы расположены наиболее длинные волокна, резонирующие на низких частотах, а в основании улитки (между овальным и круглым окнами) расположены наиболее короткие волокна, и они резонируют на высоких частотах. Сложный звук, состоящий из нескольких составляющих, далеко отстоящих по частоте друг от друга, возбуждает несколько групп волокон (в соответствии с частотами составляющих). Таким образом, основная мембрана служит частотным анализатором. Согласно теории Флетчера¹⁾ резонансная частота каждого из волокон определяется не только параметрами волокна как натянутой струны, но и массой лимфы, соколеблющейся с волокном. Эта масса определяется расстоянием резонирующего волокна от овального окна. Поэтому на низких частотах в колебаниях участвует большая масса лимфы, а на высоких — меньшая. На рис. 2.2 приведена эквивалентная электрическая модель слухового анализатора. Ток в каждом из параллельных звеньев (которые по параметрам эквивалентны волокнам основной мембраны) соответствует скорости колебаний

¹⁾ Далее все основано на теории Флетчера (см. [4], гл. 7, § 5).

волокна, последовательные индуктивности L_K — массе соколеблющейся лимфы.

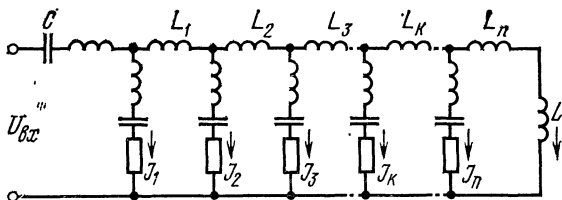


Рис. 2.2. Эквивалентная электрическая схема улитки:

C — эквивалент мембран овального и круглого окон; L — эквивалент геликотремы; L_k — эквивалент массы лимфы; J_k — скорость колебаний волокон

Границы воспринимаемого слухом частотного диапазона довольно широки (20—20 000 Гц). Избирательность слухового анализатора невелика, что следует из рис. 2.3, на котором приведено несколько кривых изби-

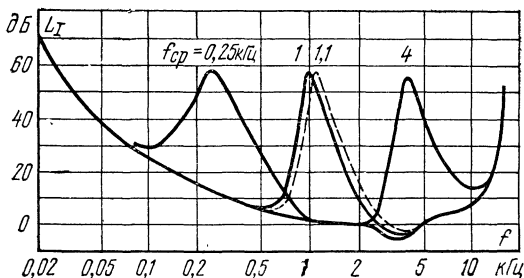


Рис. 2.3. Кривые избирательности слуха

рательности слуха для разных частотных диапазонов. Полосы пропускания резонаторов слухового анализатора, определенные на уровне 0,71 от максимального значения, составляют на частотах 250, 1000 и 4000 Гц около 35, 50 и 200 Гц соответственно. Эти полосы пропускания носят название *критических полосок слуха*¹⁾.

Вследствие ограниченного числа нервных окончаний, расположенных вдоль основной мембраны, человек

¹⁾ По данным Цвиккера, критические полоски слуха (названные им «частотными группами») в 3—4 раза шире, чем по данным Флетчера. Ширина частотных групп приближается в среднем к ширине третьоктавных полос (25% от средней частоты полосы).

запоминает во всем диапазоне частот не более 250 градаций частоты, причем число этих градаций резко уменьшается с уменьшением интенсивности звука и в среднем составляет около 150, т. е. соседние градации в среднем отличаются друг от друга по частоте не менее¹⁾ чем на 4%, что в среднем приближенно равно ширине критических полосок слуха. Поэтому фильмы, снятые для кино со скоростью 24 кадров в секунду, можно демонстрировать на телевидении со скоростью 25 кадров в секунду и наоборот. При этом самые лучшие музыканты с абсолютным слухом не замечают разницы в звучании, так как расхождение в частотах колебаний не превосходит 4%. При расхождении на два кадра в секунду эту разницу уже можно обнаружить. При непосредственном сравнении двух тонов слушатель может обнаружить разницу в частотах тонов по их биениям до 0,5 Гц.

Звуки, имеющие широкополосные сплошные спектры, например шумы, возбуждают волокна всей основной мембраны. Вследствие слабой избирательности слуха происходит интегрирование этого спектра в каждой из критических полосок слуха, т. е. слух как бы превращает сплошной спектр в дискретный, состоящий из конечного числа составляющих по числу критических полосок слуха, охватывающих частотный спектр этого шума.

Введено понятие *высоты звука*, под которой подразумевают субъективную оценку восприятия звука по частотному диапазону. Так как ширина критической полоски слуха на средних и высоких частотах примерно пропорциональна частоте, то субъективный масштаб восприятия по частоте близок к логарифмическому закону. Поэтому за объективную единицу высоты звука, приближенно отражающей субъективное восприятие, принята октава: двукратное отношение частот (1; 2; 4; 8; 16 и т. д.). Октаву делят на части: полуоктавы и третьоктавы. Для последних стандартизован следующий ряд частот: 1; 1,25; 1,6; 2; 2,5; 3,15; 4; 5; 6,3; 8; 10, являющихся границами третьоктав. Если эти частоты расположить на равных расстояниях по оси частот, то получится логарифмический масштаб. Исходя из этого, для приближения к субъективному масштабу все

¹⁾ Человек может обнаружить изменение частоты до 0,3% (на средних частотах) при условии плавного изменения частоты. Причины этого расхождения объяснены далее (см. § 2.9).

частотные характеристики устройств передачи звука строят в логарифмическом масштабе. Для более точного соответствия слуховому восприятию звука по частоте для этих характеристик принят особый, субъективный масштаб — почти линейный до частоты 1000 Гц и логарифмический выше этой частоты. Введены единицы высоты звука под названием «мел» и «барк» (100 мел=1 барку). В общем случае высота сложного звука не поддается точному расчету.

2.3. ПОРОГ СЛЫШИМОСТИ

Если волокно основной мембраны при своих колебаниях недостает до ближайшей волосатой клетки (см. I рис. 2.4, на котором утрировано представлены волокна основной мембраны и клеток органа Корти), то человек не воспринимает звук. При увеличении амплитуды колебаний волокна, как только оно коснется ближайшей клетки (см. II рис. 2.4), произойдет раздражение нервного окончания, которое сразу же начнет посылать электрические импульсы в слуховой центр мозга; звук

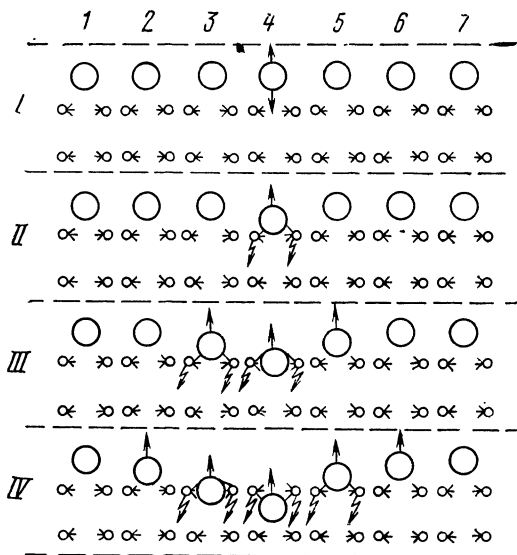


Рис. 2.4. Возбуждение нервных окончаний при колебаниях волокон: I — нет возбуждения (интенсивность звука ниже порога слышимости); II — возбуждение на пороге слышимости; III и IV — следующие ступени возбуждения

будет услышан. Этот скачкообразный переход из слышимого состояния в неслышимое и обратно называется *порогом слышимости*. Заметим, что абсолютная величина слухового ощущения на пороге слышимости невелика, но имеет конечное значение.

Порогом слышимости также называют наименьшее значение раздражающей силы чистого тона¹⁾, которое вызывает ощущение звука. Под раздражающей силой подразумевают интенсивность звука или звуковое давление.

Порог слышимости зависит от частоты: при 1000 Гц он равен около 10^{-12} Вт/м². На рис. 2.5 приведены зависимости порогов слышимости от частоты, причем по оси ординат отложена интенсивность звука в логарифмическом масштабе. В сторону низких частот порог слышимости резко повышается (начиная с частоты 500 Гц), т. е. для появления слухового ощущения на низких частотах необходима более высокая интенсивность, чем, скажем, на частоте 1000 Гц. Так, на частоте 100 Гц порог слышимости по интенсивности в 10^4 раз выше, чем на частоте 1000 Гц. В сторону высоких частот порог слышимости сначала снижается (чувствительность слуха повышается) в 8—10 раз по интенсивности (на частоте 2000—4000 Гц), а затем начинает повышаться так же, как и на низких частотах.

В ряде учебных пособий и справочников даются различные абсолютные значения и частотные зависимости порога слышимости. Эта разница обусловлена различием в методах измерения порога слышимости. На рис. 2.5 приведены пороги для одноухого 1 и двухухого

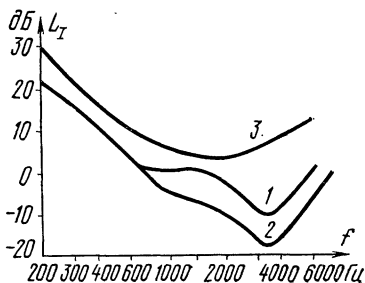


Рис. 2.5. Пороги слышимости: 1 — порог по свободному полю (звуковое давление измеряли в точке поля до размещения в ней головы) при одноухом слушании; 2 — то же, при двухухом слушании; 3 — порог по давлению (давление измеряли около ушной раковины)

слушания. Эта разница обусловлена различием в методах измерения порога слышимости. На рис. 2.5 приведены пороги для одноухого 1 и двухухого

¹⁾ Тонюм называют гармоническое колебание, в общем случае состоящее из ряда гармоник; чистый тон — простое синусоидальное колебание. В дальнейшем, если не оговорено, под тоном будем подразумевать чистый тон.

го 2 слушания; пороги, измеренные по давлению около ушной раковины 3 (для слушания на телефоне) и по давлению в точке звукового поля 1 (до введения туда головы человека, т. е. для слушания через громкоговоритель); существуют пороги, измеренные для фронтального падения звуковой волны (для приема звука спереди) и при всестороннем ее падении (при слушании в помещении).

2.4. ВОСПРИЯТИЕ ПО АМПЛИТУДЕ

При увеличении интенсивности звука выше пороговой, пока амплитуда колебаний волокон не увеличится настолько, чтобы коснуться еще одной клетки, слуховое ощущение остается постоянным. Как только одно из волокон прикоснется к следующей клетке (см. III рис. 2.4), слуховое ощущение еще раз повысится скачком, так как и эта клетка будет посылать электрические импульсы в слуховой центр. По мере увеличения интенсивности звука расширяется зона возбуждения основной мембраны — начинают колебаться и соседние волокна, также возбуждающие нервные клетки одну за другой. Каждая из них будет посылать свои импульсы в слуховой центр. Слуховое ощущение при этом будет нарастать скачками по мере увеличения числа возбужденных клеток. Такие скачки называют *порогом различения интенсивности*. Число этих скачков на средних частотах не превышает 250, причем на низких и высоких частотах это число резко уменьшается и в среднем по частотному диапазону составляет около 150. Наконец, при дальнейшем увеличении интенсивности появляется ощущение боли — наступает *болевого порог (порог осязания)*. Болевой порог соответствует очень большой интенсивности. Наибольшая величина болевого порога наблюдается на частоте 800 Гц (около 1 Вт/м^2). В сторону низких и высоких частот он медленно снижается.

Таким образом, и по амплитуде имеет место дискретное восприятие звука. Учитывая дискретность по частоте и по амплитуде, насчитывают во всей области слухового восприятия около 22 000 элементарных градаций, что соответствует числу нервных окончаний.

Установлено, что для средних и высоких интенсивностей звука скачок получается при одинаковых относи-

тельных изменениях интенсивности. Вебер и Фехнер так сформулировали этот закон: одинаковые относительные изменения раздражающей силы вызывают одинаковые абсолютные изменения слухового ощущения, т. е. слуховое ощущение пропорционально логарифму раздражающей силы

$$E = a \lg I + C. \quad (2.1)$$

На пороге слышимости, т. е. при $I = I_{п.с.}$ слуховое ощущение равно нулю, поэтому имеем

$$0 = a \lg I_{п.с.} + C \text{ или } C = -a \lg I_{п.с.},$$

откуда получаем

$$E = a \lg (I/I_{п.с.}).$$

Для оценки величины слухового ощущения была предложена единица под названием «бел» ($a=1$). Эта единица соответствует десятикратному отношению интенсивностей, поэтому была введена еще и более мелкая единица — децибел (дБ), равная 0,1 бела. В этом случае слуховое ощущение в децибелах

$$E = 10 \lg (I/I_{п.с.}). \quad (2.2)$$

Так как диапазон изменения интенсивностей от минимального порога слышимости до максимального болевого порога составляет 10^{13} раз, т. е. слуховое ощущение изменяется на 130 дБ, то величина элементарного скачка ощущения в среднем по диапазону амплитуд равна 0,8 дБ, т. е. соответствует изменению интенсивности звука в 1,2 раза. На самом деле элементарные скачки ощущения для средних и высоких значений слуховых ощущений получаются при изменении интенсивности в 1,10 раза, т. е. скачки ощущения равны 0,4 дБ. Для низкого слухового ощущения скачки получаются равными 2—3 дБ.

2.5. УРОВНИ

Вследствие логарифмического закона восприятия и широкого диапазона интенсивностей слышимых звуков для объективной оценки введено понятие уровня интенсивности

$$L_I = 10 \lg (I/I_0). \quad (2.3)$$

За нулевой уровень условились принимать интенсивность I_0 , близкую к пороговой интенсивности для нормального слуха на частоте 1000 Гц. Эта интенсивность приблизительно равна 10^{-12} Вт/м². Следовательно, болевой порог интенсивности находится около 120 дБ.

В соответствии с квадратичным соотношением между интенсивностью звука и звуковым давлением (1.12) уровень звукового давления

$$L_p = 20 \lg (p/p_0), \quad (2.4)$$

где p_0 — звуковое давление на нулевом уровне, определяемое равенством (1.20) для $\rho c = 400$ кг/с·м²; $10^{-12} = p_0^2/400$, т. е. $p_0 \approx 2 \cdot 10^{-5}$ Па.

Плотность энергии прямо пропорциональна интенсивности [см. (1.11)], поэтому ее уровень

$$L_e = 10 \lg (\epsilon/\epsilon_0), \quad (2.5)$$

где ϵ_0 — плотность энергии, соответствующая нулевому уровню и определяемая из равенства (1.11) $\epsilon_0 \cdot 333 = 10^{-12}$, т. е. $\epsilon_0 \approx 3 \cdot 10^{-15}$ Дж/м³.

Из этих определений следует, что уровни (2.3), (2.4) и (2.5) практически равны друг другу при $\rho c = 400$ кг/с·м² и $c = 333$ м/с. При таких условиях можно говорить об уровне звука безотносительно к параметрам звукового поля. Но так как акустическое сопротивление и скорость звука в зависимости от свойств среды и формы фронта волны могут значительно отличаться соответственно от 400 кг/с·м² и 333 м/с, то в общем случае эти уровни могут быть неодинаковыми¹⁾. Однако для практики их можно считать совпадающими, поэтому в дальнейшем их различать не будем.

2.6. ГРОМКОСТЬ И УРОВЕНЬ ГРОМКОСТИ ЗВУКА

Уровень интенсивности характеризует звук только с физической стороны. Из предыдущего следует, что звуки разных частот при одном и том же уровне интенсивности могут оказаться и слышимыми и неслышимыми. Для оценки субъективного восприятия звука по уровню введен ряд характеристик. Одной из таких харак-

¹⁾ Все измерители уровня обычно градуируют по звуковому давлению, и поэтому результаты измерений выражают в величинах уровней звукового давления

теристик служит уровень слухового ощущения (или просто *уровень ощущения*), определяемый законом Вебера-Фехнера. Согласно определению (2.2) уровень ощущения

$$E = 10 \lg \frac{I}{I_{п.с}} = 10 \lg \frac{I}{I_0} - 10 \lg \frac{I_{п.с}}{I_0} = L - L_{п.с}, \quad (2.2a)$$

где $L_{п.с}$ — уровень интенсивности звука на пороге слышимости.

Таким образом, уровень ощущения представляет собой уровень интенсивности звука, находящийся над уровнем порога слышимости на той же частоте. Он учитывает зависимость порога слышимости от частоты и, тем самым, более точно характеризует субъективное восприятие звука на разных частотах, чем уровень интенсивности.

При уровнях гораздо выше уровня порога слышимости этот уровень все же неточно характеризует восприятие звука. Поэтому были введены понятия *громкости* и *уровня громкости*, с помощью которых можно получить более точную оценку субъективного восприятия звука.

Человек может довольно точно установить равенство громкостей двух звуков любого частотного состава. Это свойство слуха использовали для введения понятия уровня громкости. За эталон уровня громкости принимают уровень интенсивности чистого тона с частотой 1000 Гц. Единица уровня громкости называется фоном. Итак уровень громкости в фонах на частоте 1000 Гц равен уровню его интенсивности в децибелах. За уровень громкости (в фонах) любого другого звука $L_{G,x}$ принимают уровень интенсивности в децибелах L_I равногромкого с ним тона с частотой 1000 Гц, т. е. считают

$$L_{G,x [\text{фон}]} = L_{I [1000 \text{ Гц, дБ}]} \text{ при } G_x = G_{[1000 \text{ Гц}]},$$

где G — громкость звука.

Чтобы определить уровень громкости какого-либо звука, достаточно взять тон с частотой 1000 Гц и изменять его уровень до тех пор, пока его громкость не будет одинаковой с громкостью определяемого звука. Уровень интенсивности эталонного тона при этом численно будет равен уровню громкости определяемого звука.

На рис. 2.6 приведены *кривые равной громкости*, полученные при сравнении тонов разных частот с эта-

лонным. Они определены для всего диапазона слухового восприятия по частоте и уровню. Как видим, по мере повышения уровня громкости кривые равной громкости спрямляются. Например, для нулевого уровня громкости (на пороге слышимости) уровень интенсивности тона с частотой 100 Гц равен 38 (см. рис. 2.6).

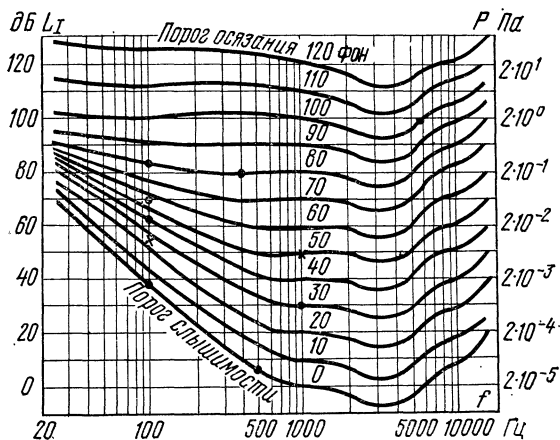


Рис. 2.6. Кривые равной громкости. Цифры на кривых означают уровень громкости в фонах

а тона с частотой 500 Гц — 7 дБ. Для получения уровня громкости, равного 80 фон (см. рис. 2.6, кривая 80), уровень интенсивности тех же тонов должен быть взят равным соответственно 83 и 80 дБ, т. е. оба тона будут практически одинаково громки, если они будут иметь одинаковые уровни интенсивности. Следовательно, на высоких уровнях громкости слух имеет частотную характеристику чувствительности, близкую к равномерной, поэтому физическая и субъективная характеристики будут близки друг к другу. Это обстоятельство привело к двум практическим рекомендациям.

Допустим, что слушание радиопередачи идет на уровне 80 фон, при этом все частотные составляющие передачи при их одинаковой интенсивности звучат почти одинаково громко. Теперь уменьшим усиление (приемника) на 30 дБ, тем самым уровень интенсивности звучания снизится на 30 дБ. Вследствие этого частотные составляющие, находящиеся около частоты 1000 Гц, будут иметь уровень громкости 50 фон, а составляющие, находящиеся около частоты 100 Гц, сни-

зятся по уровню громкости до значения, равного 22 фон (см. крестики рис. 2.6); они будут звучать менее громко, чем средние частоты. Чтобы звучание низких частот осталось таким же, как и звучание средних, необходимо скорректировать частотную характеристику приемника путем подъема его чувствительности на низких частотах (на 17—20 дБ на частоте 100 Гц). В хороших радиоприемниках при уменьшении коэффициента усиления автоматически корректируется величина усиления на низких частотах (происходит увеличение коэффициента усиления).

При измерении высоких уровней громкости шумов чувствительность измерителей (шумомеров) должна быть почти не зависящей от частоты, что соответствует субъективному восприятию звука по громкости. При измерении низких уровней громкости показания шумомера будут близкими к субъективным только, если при этом будет учтено то обстоятельство, что слух слабее воспринимает низкие частоты, чем средние при низких уровнях громкости. Поэтому в шумомерах при измерении низких уровней громкости вводится коррекция путем снижения коэффициента усиления на низких частотах. Так, если измеряют уровни громкости около 30 фон, то на частоте 100 Гц по сравнению с частотой 1000 Гц должно быть снижение на $58 - 30 = 28$ дБ (см. рис. 2.6, кривая 30). Вследствие этого в шумомерах обычно есть три коррекции низких частот: *A B C* для уровней громкости 40, 70 и выше 85 фон соответственно. При этом измеренные уровни громкости более точно соответствуют субъективной оценке громкости.

Уровни громкости характеризуют субъективное восприятие звука, но их масштаб не соответствует масштабу субъективного ощущения громкости. Так, увеличение уровня громкости на 10 фон для широкого диапазона уровней соответствует субъективному увеличению громкости вдвое (человек довольно точно может определить удвоение громкости. Это свойство слуха было использовано для определения зависимости громкости от ее уровня). Для средних и высоких уровней L_G громкость G может быть приближенно определена из формулы ¹⁾ (для $L_G > 40$ фон)

$$G = 2^{0.1(L_G - 40)}$$

¹⁾ Это соотношение принято в качестве международного стандарта.

При этом громкость измеряют в сонах (1 сон соответствует громкости звука с уровнем громкости 40 фон). Более подробно это описано в [2] (§ 1.5).

Для иллюстрации в табл. 2.1 приведены уровни громкости в фонах и громкости в сонах для ряда типовых звучаний.

Таблица 2.1

Источник (место) шума или звука	Громкость, сон	Уровень громкости, фон
Кабина самолета	600—800	125—130
Котельный цех	100—150	100—105
Фортиссимо оркестра	50—100	90—100
Поезд метро	30—45	85—90
Зал при массовых сценах	22—45	80—90
Телеграфный зал	16—22	75—80
Оратор на расстоянии 1 м	10—22	70—80
Шумное собрание	7—10	65—70
Обычный разговор на расстоянии 1 м	3—5	55—60
Театральный зал	1—2	40—50
Пианиссимо оркестра	0,6—1	35—40
Библиотека	0,2—0,4	25—30

2.7. ЭФФЕКТ МАСКИРОВКИ

Известно, что в тишине можно отлично слышать писк комара и жужжание мухи, тикание часов и т. п., а в шуме и при помехах можно не услышать даже громкий звонок, т. е. при шуме и помехах порог слышимости для слабого звука увеличивается. Это повышение порога слышимости называют *маскировкой*. Величина маскировки определяется по формуле

$$M = L_{п.с.ш} - L_{п.с.т},$$

где $L_{п.с.т}$ и $L_{п.с.ш}$ — уровни порогов слышимости в тишине и в шумах.

При увеличении порога слышимости соответственно изменяется и уровень ощущения E . При интенсивности I в условиях приема в шумах [см. (2.2)] для уровня ощущения звука имеем

$$E_{ш} = 10 \lg \frac{I}{I_{п.с.ш}} = L - L_{п.с.т} - M = E_t - M, \quad (2.6)$$

где $I_{п.с.ш}$ — интенсивность на пороге слышимости при наличии помех и шумов; E_t — уровень ощущения того же звука в тишине.

Таким образом, при изменении уровня помех даже при неизменном уровне интенсивности звука уровень ощущения изменяется.

Это явление объясняется тем, что при действии помехи, имеющей частотные составляющие в той же области, что и принимаемый звук, а по уровню интенсивности значительно превышающей уровень принимаемого звука, нервные окончания уже возбуждены и посылают импульсы в слуховой центр, соответствующие помехе. Из-за дискретности восприятия слабый принимаемый звук ничего не может добавить к этому восприятию, и поэтому мы его не слышим. Если бы помеха была убрана, то он смог бы возбудить нервные окончания соответственно своему уровню и частотным составляющим. Неясное ощущение принимаемого звука получается тогда, когда интенсивность слабого звука, добавляясь к интенсивности помехи в этой же критической полоске слуха, создает суммарную интенсивность, достаточную для скачка на следующую градацию уровня [т. е. при увеличении интенсивности в среднем на 20% (см. § 2.4)]. Четкое же ощущение принимаемого звука получается только тогда, когда уровень принимаемого звука превышает уровень составляющих помехи, находящихся в той же критической полоске слуха, что и принимаемый звук.

Низкочастотные тоны сильнее маскируют высокочастотные. Объясняется это тем, что волокна улитки, резонирующие на низких частотах, находятся далеко от овального окна (см. рис. 2.1), поэтому лимфа, колеблющаяся в каналах улитки в той или иной степени, возбуждает все волокна, находящиеся ближе их к овальному окну, т. е. высокочастотные волокна. На высоких частотах резонирующие волокна находятся близко от овального окна и колебания лимфы замыкаются, не доходя до более удаленных низкочастотных волокон.

Если помеха широкополосная, то даже при большом превышении общего ее уровня над уровнем принимаемого тона последний может быть услышан, поскольку уровень помех, находящихся в пределах критической полоски (в которой находится и принимаемый тон), может быть довольно малым. Для равномерной помехи в диапазоне частот 100—5000 Гц это превышение достигает 15 дБ.

Для низких уровней частотный диапазон маскировки мал, для высоких — он простирается на широкую

область частот, лежащих выше частоты маскирующего тона. При этом можно отметить повышение маскировки на частотах, кратных частоте маскирующего тона (см. рис. 2.7а, на частотах 2000 Гц). Этот эффект будет объяснен ниже (см. § 2.10). Снижение маскировки

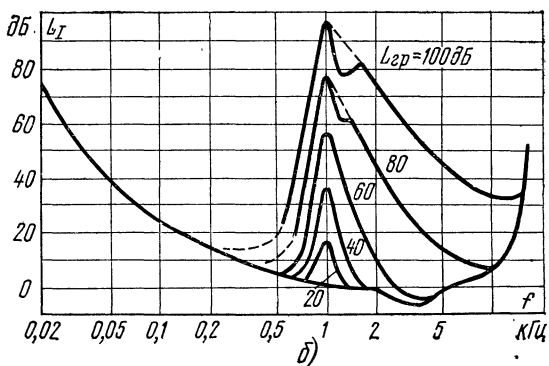
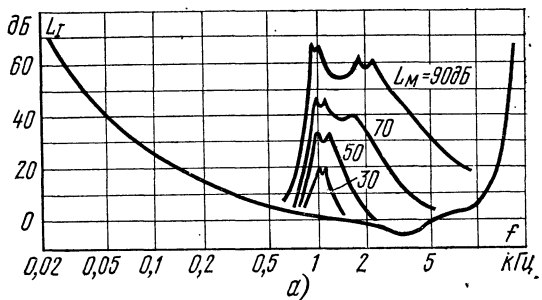


Рис. 2.7. Кривые порога слышимости при маскировке: а) тоном 1000 Гц для разных уровней интенсивности и маскирующего тона L_M ; б) полосковой шума около 1000 Гц для разных $L_{гп}$ — уровней громкости маскирующего шума

(провалы) при небольшой разности частот маскирующего и маскируемого тонов (см. рис. 2.7а, на частотах 1000 и 2000 Гц) объясняются попаданием их в одну и ту же критическую полосу слуха (появляются слышимые биения частот).

Шумовая маскировка имеет плавный спад к высоким частотам и крутой к низким (рис. 2.7б).

На рис. 2.7а и б приведены кривые маскировки, иллюстрирующие сказанное.

Кроме маскировки, шумы и помехи при их значительном уровне и длительном воздействии вызывают необратимые явления в слуховом органе: наиболее чувствительные клетки органа Корти изнашиваются, и порог слышимости повышается (человек глохнет). Это наблюдается у клепальщиков, машинисток и людей других профессий, связанных с пребыванием в шумах. По той же причине городские жители имеют пороги слышимости выше, чем сельские. Порог слышимости повышается и у детей, которых регулярно «убаюкивает» громкая радиопередача. Отмечено, что у молодежи за последние годы резко возросли пороги слышимости. Причиной этого явилось увлечение поп-музыкой, отличающейся высокими уровнями громкости звучания.

2.8. ГРОМКОСТЬ СЛОЖНЫХ ЗВУКОВ

Два тона или узкополосных шума с небольшим уровнем громкости, отстоящие по частоте не менее чем на две октавы, не маскируют друг друга. В этом случае суммарная громкость будет равна сумме громкостей обоих звуков. Если их громкости равны, то суммарная громкость удвоится, что соответствует увеличению уровня

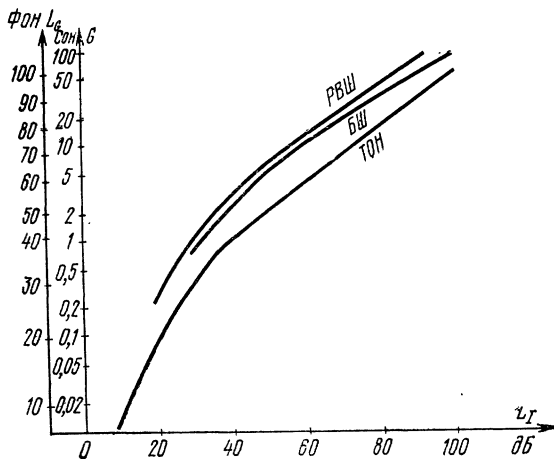


Рис. 2.8. Зависимость громкости и уровня громкости от уровня интенсивности для тона с частотой 1000 Гц Тон, равномерно воздействующего шума РВШ и белого шума БШ

громкости на 10 фон (см. § 2.6). С другой стороны, если оба звука попадают в одну критическую полосу слуха, то складываются их интенсивности. Когда оба звука имеют высокий уровень интенсивности или когда их частоты находятся в диапазоне 500—4000 Гц уровень суммарной интенсивности (если они имеют одинаковый уровень) увеличится на 3 дБ, на столько же увеличится и уровень громкости (в фонах). Это два крайних случая суммирования громкостей.

Если оба звука (тона или узкополосных шума) отстают друг от друга по частоте на интервал менее двух октав или низкочастотный звук имеет высокий уровень, то появляется маскировка одного звука другим, вследствие чего суммарная громкость будет меньше суммы громкостей обоих звуков. И чем ближе звуки по частоте, тем значительно это уменьшение. Вычислить громкость дискретных спектров очень сложно. Громкость шумов с широкополосным спектром можно вычислить по специальным номограммам. На рис. 2.8 приведены зависимости громкости и уровня громкости от уровня интенсивности для тона с частотой 1000 Гц, для широкополосных шумов белого типа и с одинаковой интенсивностью в критических полосках (так называемый *равномерно воздействующий шум* — РВШ). Как видно из этих графиков, для тона, согласно определению, уровни интенсивности и уровни громкости численно равны друг другу, а для РВШ уровень громкости на 20 фон выше уровня интенсивности. Поэтому для измерения громкости шума необходимо применять специальные измерители, учитывающие маскировку звука. В обычных шумомерах это не предусмотрено, по этим измерениям определяют только уровень интенсивности с поправкой на изменение кривой равной громкости (поэтому показания выражают в децибелах по шкале А (дБА), а не в фонах.

2.9. ВРЕМЕННЫЕ ХАРАКТЕРИСТИКИ СЛУХОВОГО ВОСПРИЯТИЯ

По данным теории Флетчера и Гельмгольца [4] слух не реагирует на фазу колебаний синусоидальной звуковой волны, регистрируя только ее амплитуду и частоту. В случае сложных колебаний, состоящих из нескольких частотных составляющих, слух непосредственно не реагирует на фазовые сдвиги между ними, воспринимая только амплитуды и частоты колебаний каждой из составляющих, если они не попадают в одну и ту же критическую полоску слуха. Это объясняется тем, что каждая из частотных составляющих звука воспринимается своим участком основной мембраны, а для восприятия фазы колебаний у нее нет аппарата. Сдвиг по фазе может быть замечен, когда он превращается в запаздывание во времени. Малые фазовые сдвиги в ряде случаев могут обнаруживаться слухом из-за его нелинейности (см. § 2.10).

Как всякая механическая и электрическая система, слуховой аппарат инерционен: при исчезновении звука слуховое ощущение исчезает не сразу, а постепенно уменьшаясь до нуля. Время, в течение которого ощущение по уровню громкости уменьшается на 8—10 фон, называется *постоянной времени слуха*. Эта постоянная зависит от ряда обстоятельств, а также от параметров воспринимаемого звука. В среднем она равна 150—

200 мс. Экспериментально установлено, что если к слушателю приходят два коротких звуковых импульса, одинаковые по составу и уровню, но один из них запаздывает, то они будут восприняты слитно, когда запаздывание не превышает 50 мс (см. [1], с. 222 и [2], с. 467). Правда, при запаздывании более 30 мс будет прослушиваться некоторое качественное изменение звучания.

Эта слитность звучания получается из-за того, что ощущение от первого импульса за 50 мс после его окончания уменьшается примерно на 3 дБ, даже если бы он прекратился мгновенно. На самом деле это уменьшение получается еще меньшим, и именно поэтому такие звуки воспринимаются слитно. При больших интервалах запаздывания ощущение от первого импульса уже становится малым и не маскирует второй, поэтому оба импульса воспринимаются раздельно. Это явление называют *эхом*. Если встать перед стеной на расстоянии более 9 м и хлопнуть в ладоши, то услышим эхо в повторении хлопков, так как разность хода прямого и отраженного звуков будет более 18 м. При меньшем расстоянии этого не наблюдается, так как расстояние, равное 17 м, соответствует запаздыванию в 50 мс.

Если уровень запаздывающего звука намного меньше уровня первого, то он не будет принят раздельно даже при запаздывании больше 50 мс, так как остаточное ощущение от первого звука может маскировать запаздывающий звук. На рис. 2.9 приведена зависимость между временем запаздывания и необходимой разностью уровней для слитного восприятия обоих звуков (кривая 1). На кривой 2 дана разность уровней, при которой эхо мешает восприятию первого звука.

К одной из временных характеристик слуха относится явление послемаскировки: слабые звуки, идущие сразу после громких, оказываются полностью или ча-

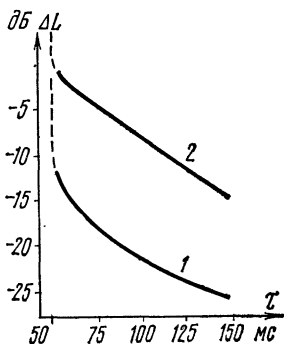


Рис. 2.9. Зависимости разности уровней прямого и отраженного звуков от необходимого времени запаздывания для раздельного восприятия 1 и появления мешающего эха 2

стично замаскированными из-за последствия предыдущего звука.

Следует еще упомянуть об интегрирующей способности слуха при восприятии короткого импульса. В пределах 50 мс интегрируется интенсивность импульса; из-за этого более длительный импульс (в пределах до 50 мс), но с меньшей амплитудой воспринимается так же громко, как и короткий импульс с большей амплитудой, если произведение интенсивности импульсов на их длительность будет одинаковым.

К временным характеристикам слуха относится и время установления тональности звука, точнее, его высоты. По данным [4] необходимо два-три периода колебаний, чтобы слух мог определить высоту звука, т. е. приблизительно частоту колебаний. На низких частотах это время составляет около 30 мс, на высоких — несколько меньше.

Поскольку слуховое ощущение исчезает не сразу, то при сравнении двух тонов, следующих сразу один за другим и имеющих небольшую разницу по частоте, прослушиваются биения этих тонов, что помогает обнаруживать очень малые разности частот и медленные изменения частоты в небольших пределах.

2.10 НЕЛИНЕЙНЫЕ СВОЙСТВА СЛУХА

Экспериментально установлено (см. [4], § 4.3), что при воздействии звука с одной частотной составляющей (*чистый тон*) и уровнем интенсивности 100 дБ человек слышит вторую гармонику с уровнем интенсивности 88 дБ, третью — с уровнем 74 дБ и т. д. Наличие этих гармоник в слуховом ощущении легко проследить с помощью «ищущего» тона: к уху дополнительно подводится другой тон — «ищущий», частота которого плавно изменяется в диапазоне частоты исследуемого тона и выше. На каждой кратной ему частоте прослушиваются биения, как будто в подводимом звуке были эти составляющие. Эти гармонические составляющие называются *субъективными*. Именно поэтому наблюдается маскировка звука на частотах, кратных частоте маскирующего тона (см. рис. 2.7а).

При воздействии на слух 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 громкости и тон суммарной частоты и других комбинационных частот $f = m f_1 \pm n f_2$ с меньшими уровнями.

Эксперименты показали (см. [4], § 4.4), что если уровень каждого из чистых тонов составляет 60 дБ, то уровень громкости разностного тона не превышает 40 фон. При уровнях интенсивности составляющих, равных 80 дБ, уровень громкости разностного тона достигает 80 фон.

При воздействии на слух сложных звуков, имеющих составляющие с кратными частотами, получается

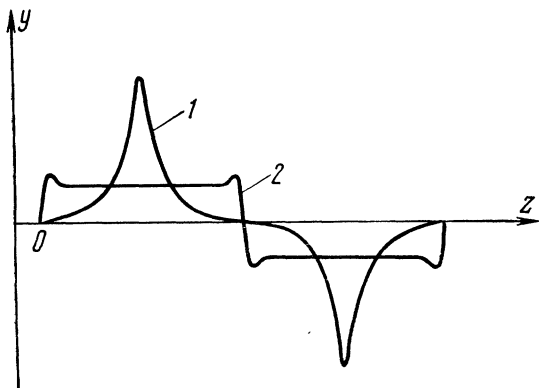


Рис. 2.10. Звуковые колебания, состоящие из одних и тех же составляющих с разными фазовыми сдвигами между ними:

$$1) - f(z) = \sum_{k=0}^{10} \frac{(-1)^k}{2k+1} \sin(2k+1)z; \quad 2) - f(z) = \sum_{k=0}^{10} \frac{1}{2k+1} \sin(2k+1)z$$

ощущение такого же звука по частотному составу только с несколько измененным соотношением амплитуд составляющих, так как комбинационные частоты совпадают по частоте с исходными частотами звука.

При воздействии сложного звука, состоящего из тонов с некратными частотами, получается ощущение сильных искажений: прослушивается много разностных и других комбинационных тонов.

Интересно отметить, что при срезании частотного диапазона ниже 1000 Гц при высокой громкости передачи человек все же слышит низкие частоты вследствие нелинейности слуха. Поэтому при плохой передаче

низких частот слушатели стремятся прослушивать передачи на высоких уровнях громкости, так как при этом создается впечатление более громкого звучания низких частот. И хотя при этом искажается звучание на высоких частотах, это не очень заметно при передаче современной поп-музыки. Причины нелинейности слуха можно, по-видимому, объяснить нелинейностью характеристик среднего уха и, что более существенно, вихревыми явлениями в улитке.

Из-за нелинейности слуха в некоторых случаях обнаруживается сдвиг фаз. Если сдвиги фаз между составляющими таковы, что амплитуды гармоник арифметически складываются и создают пикообразную форму кривой звуковой волны (рис. 2.10, кривая 1), то из-за нелинейности слуха появятся более значительные амплитуды субъективных гармоник, нежели при сдвигах фаз тех же составляющих, дающих, например, прямоугольную форму волны (рис. 2.10, кривая 2). Поэтому будет обнаруживаться разница в их звучании.

2.11. БИНАУРАЛЬНЫЙ ЭФФЕКТ

Бинауральным эффектом называют эффект двуухового слушания. По аналогии со зрительным ощущением для двух глаз его называют стереоакустическим эффектом. Бинауральный эффект заключается в том, что вследствие двуухового слушания человек может определить направление прихода звуковых волн с большой точностью; человек «ощущает» поперечные размеры источника звука, а также глубину его, т. е. создается акустическая перспектива.

Слуховая локализация источника звука зависит от расстояния между ушами. В обычных условиях человек определяет направление прихода звуковых волн в горизонтальной плоскости с точностью 3—4°. Если к ушам приставить раструбы с большим расстоянием между их отверстиями, то точность определения направления прихода звуковых волн может быть значительно повышена (такими звукоулавливателями пользовались до войны при определении местонахождения самолета). Это расстояние влияет как на разность времени прихода звуковых волн к ушам, так и на соотношение между амплитудами этих волн около ушных раковин.

Как указывалось, человек одним ухом слитно воспринимает два звука, если их время прихода отличается меньше чем на 50 мс. Но если звук поступает в одно ухо со сдвигом во времени по отношению к другому уху, то слух воспринимает эти звуки отдельно, так как электрические импульсы, возбуждаемые звуковыми колебаниями, поступают в слуховой центр по независимым путям. Именно поэтому суммарная громкость таких звуков сильно зависит от сдвига по времени. Этим объясняется бинауральный эффект на низких частотах. На высоких частотах он объясняется разностью уровней звуков, поступающих в каждое из ушей, вследствие того, что размеры головы на этих частотах становятся соизмеримыми с размерами длин звуковых волн.

Если человек слушает одну и ту же передачу от двух источников звука, которые находятся на разных расстояниях от слушателя, то при равных уровнях громкости на месте ближайшего источника ощущается кажущийся (*виртуальный*) источник звука. Можно создать ощущение раздельного звучания обоих источников, если уровень ближайшего сделать меньше, чем уровень удаленного. Это и определяет ощущение глубины источника звука. Все это положено в основу стереофонии.

Заметим, что человек плохо ощущает перемещение источника звука в вертикальной плоскости, проходящей перпендикулярно к линии ушей. Это объясняется тем, что в этом случае звуковые волны приходят в оба уха с одинаковыми фазой и амплитудой.

Глава 3

АКУСТИЧЕСКИЕ СИГНАЛЫ

3.1. ОПРЕДЕЛЕНИЯ

Различают первичные и вторичные акустические сигналы. К первичным относятся: сигналы, создаваемые музыкальными инструментами, пением, речью; шумовые сигналы, создаваемые для сопровождения различных музыкальных и речевых художественных передач (шум поезда, треск кузнечика и т. п.).

При оценке тракток вещания и связи полагают, что каждый акустический сигнал почти всегда является

случайным в вероятностном смысле¹⁾ и несет в себе информацию, соответствующую его объему. Исключением из этого являются сигналы, подобные завыванию сирены, вою гудка и др. Хотя в музыкальных сигналах очень большие участки могут иметь периодический характер, в среднем для больших интервалов времени их также можно рассматривать как случайные. Поэтому акустические сигналы определяются распределениями по уровню, по частотному диапазону и во времени, а также средними значениями по интенсивности или уровню, динамическим диапазоном, частотным диапазоном и временем корреляции отдельных участков.

Ко вторичным акустическим сигналам относятся сигналы, воспроизводимые электроакустическими устройствами, т. е. первичные сигналы, прошедшие по электроакустическим трактам связи и вещания и соответственно видоизмененные по своим параметрам.

3.2. ДИНАМИЧЕСКИЙ ДИАПАЗОН

В процессе любой передачи уровень акустического сигнала непрерывно изменяется, причем диапазон его изменения может быть довольно широким. На рис. 3.1а

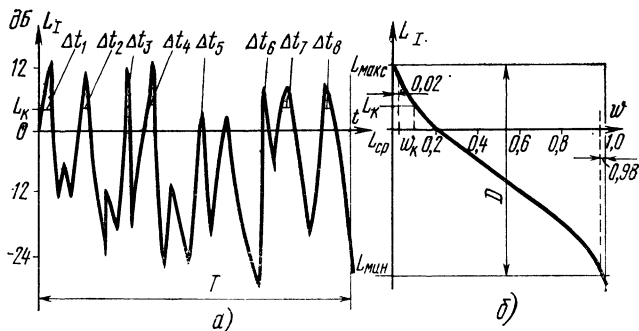


Рис. 3.1. К определению динамического диапазона:
а) уровнеграмма; б) построение интегрального распределения по ней

¹⁾ Вещательные сигналы художественных программ, строго говоря, не могут рассматриваться как случайные в вероятностном смысле, так как они могут быть хорошо известными для слушателей и поэтому не нести в себе информацию. Для слушателя эти сигналы служат средством удовлетворения эстетических потребностей, а не получения информации. Однако при расчете каналов связи и вещания эти сигналы считают несущими информацию, соответствующую их объему.

показана зависимость уровня сигнала от времени, называемая *уровнеграммой*. Обычно ее дают для уровня, определенного при постоянной времени измерителя, равной или 150—200 мс (субъективная уровнеграмма), или 20—30 мс (объективная уровнеграмма).

Поскольку уровень сигнала изменяется, как правило, по случайному закону, то его интегральное распределение и среднее значение можно определить следующим образом. Возьмем какой-либо уровень, например L_k (см. рис. 3.1а). Можно написать, что время, в течение которого уровень сигнала будет не ниже L_k , определится суммой $\tau = \Delta t_1 + \Delta t_2 + \Delta t_3 + \dots + \Delta t_n$, где Δt_n — временные интервалы действия сигнала. Следовательно, относительное время пребывания уровня сигнала над заданным равно $\omega_k = \tau_k / T$, где T — длительность всего участка сигнала (она должна быть достаточно большой: не менее 15 с для речи и 1 мин для музыки). Если таким образом определить величину ω_k 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, полученные для первичных музыкальных и речевых сигналов, по форме близки к нормальному распределению. Введены понятия квазимаксимального и квазиминимального уровней сигнала $L_{\text{макс}}$ и $L_{\text{мин}}$. Их определяют по относительному времени пребывания уровня сигнала над соответствующим уровнем. Для квазимаксимального уровня это время условились брать равным двум процентам для музыкального сигнала и одному — для речевого, а для квазиминимального — соответственно 98 и 99% (см. рис. 3.1б). Выбор именно таких значений для $L_{\text{макс}}$ и $L_{\text{мин}}$ основан на том, что более краткие пики и резкие минимумы сигнала практически не воспринимаются слухом (для речевого сигнала процент взят меньше, чем для музыкального, так как очень краткие звуки в речи все же несут некоторую информацию).

Разность между квазимаксимальным и квазиминимальным уровнями называют динамическим диапазоном

$$D = L_{\text{макс}} - L_{\text{мин}}. \quad (3.1)$$

Динамический диапазон (в децибелах) для разных видов сигналов следующий:

речь диктора	25—35
телефонные разговоры	35—45
небольшие ансамбли	45—55
симфонический оркестр	65—75

Как видим, вещательный динамический диапазон настолько широк, что в большинстве случаев он не может быть передан через тракты вещательных каналов без предварительной обработки, т. е. без сжатия (компрессии) динамического диапазона. Но и речевой информационный сигнал имеет широкий динамический диапазон по отношению к трактам связи и поэтому его приходится предварительно сжимать или же мириться с появлением значительных искажений его в самом тракте передачи.

3.3 СРЕДНИЙ УРОВЕНЬ

Средний уровень интенсивности акустического сигнала можно определять или по слуховому ощущению (субъективное среднее), или как средний статистический по интенсивности для длительных интервалов времени (среднее длительное), или как средний, измеряемый прибором, имеющим небольшую постоянную времени (объективное среднее). Для вторичных сигналов достаточно определять только средний уровень по ощущению, для первичных — необходимо знать все средние уровни, так как эти сигналы проходят к человеку через аппаратуру систем связи и вещания.

Эти средние уровни сигнала можно измерить, изменяя постоянную времени прибора. Учитывая, что мгновенная мощность сигнала изменяется от нуля до амплитудного значения, минимальная постоянная времени прибора для измерения объективного среднего уровня не должна быть меньше максимального полупериода колебаний (для $f=30$ Гц, $T_{\text{макс}}/2=17$ мс). Так как постоянная времени слуха в среднем равна 150 мс, то для измерения среднего уровня по слуховому ощущению постоянная времени должна быть около 150 мс. Для получения длительного среднего (усредненного) уровня постоянную времени прибора берут равной 15 с для речи и 1 мин — для музыки.

Для каждого из средних значений уровня средняя интенсивность определяется по формуле

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

где $e^{-\frac{t_0-t}{T}}$ — учитывает процесс регистрации сигнала с учетом «памяти» прибора вследствие наличия у него постоянной времени¹⁾; T — постоянная времени; $f(t)$ — временная зависимость интенсивности сигнала.

В соответствии с определением (2.3) средний акустический уровень сигнала

$$L_{\text{ср}} = 10 \lg (I_{\text{ср}}/I_0).$$

Обычно акустический сигнал преобразуется в электрический. В этих случаях на выходе электроакустического устройства электрический уровень

$$N_{\text{э}} = 10 \lg (P_{\text{э}}/P_0), \quad (3.2)$$

где $P_{\text{э}}$ — мощность сигнала (электрическая); $P_0 = 1$ мВт — мощность, соответствующая нулевому уровню.

Разность между квазимаксимальным и усредненным уровнем (за длительный промежуток времени, например, 15 с для речи и 1 мин для музыки) называют *пик-фактором*:

$$\Pi = L_{\text{макс}} - L_{\text{ср}} = N_{\text{э.макс}} - N_{\text{э.ср}}. \quad (3.3)$$

Пик-фактор показывает, насколько ниже надо взять усредненный уровень передачи по сравнению с максимально допусаемым уровнем в канале, чтобы не перегружать канал. Для музыкальных сигналов пик-фактор доходит до 20 дБ и более, для речевого сигнала — не превышает 12 дБ. Эти данные пик-фактора относятся к сигналам, не прошедшим любую обработку, в том числе и в виде воздействия акустических свойств помещения.

¹⁾ Полагают, что приемник звука, а также орган слуха человека воспринимают звук, как приборы с элементарной цепочкой типа RC.

3.4. ЧАСТОТНЫЙ ДИАПАЗОН И СПЕКТРЫ

Акустический сигнал от каждого из первичных источников звука, используемых в системах вещания и связи, как правило, имеет непрерывно изменяющуюся форму и состав спектра. Спектры могут быть высоко- и низкочастотными, дискретными и сплошными. У каждого источника звука, даже того же самого типа (например, скрипка в оркестре), спектры имеют индивидуальные особенности, что придает звучанию характерную окраску. Эту окраску называют *тембром*. Существуют понятия тембра скрипки, тромбона, органа и т. п., а также тембра голоса: звонкий, когда подчеркнуты высокочастотные составляющие; глухой, когда они подавлены. В первую очередь представляют интерес средний спектр для источников звука каждого типа, а для оценки искажений сигнала — спектр, усредненный за длительный интервал времени (15 с для информационных сигналов и 1 мин для художественных). Усредненный спектр может быть, как правило, сплошной и достаточно сглаженный по форме.

Сплошные спектры характеризуются зависимостью *спектральной плотности* от частоты (эту зависимость называют энергетическим спектром). Спектральной плотностью называется интенсивность звука в полосе частот шириной, равной единице частоты. Для акустики эту полосу берут равной 1 Гц. Спектральная плотность $J = I_{\Delta f} / \Delta f$, где $I_{\Delta f}$ — интенсивность, измеренная в узкой полосе частот Δf с помощью узкополосных фильтров.

Для удобства оценки введена логарифмическая мера плотности спектра аналогично уровню интенсивности. Эту меру называют *уровнем спектральной плотности* или *спектральным уровнем*. Спектральный уровень

$$B = 10 \lg (J/I_0),$$

где $I_0 = 10^{-12}$ Вт/м² — интенсивность, соответствующая нулевому уровню, как и для оценки уровня интенсивности.

Очень часто для характеристики спектра вместо спектральной плотности используют интенсивности и уровни интенсивности, измеренные в октавной, полуоктавной или третьоктавной полосе частот. Нетрудно установить связь между спектральным уровнем и уров-

нем в *октавной* (полуоктавной или третьоктавной) *полосе*. Спектральный уровень

$$B = 10 \lg \left(I_{\Delta f_{\text{окт}}} / \Delta f_{\text{окт}} I_0 \right), \quad (3.4)$$

а уровень в октавной полосе

$$L_{\text{окт}} = 10 \lg \left(I_{\Delta f_{\text{окт}}} / I_0 \right), \quad (3.5)$$

где $\Delta f_{\text{окт}}$ — ширина соответствующей октавной полосы.

Вычитая второе из первого, находим

$$L_{\text{окт}} - B = 10 \lg \Delta f_{\text{окт}}. \quad (3.6)$$

При известном спектре сигнала можно определить его суммарную интенсивность. Так, если спектр задан в уровнях интенсивности для третьоктавных полос, то достаточно перевести эти уровни

(в каждой из полос) в интенсивности $I_{\text{окт}} = I_0 10^{0,1 L_{\text{окт}}}$ и затем просуммировать все интенсивности. Сумма всех $I_{\text{окт}}$ дает суммарную интенсивность $I_{\text{сум}}$ для всего спектра. Суммарный уровень

$$L_{\text{сум}} = 10 \lg (I_{\text{сум}} / I_0). \quad (3.7)$$

Если спектр задан в спектральных уровнях, то, исходя из их определения, для всего спектра точный суммарный уровень

$$L_{\text{сум}} = 10 \lg \int_{f_{\text{н}}}^{f_{\text{в}}} 10^{0,1B} df, \quad (3.8)$$

где $f_{\text{в}}$ и $f_{\text{н}}$ — верхняя и нижняя границы частотного диапазона.

Приближенно суммарный уровень можно найти делением частотного диапазона на n полосок шириною Δf_k , в пределах которых спектральный уровень B_k примерно постоянен. Суммарный уровень

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

Частотный диапазон акустического сигнала определяют из частотной зависимости спектральных уровней. Это определение можно сделать или по спаду спектральных уровней или приближенно, на слух. Субъективными границами считают заметность ограничения диапазона для 75% слушателей. Приведем частотные диапазоны для ряда первичных источников акустического сигнала, Гц:

речь	70—7000
скрипка	250—15 000
треугольник	1000—16 000
бас-труба	50—6000
орган	20—15 000
симфонический оркестр	30—15 000

Если спектры имеют плавный спад в ту или иную сторону, то их еще оценивают тенденцией, т. е. средним наклоном спектральных уровней в сторону низких или высоких частот. Например, речевой спектр имеет тенденцию, равную —6 дБ/окт (спад в сторону высоких частот).

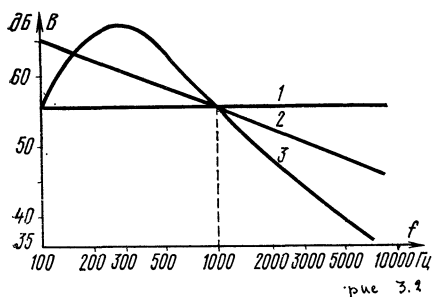


Рис. 3.2. Спектральные уровни шумов:

1 — белого; 2 — розового; 3 — речевого

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

3.5. ВРЕМЕННЫЕ ХАРАКТЕРИСТИКИ АКУСТИЧЕСКОГО СИГНАЛА

К временным характеристикам сигнала относятся уровнеграмма и время корреляции. Уровнеграмма сигнала дает возможность определить резкие переходы интенсивности и, следовательно, с ее помощью можно предъявить требование к постоянным времени трактов передачи сигнала. Такие временные характеристики сигнала, как время корреляции, используют редко, хотя опыты показывают, что этот параметр играет значительную роль при определении качества звучания.

3.6. ПЕРВИЧНЫЙ РЕЧЕВОЙ СИГНАЛ

Каждому человеку свойственна своя манера произносить звуки речи (своего рода устный почерк). Произношение звуков речи зависит, например, от удара,

¹⁾ Спектр розового цвета получается, если сила света убывает по гиперболическому закону в сторону фиолетового цвета. Аналогично ему введено понятие «розового» шума.

соседних звуков и других факторов. Но при всем многообразии в их произношении звуки — физические реализации 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, называемая *графемой* (например, печатная курсивом) по отношению к ее рукописной форме в конкретном написании.

В русском языке насчитываются 41 основная и 3 неясно звучащих фонемы: 6 гласных (а, о, у, э, и, ы), 1 полугласная (й) и 34 согласных. Гласные буквы я, ю, ё, е соответствуют или составным фонемам: йа, йу, йо, йэ, или служат для смягчения предыдущей согласной. Согласных фонем больше, чем согласных букв, так как ряд согласных букв соответствует двум фонемам: мягкой и твердой. Только твердых фонем 3 (ш, ж, ц), только мягких — 1 (ч). Остальные 15 существуют в обоих видах: твердом и мягком.

Звуки речи делят на звонкие и глухие. Звонкие звуки образуются с участием голосовых связок, в этом случае находящихся в напряжении. 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 . Обратную величину $f_0 = 1/T$ называют частотой основного тона. Если связки тонкие и сильно напряжены, то период получается коротким и частота основного тона — высокой; для толстых, слабонапряженных связок частота основного тона низкая. Эта частота для всех голосов лежит в пределах от 70 до 450 Гц. При произнесении речи она 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 называют *интонацией*. У каждого человека свой диапазон изменения частоты 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 (окраска) голоса могут служить для опознавания человека. При этом степень достоверности опознавания выше, чем по отпечаткам

пальцев. Это свойство используют в разработанной в последнее время аппаратуре, 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. Например, для мужского голоса уровень гармоник на частоте 3000 Гц ниже уровня на 100 Гц примерно на 30 дБ.

При произнесении глухих звуков голосовые 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, создающие шум со сплошным спектром.

По способу образования согласные делят на сонорные, щелевые, взрывные и аффрикаты (комбинация глухих взрывных и щелевых). Сонорные (л, ль, р, рь, м, мь, н, нь) по звучанию похожи на гласные, но отдельно не произносятся и поэтому отнесены к согласным. Щелевые (в, вь, з, зь, ж, ф, фь, с, сь, ш, х, хь) образуются путем проталкивания потока воздуха в виде импульсов или шума через узкие щели, создаваемые языком и небом, губами, зубами, гортанью. Взрывные (п, пь, т, ть, к, кь, б, бь, д, дь, г, гь) образуются путем резкого проталкивания потока воздуха через губы, зубы, гортань. По месту образования фонемы делят на губные, зубные, небные, 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 определенные для данной фонемы резонансные полости, а для слитного звучания фонем в речи — и определенные переходы от одной формы тракта к другой.

Через речевой тракт при произнесении звуков проходят 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 тональный или шумовой спектры с монотонной огибающей превращаются в спектры с рядом максимумов и минимумов. Максимумы спектра называют *фор-*

мантами, а нулевые значения — антиформантами. Огибающая спектра для каждой фонемы имеет индивидуальную и вполне определенную форму (рис. 3.3). При произнесении речи спектр ее непрерывно изменяется, в результате чего образуются формантные переходы. Частотный диапазон речи находится в пределах 70 — 7000 Гц.

Звонкие звуки речи, особенно гласные, имеют высокий уровень интенсивности, глухие — низкий. В процессе произнесения речи ее громкость непрерывно изменя-

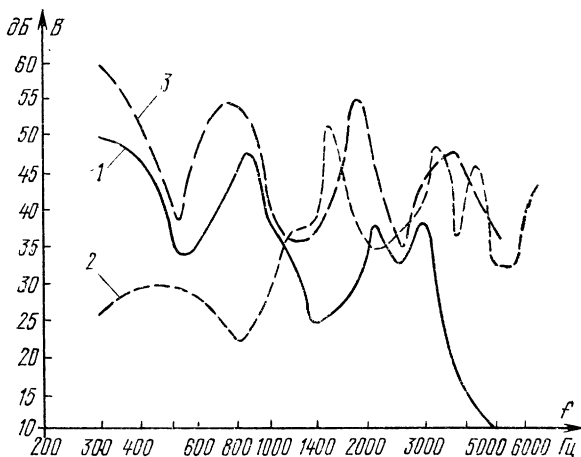


Рис. 3.3. Спектральные огибающие звуков русской речи:

1 — «в»; 2 — «г»; 3 — «м»

ется, особенно резко при взрывных звуках речи. Динамический диапазон уровней звуков речи находится в пределах 35—45 дБ. Гласные звуки имеют в среднем длительность около 0,15 с, согласные — около 0,08 с, звук «п» — около 30 мс. Большая длительность гласных звуков необходима для перестройки артикуляционных органов, так как иначе язык будет «заплетаться».

Звуки речи неодинаково информативны. Так, гласные звуки содержат меньшую информацию о смысле речи, чем глухие (например, в слове «посылка»: последовательность *q. ы. а* — ничего не говорит, *а — п. с. лк* дает почти однозначный ответ о смысле). Поэтому раз-

борчивость 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 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: $2 \cdot 7000 \cdot 7 = 98000$ бит/с), т. е. в 1000 раз бóльшая. Может показаться, что речевой сигнал имеет огромную избыточность. Это неверно и вот почему.

Образование звуков речи происходит путем подачи команд к мускулам артикуляционных органов речи от речевого центра мозга. Этих сигналов не более десяти, при этом они изменяются медленно (в темпе смены звуков речи, т. е. не более десяти раз в секунду). Поэтому общий поток сообщений для них составляет 100 бит/с.

Резкое увеличение объема речевого сигнала объясняется следующим. Речевой сигнал представляет собой спектрально-модулированную несущую¹⁾ $p = E(\omega)F(\omega)$, где $E(\omega)$ — спектр импульсов основного тона или шума; $F(\omega)$ — фильтровая (модуляционная) функция речевого тракта.

В результате спектральной модуляции изменяется соотношение между частотными составляющими несущей, т. е. изменяется форма огибающей ее спектра (появляются форманты и антиформанты). Почти вся информация о звуках речи заключается в этой спектральной огибающей и ее временном изменении¹⁾. Эти изменения происходят медленно (в темпе произнесения звуков), поэтому передача сведений об огибающей и ее изменении не требует пропускной способности тракта более 100 бит/с. Но для передачи широкополосной несущей с ее широким динамическим диапазоном требуется очень большая пропускная способность²⁾. Кроме того, речевой сигнал при образовании в речевом тракте при-

¹⁾ Частично информация о звуках речи заключена в переходах от тонального спектра к шумовому и обратно (т. е. в переходах от звонких звуков к глухим и обратно), а информация о сигнале — еще и в интонации. По фонетической теории информация заключается только в скорости изменения спектральных уровней.

²⁾ Речевой сигнал можно уподобить водоему, в котором находится рыба. Водоем может иметь большой объем, а полезной информации (рыбы) в нем может быть немного.

обретает много информации, не относящейся к смыслу передаваемой речи (например, фазовую информацию). Эта информация называется сопутствующей. Для ее передачи также расходуется пропускная способность тракта. Из этого следует, что избыточность речевого сигнала лишь немного превышает избыточность телеграфного сигнала с таким же сообщением: речевой сигнал отличается от телеграфного лишь информацией об эмоциях и личности говорящего.

Поэтому для передачи смысла достаточно передавать сведения о форме огибающей спектра речи, а также об изменении основного тона речи и переходов тоншума. Эти сигналы идут от речевого центра мозга.

3.7. ВТОРИЧНЫЙ СИГНАЛ

В идеальном случае вторичный сигнал должен точно воспроизводить первичный, но это не всегда требуется, так как слух человека может и не заметить их несоответствие. К тому же на практике точное соответствие их часто невозможно или очень трудно осуществить. При художественном вещании, телевидении и звукозаписи надо стремиться к этому соответствию в пределах, при которых слуховое ощущение, создающееся у слушателя, было бы близко к тому ощущению, которое он получает, находясь в месте исполнения данной программы при условии достаточно хороших акустических условий в этом месте. Для информационных программ вещания и телефонной связи этого соответствия добиваются в первую очередь для получения полной понятности речи, а затем для достаточно высокого качества звучания. Только в этом случае необходимо стремиться к более точному соответствию вторичного сигнала первичному. В обоих случаях существенную роль играют экономические соображения.

Нарушение точности передачи, замечаемое слухом, бывает самого разнообразного вида. Рассмотрим основные из них: потерю *акустической перспективы*, смещение уровней, ограничение динамического и частотного диапазона сигнала, помехи, искажения.

Потеря акустической перспективы. При передаче звукового сигнала по одноканальной системе получается ощущение слушания одним ухом, даже при наличии нескольких микрофонов в помещении, откуда ведется передача, и при разнесенных вторичных источ-

никах звука. Источник звука для слуха будет всегда казаться находящимся в некотором среднем положении по отношению к фактическим вторичным источникам, поскольку временной сдвиг и разность уровней для обеих ушей слушателя не зависят от местонахождения первичного источника звука. Этот дефект может быть до некоторой степени исправлен с помощью стереофонической системы передачи, основанной на многоканальной системе передачи сигнала (подробнее об этом см. в курсе «Радиовещание»).

Смещение уровней. Поскольку по тракту передачи сигналов не передается информация об абсолютных уровнях звучания первичного сигнала, то слушатель (а при массовом слушании — оператор на приемном конце) по своему усмотрению устанавливает уровень вторичного сигнала. При этом не всегда можно восстановить нужный уровень первичного сигнала из-за недостаточной мощности аппаратуры на приемном конце, а также из-за условий слушания (например, в квартирах с плохой звукоизоляцией).

Смещение уровней приводит к изменению соотношения между громкостями низкочастотных и среднечастотных составляющих первичного и вторичного сигналов, так как смещение среднего уровня вторичного сигнала вверх по отношению к среднему уровню первичного приводит к субъективному повышению громкости низкочастотных составляющих, смещение вниз — к их ослаблению (см. § 2.6).

Ограничение динамического диапазона. Поскольку динамический диапазон канала ограничен снизу шумами, а сверху — перегрузкой и нелинейностью отдельных звеньев канала передачи, то во избежание искажений его сжимают в начале тракта (во всяком случае до звена, в котором скорее всего может ограничиться или исказиться сигнал). Этот дефект может быть частично исправлен путем расширения динамического диапазона сигнала на конце тракта, что не всегда возможно, так как на приемном конце может быть неизвестно, насколько был сжат этот диапазон. Кроме того, попытка расширить диапазон (применением экспандеров) усложняет аппаратуру.

Ограничение частотного диапазона. Поскольку тракт передачи акустических сигналов не пропускает весь их частотный диапазон, говорят об ограничении частотного диапазона.

Помехи. При передаче на сигнал накладываются различного рода помехи, в том числе шумы электрического и акустического происхождения. Последние имеют как в месте нахождения первичного источника звука, так и в месте нахождения слушателя.

Искажения. По сути дела все перечисленные несоответствия первичного и вторичного сигналов являются искажениями в широком смысле этого понятия. Но обычно под этим термином понимают более узкий тип искажений. К ним относятся линейные, нелинейные, параметрические и переходные (временные) искажения.

3.8. ШУМЫ И ПОМЕХИ

Влияние шумов и помех сводится к маскировке вторичного акустического сигнала независимо от их происхождения (акустического или электрического). Шумы сдвигают порог слышимости, который не зависит от времени, если шумы относятся к «гладким», т. е. имеют пик-фактор, не превышающий 6 дБ. К этим шумам относятся различные флуктуационные шумы, например шум дробового эффекта, речевые шумы от нескольких голосов, звучащих одновременно. Импульсные шумы создают порог слышимости, изменяющийся во времени в зависимости от пик-фактора шума и длительности импульсов. Из-за наличия постоянной времени у слухового ощущения кратковременных импульсов получается сглаженный: 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.

Спектр шумов электрического происхождения, как правило, близкий к равномерному, а акустического происхождения — ближе к речевому. Поэтому частотная зависимость порога слышимости для первых имеет тенденцию роста к высоким частотам, так как ширина критических полосок растет с увеличением частоты. Для речевых шумов порог слышимости почти не зависит от частоты.

Индустриальные, атмосферные и станционные помехи, кроме тональных, могут быть отнесены и к импульсным, и к гладким, с равномерным или низкочастотным спектром. Кроме этих помех, приходится иногда счи-

таться с помехами от самомаскировки речи, т. е. с маскировкой слабых звуков, следующих за громкими.

Борьба с акустическими шумами ведется путем устранения (или ослабления) действия источников шума, а также путем повышения звукоизоляции помещений. Учет их действия на прием речевого сигнала делается при расчете и измерении разборчивости речи.

3.9. ЛИНЕЙНЫЕ ИСКАЖЕНИЯ

В общем случае коэффициент передачи тракта

$$K = \frac{p_2}{p_1} = |K| e^{i\varphi}, \quad (3.9)$$

где p_1 и p_2 — звуковые давления в начале и конце тракта; $|K|$ — модуль коэффициента передачи; φ — фазовый сдвиг в тракте.

Коэффициент передачи, как правило, зависит от частоты. Так как слух не реагирует непосредственно на сдвиг фаз между составляющими сигнала, в дальнейшем его не будем рассматривать и под термином «коэффициент передачи» будем подразумевать его модуль.

Частотная зависимость коэффициента передачи, называемая частотной характеристикой тракта передачи, приводит к изменению соотношений между амплитудами частотных составляющих, входящих в первичный сигнал. Субъективно эти искажения ощущаются как изменение тембра первичного сигнала. Например, если подавлены низкочастотные составляющие, то звучание будет звенящее. При подавлении высокочастотных составляющих звук глухой. При резком подчеркивании низкочастотных составляющих звучание получается бубнящим, а при резком подчеркивании высокочастотных — свистящим. Эти искажения (называемые частотными) оценивают по величине *неравномерности частотной характеристики*

$$M_n = K_{\max}/K_{\min}, \quad (3.10)$$

где K_{\max} и K_{\min} — максимальный и минимальный коэффициенты передачи в заданном диапазоне частот.

Неравномерность часто измеряют в логарифмических единицах, в таком случае

$$\Delta L = 20 \lg M_n = L_{\max} - L_{\min}, \quad (3.11)$$

где L_{\max} и L_{\min} — максимальный и минимальный уровни вторичного сигнала при постоянстве уровня первич-

ного. На рис. 3.4 показана одна из характеристик тракта передачи сигнала. Согласно [8 б, в] при определении неравномерности частотной характеристики следует исключать из рассмотрения пики и провалы в частотной

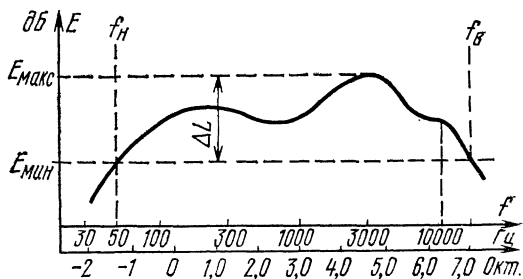


Рис. 3.4. Определение неравномерности частотной характеристики и частотного диапазона

характеристике, если они уже $1/8$ октавы. Такое условие введено из-за наличия широких критических полосок слуха, а также из-за того, что при быстром изменении первичного сигнала его спектр расплывается и эти пики и провалы сглаживаются.

Как правило, частотная характеристика наиболее неравномерна в областях самых низких и самых высоких частот диапазона, т. е. вблизи его границ, поэтому для широкополосных трактов передачи сигнала, например вещательных, неравномерность частотной характеристики часто задают в двух диапазонах: номинальном и в основном (200—5000 Гц).

В тех случаях, когда аппаратура не может быть изготовлена с заданной неравномерностью, в требуемом частотном диапазоне оговаривают частотный диапазон, в котором неравномерность не превышает заданную норму.

Частотно-амплитудные искажения обычно устраняют путем частотной коррекции в звеньях тракта, ближайших к искажающим.

Нормы на допустимые частотные искажения были определены экспериментально. Установлено, что на низких частотах искажения более заметны, чем на высоких.

3.10. НЕЛИНЕЙНЫЕ ИСКАЖЕНИЯ

Различают два вида нелинейности: нелинейность степенного типа и нелинейность из-за амплитудного ограничения. Первая характеризуется зависимостью $y =$

$= A_1x + A_2x^2 + \dots$, где A_1 и A_2 — коэффициенты пропорциональности; x — мгновенные значения первичного сигнала; y — мгновенное значение вторичного.

Амплитудное ограничение бывает сверху и снизу (центральное). При ограничении сверху (рис. 3.5а) характеристика тракта до некоторого значения x_0 может

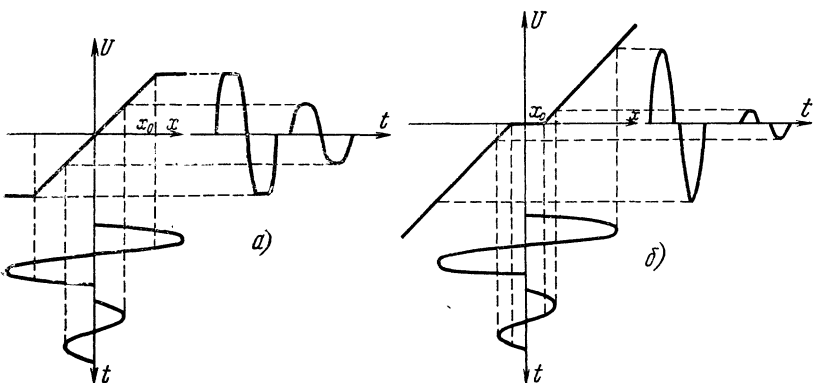


Рис. 3.5. Амплитудное ограничение для сигналов с большой и небольшой амплитудами:

а) ограничение сверху; б) снизу (центральное)

быть линейной. Сигналы с амплитудами больше x_0 ограничиваются. При центральном ограничении (рис. 3.5б) слабые сигналы (меньше x_0) срезаются, а остальные искажаются.

Исследование показало, что искажения, вызванные амплитудным ограничением сверху, мешают восприятию сигналов меньше, а при центральном ограничении — больше, чем искажения степенного типа. Нелинейные искажения степенного типа в виде гармонических составляющих вызывают ощущения дребезжания (а на высоких частотах — хрипы), а нелинейные искажения в виде разностных тонов вызывают ощущение модуляции громкости звука (обычно это заметно на низких частотах).

Результаты исследований показали, что слушатель меньше замечает несимметричные искажения¹⁾, когда наибольшей по амплитуде оказывается вторая гармони-

¹⁾ Несимметричные искажения получаются для нечетных степеней зависимости $y=f(x)$, симметричные — для четных.

ка, так как она находится в октаве с основной частотой. Симметричные искажения более заметны, так как третья гармоника получается очень большой и оказывается в квинте с основной. При сужении полосы частот заметность искажения уменьшается. Это объясняется тем, что ряд гармоник и комбинационных составляющих оказывается за пределами передаваемого диапазона частот.

Как правило, нелинейные искажения наиболее велики на низких частотах, поэтому нормы на них даются для нескольких диапазонов частот. С увеличением уровня сигнала нелинейные искажения растут, поэтому нормы на них дают отдельно для средних и пиковых уровней.

Нелинейные искажения чаще всего оцениваются с помощью коэффициента нелинейных искажений (КНИ)

$$K_{\text{н.и}} = \sqrt{x_{m2}^2 + x_{m3}^2 + \dots} / x_{m1}, \quad (3.12)$$

где x_{mk} — амплитуды гармоник сигнала, начиная со второй; x_{m1} — амплитуда основной составляющей.

Кроме такой оценки, существуют методы разностных колебаний взаимной модуляции и другие, которые подробно рассматриваются в курсе «Электрические измерения».

3.11. ПЕРЕХОДНЫЕ ИСКАЖЕНИЯ

При сжатии динамического диапазона применяют различные автоматические регуляторы уровня. Эти регуляторы имеют большую постоянную времени восстановления и вызывают искажения, называемые переходными. Переходные искажения создаются собственными колебаниями, происходящими в различных звеньях тракта. По своему звучанию они сходны с нелинейными искажениями, так как в сигнале появляются комбинационные частоты. Подробно они будут рассмотрены в курсе «Радиовещание».

3.12. ДОПУСТИМЫЕ ВЕЛИЧИНЫ ИСКАЖЕНИЙ

Допустимые величины искажений определяются, во-первых, заметностью и, во-вторых, возможностью реализации трактов передачи сигналов, которая обусловли-

вается рядом факторов: техническими, экономическими, эксплуатационными. С точки зрения реализуемости аппаратуры и из экономических соображений при определении величин тех или иных искажений приходится идти на компромиссы: уменьшение одних искажений часто вызывает увеличение других. На основе ряда исследований были определены наиболее оптимальные комбинации величин искажений.

Заметность искажений — субъективное понятие, так как порог заметности у разных людей разный. Для профессионалов порог заметности искажений всегда меньший, чем для большинства слушателей. Принято считать порогом заметности такие искажения, которые замечают 75% слушателей.

В соответствии со всеми этими условиями были определены величины допустимых искажений для нескольких уровней (градаций, классов) качества трактов. Высший класс (градация — отлично) — искажения незаметны; первый класс (градация — хорошо) — искажения заметны только для профессионалов и в отсутствии помех и шумов; второй (удовлетворительно) — искажения заметны для всех слушателей, но они еще не портят впечатления при художественных передачах или терпимы при информационных; третий класс — не стандартизируются (предельно допустимо) — искажения находятся на предельно допустимом уровне.

В табл. 3.1 приведены значения для основных параметров качества, определенные на основе заметности искажений для трактов звукового вещания. Неравномер-

Таблица 3.1

Класс качества	Параметры трактов для вещательных передач*							
	Частотный диапазон, Гц	Неравномерность, дБ		Коэффициент гармоник, %			Защита от помех, дБ	
		в основном диапазоне	на краях диапазона	до 100 Гц	100—200 Гц	выше 200 Гц	интегральных	внятных
Высший	30—15000	2	6	5	1,0	1,0	55	74
Первый	50—10000	2	6	6	2,5	2,5	52	70
Второй	100—6300	6	16	—	8,0	3,6	46	60
Третий	200—4000	6	16	—	—	7,3	—	—

* От входа микрофона до выхода громкоговорителя.

ность частотной характеристики дана для номинального и основного частотных диапазонов. Коэффициенты гармоник даны для разных частотных диапазонов при работе на номинальном уровне. В табл. 3.2 приведены аналогичные данные для речевых трактов.

Т а б л и ц а 3.2

Градации качества	Параметры трактов для речевой связи		
	Частотный диапазон, Гц	Неравномерность ¹⁾ , дБ	Коэффициент гармоник, %
Отлично	50—10000	±3	3
Хорошо	100—6000	±3	4
Удовлетворительно	300—3400	±3	6
Предельно допустимо	400—2500	±3	—

¹⁾ По отношению к тенденции 6 дБ/окт.

Следует указать на то, что в обоих случаях искажения в основном вносит акустическая часть тракта (первичное помещение, приемник звука, вторичный источник звука, вторичное помещение), на долю остальной части трактов вещания и связи приходится значительно меньшая их часть.

Г л а в а 4

ЭЛЕКТРОМЕХАНОАКУСТИЧЕСКИЕ СИСТЕМЫ И ИХ ЭЛЕМЕНТЫ

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, к механическим и акустическим — массы, упругости, сопротивления потерь (например, на трение) и своего рода механоакустические трансформаторы. Эти элементы комбинируют в электрические, механические и акустические системы в виде различного рода контуров и цепочек, а также в виде электромеханических и электроакустических

жих преобразователей. Под последними подразумевают устройства преобразования колебаний одного вида энергии в другой, например акустических колебаний в электрические или электрических в акустические.

Системы элементов бывают с сосредоточенными и с распределенными параметрами. Акустические и механические системы могут рассматриваться как с сосредоточенными, так и с распределенными параметрами в зависимости от диапазона частот. Например, на низких частотах они чаще всего с сосредоточенными, а на высоких — с распределенными параметрами.

Механические системы конструктивно представляют собой диафрагмы (пластины различной формы), стержни и мембраны. Обычно рассматривают два крайних случая: идеальная диафрагма и идеальная мембрана. Идеальная диафрагма может колебаться только как целое, т. е. как поршень. Это система с сосредоточенными постоянными. Идеальная мембрана колеблется как абсолютно гибкая пластинка, упругость которой придается только ее натяжением (по периметру). Поэтому мембрана — система с распределенными параметрами.

Акустические системы конструктивно представляют собой различного рода резонаторы, трубы открытые и закрытые с одного из концов, различные объемы, акустические фильтры и т. п. Это системы, как правило, с распределенными параметрами и только на низких частотах их приближенно можно рассматривать как системы с сосредоточенными параметрами.

4.2. МЕТОД ЭЛЕКТРОМЕХАНИЧЕСКИХ АНАЛОГИЙ

Электроакустическая аппаратура обычно имеет в своем составе механическую колебательную систему как посредник между электрической и акустической системами. Для решения практических задач, встречающихся при рассмотрении механических и акустических систем, целесообразно использовать удобный и эффективный математический аппарат в виде теории четырехполюсников. Для этой цели были разработаны методы электромеханических аналогий, позволяющие применять этот аппарат непосредственно к механическим системам.

Один из таких методов основан на следующих аналогиях.

Аналогия по переменным характеристикам. Известно, что электрическое напряжение U является причиной движения электрических зарядов. Очевидно, сила F — его аналог, так как она служит причиной движения тел и других механических элементов. Электрический ток в проводнике представляет собой скорость движения зарядов $i = dq/dt$. Аналогом его является скорость движения тел и элементов $v = dx/dt$.

Смещение тела от своего начального положения становится аналогом электрического заряда (сравните с током смещения в полупроводниках).

Аналогия по параметрам. Падение напряжения на индуктивном сопротивлении

$$U = L \frac{di}{dt}.$$

Сопоставляя эту ф-лу со вторым законом Ньютона

$$F_m = m \frac{dv}{dt}$$

и учитывая аналоги по переменным, получаем, что индуктивность служит аналогом массы. Недаром явление самоиндукции называют электрической инерцией. Кинетическая энергия $T = mv^2/2$ и энергия магнитного поля $W_m = Li^2/2$ также аналогичны между собой не только по форме, но и по свойствам.

Падение напряжения на емкостном сопротивлении $U_c = q/C$. Сравнивая это выражение с законом Гука, $F_k = kx$, видим, что электрическая емкость C — аналог обратной величины упругости механической системы k . Если вместо упругости системы взять величину, обратную ей, — гибкость $C_m = 1/k$, то тогда емкость и гибкость будут аналогами. Потенциальная энергия при продольной деформации тела $\Pi = F^2/2k = C_m F^2/2$ и энергия электрического поля конденсатора $W = CU^2/2$ аналогичны между собой по форме и по свойствам.




Падение напряжения на активном сопротивлении $U_R = Ri$ и сила трения $F_r = r_m v$ также аналогичны между собой. Поэтому коэффициент трения и активное электрическое сопротивление — аналоги.

Наконец, отношение напряжения к току — электрическое сопротивление — по существу является аналогом механического сопротивления, если представлять последнее в виде отношения силы к скорости колебаний:

$z_M = F/v$. Это соотношение часто называют законом Ома в механике.

В табл. 4.1 приведены все эти аналоги и там же дано графическое обозначение механических элементов.

Таблица 4.1

Электрические	Механические
Напряжение U Ток i Количество электричества q	Сила F Скорость v Смещение (отклонение) x
Индуктивность L	Масса m 
Емкость C	Гибкость C_M 
Активное сопротивление R	Коэффициент трения r_M 
Полное электрическое сопротивление z	Полное механическое сопротивление z_M

Особенности рассматриваемых аналогий. В табл. 4.2 приведены правила и схемы электрических и механических соединений для рассматриваемого метода аналогий¹⁾. Если взять две пружины с гибкостями C_{M1} и C_{M2} и соединить их последовательно (см. табл. 4.2, рис. а), то общая гибкость будет равна их сумме $C_M = C_{M1} + C_{M2}$. Следовательно, аналогом такого соединения будет параллельное соединение конденсаторов.

Если те же пружины соединить параллельно (см. табл. 4.2, рис. б), то общая упругость увеличится и будет равна сумме упругостей

$$k = k_1 + k_2 \text{ или } 1/C_M = 1/C_{M1} + 1/C_{M2}.$$

Аналогом такого соединения будет последовательное соединение конденсаторов (см. табл. 4.2, рис. б). Ана-

¹⁾ Обозначение элементов в электрических схемах дано с учетом аналогии их механическим элементам.

Механические	Электрические	
	$C = C_{M1} + C_{M2}$	
а)		
	$\frac{1}{C} = \frac{1}{C_{M1}} + \frac{1}{C_{M2}}$	
б)		
	$\frac{1}{\Gamma_M} = \frac{1}{\Gamma_{M1}} + \frac{1}{\Gamma_{M2}}$	
в)		
	$\Gamma_M = \Gamma_{M1} + \Gamma_{M2}$	
г)		

логичная картина получается и для активных сопротивлений (см. табл. 4.2, рис. в и г).

При соединении двух масс общая масса равна их сумме $m = m_1 + m_2$, что соответствует последовательному соединению индуктивностей. Заметим, что подходящего аналога для параллельного соединения индуктивностей пока не найдено.

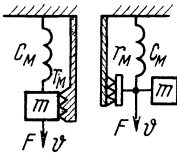
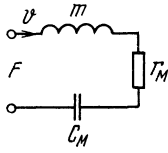
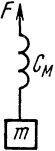
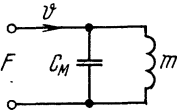
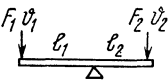
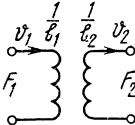
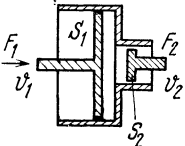
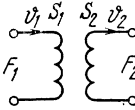
Таким образом получаем, что аналогом параллельного соединения механических сопротивлений является последовательное соединение электрических, а анало-

гом последовательного соединения механических сопротивлений является параллельное соединение электрических. Применим эти аналогии к различным системам.

4.3. МЕХАНИЧЕСКИЕ СИСТЕМЫ

В табл. 4.3 приведены электрические аналоги механических систем.

Таблица 4.3

Механические	Электрические
 <p> $\frac{F}{\dot{v}} = Z_M = T_M + i\omega m + \frac{1}{i\omega C_M}$ $\omega_0 = \frac{1}{\sqrt{m C_M}}$ </p>	
 <p> $\frac{F}{\dot{v}} = Z_M = \frac{\frac{m}{C_M}}{i\omega m + \frac{1}{i\omega C_M}}$ $\rho = \sqrt{\frac{m}{C_M}}$ </p>	
 <p> $\frac{F_1}{F_2} = \frac{\dot{v}_2}{\dot{v}_1} = \frac{\ell_2}{\ell_1}$ </p>	
 <p> $\frac{\dot{v}_2}{\dot{v}_1} = \frac{F_1}{F_2} = \frac{p S_1}{p S_2} = \frac{S_1}{S_2}$ </p>	

Если взять механическую колебательную систему с параллельным соединением механических элементов (т. е. узел) и приложить к их узлу силу F (см. табл. 4.3,

рис. а), тогда уравнение вынужденных колебаний будет иметь вид

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

Напишем аналогичное ему выражение для вынужденных колебаний электрической системы

$$L \frac{d^2q}{dt^2} + R \frac{dq}{dt} + \frac{q}{C} = U.$$

Но это уравнение соответствует контуру с последовательным соединением электрических элементов (см. табл. 4.3, рис. а). Таким образом, узел механических сопротивлений и контур из последовательно соединенных электрических сопротивлений аналогичны друг другу. Соответственно этому на частоте ω сопротивления: электрическое

$$z = R + i\omega L + \frac{1}{i\omega C} = Z e^{i\varphi},$$

где $Z = \sqrt{R^2 + \left(\omega L - \frac{1}{\omega C}\right)^2}$; $\operatorname{tg} \varphi = \frac{\omega L - \frac{1}{\omega C}}{R}$;

механическое

$$z_m = r_m + i\omega m + \frac{1}{i\omega C_m} = Z_m e^{i\psi},$$

где $Z_m = \sqrt{r_m^2 + \left(\omega m - \frac{1}{\omega C_m}\right)^2}$; $\operatorname{tg} \psi =$

$$= \frac{\omega m - \frac{1}{\omega C_m}}{r_m},$$

(4.1)

имеют аналогичную форму.

На рис. 4.1 показана зависимость скорости колебаний от частоты при постоянстве амплитуды приложенной силы для рассматриваемой механической системы. Для такой системы резонансная частота

$$\omega_0 = 1/\sqrt{mC_m} = \sqrt{k/m}; f_0 = \omega_0/2\pi$$

(4.2)

и добротность

$$D = \frac{1}{r_m} \sqrt{\frac{m}{C_m}} = \frac{f_0}{\Delta f},$$

где Δf — ширина полосы пропускания контура на уровне 0,71 (см. рис. 4.1).

Точно также можно показать, что аналогом контура из параллельно соединенных электрических элементов будет служить соединение механических элементов цепочкой, т. е. последовательное соединение (см. табл. 4.3, рис. б). Аналогом для рычага первого рода служит трансформатор, причем отношение плеч рычага l_1/l_2 соответствует коэффициенту трансформации n (см. табл. 4.3, рис. в), а для рычага второго рода — автотрансформатор.

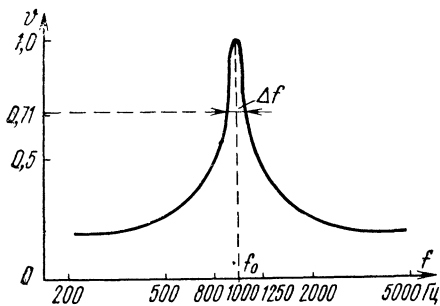


Рис. 4.1. Зависимость скорости колебаний от частоты для механической колебательной системы

Аналогом электрического трансформатора может также служить механический трансформатор — последовательное соединение двух трубок небольшой длины и диаметра ¹⁾ (см. табл. 4.3, рис. г). По закону Паскаля давление в обеих трубках одинаково, поэтому отношение сил пропорционально отношению поперечных сечений трубок $F_1/F_2 = pS_1/pS_2 = S_1/S_2$.

Пренебрегая сжатием среды, получим, что $v_2S_2 = v_1S_1$ или $v_2/v_1 = S_1/S_2$, т. е. отношение скоростей колебаний обратно пропорционально отношению сечений, следовательно, коэффициент трансформации равен отношению сечений трубок:

$$n = F_2/F_1 = v_1/v_2 = S_2/S_1. \quad (4.3)$$

Такой трансформатор применяют в электроакустической аппаратуре для согласования механических сопротивлений.

4.4. АКУСТИЧЕСКИЕ СИСТЕМЫ

Для анализа акустических систем разработаны метод и система электроакустических аналогий. По этому методу давление считают аналогом напряжения, скорость колебаний v — аналогом плотности тока, а объемную

¹⁾ По сравнению с длиной звуковой волны.

скорость колебаний $U = vS$ (где S — поперечное сечение звукопровода) — аналогом тока.

Этим методом аналогий удобно пользоваться при рассмотрении устройств, состоящих только из акустических систем типа звукопроводов, например акустических фильтров. При анализе преобразователей, состоящих из комбинаций электрических и механических систем, удобнее пользоваться вышерассмотренным методом электромеханических аналогий.

Рассмотрим *резонатор Гельмгольца* (см. табл. 4.4, рис. а) как механическую колебательную систему, у которой масса m равна массе воздуха в горле резонатора, активное сопротивление r_m равно сумме сопротивления вязкости воздуха и сопротивления излучения в окружающую среду, а гибкость C_m — гибкости воздуха в полости резонатора¹⁾, т. е. $m = \rho l S$; $C_m = V / \gamma p_{ac} S^2$, где l — длина горла резонатора; S — поперечное сечение горла; V — объем полости резонатора.

Тогда собственная частота такого резонатора с учетом (1.3)

$$\omega_0 = 1 / \sqrt{m C_m} = \sqrt{\gamma p_{ac} S / \rho l V} = c \sqrt{S / l V}. \quad (4.4)$$

Если резонатор будет иметь второе отверстие, например в дне полости (*двойной резонатор Гельмгольца*), то, в отличие от схемы обычного резонатора (см. табл. 4.4, рис. а), механическую цепочку (состоящую из отверстия длиной l_2 и площадью S) находящуюся за объемом V , можно представить сопротивлением составленным из индуктивности m_2 и сопротивления r_{m2} , подключенных параллельно емкости C_m (см. табл. 4.4б).

Известно, что волновое сопротивление длинной электрической линии $Z_B = \sqrt{L_1 / C_1}$, где L_1 и C_1 — индуктивность и емкость на единицу длины линии. Заменяя их согласно аналогиям на массу m_1 и гибкость C_1 , приходящихся на единицу трубы, получим $Z_{м.в} = \sqrt{m_1 / C_{1м}}$, где $m_1 = \rho l S / l = \rho S$; $C_{1м} = V / \gamma p_{ac} S^2 l = 1 / \gamma p_{ac} S$; V — объем трубы; l — ее длина; S — поперечное сечение трубы. От-

¹⁾ Если взять полость цилиндрической формы с длиной l_n и поперечным сечением S_n , то ее гибкость будет $l_n / \gamma p_{ac} S_n$, где γp_{ac} представляет собой модуль упругости воздуха при адиабатическом процессе. Пересчитанная к горлу резонатора гибкость полости в соответствии с коэффициентом трансформации $n = S / S_n$ при замене произведения $S_n l_n$ на объем V будет $C_m = V / \gamma p_{ac} S^2$.

Акустические	Электрические	
	$m = \rho l S$ $C_M = \frac{V}{\gamma p_{ac} S^2}$	
	$m_1 = \rho l_1 S_1$ $m_2 = \rho l_2 S_2$ $C_M = \frac{V}{\gamma p_{ac} S^2}$	
	$m_1 = \rho S l$ $C_{M1} = \frac{1}{\gamma p_{ac} S}$ $\frac{F}{v} = Z_{Bx}$ $\rho_B = \sqrt{\frac{m_1}{C_{M1}}} = \rho c S$	
	$m = \rho l S_2$ $Z_H C_M = \frac{V}{\gamma p_{ac} S_2^2}$	

куда с учетом $\gamma p_{ac} = c^2 \rho$ механическое волновое сопротивление длинной трубы $Z_{м.в} = \sqrt{\rho S \gamma p_{ac} S} = \rho c S$.

Кстати, если пользоваться электроакустическими аналогиями, то волновое акустическое сопротивление трубы $Z_{в} = p/U_a = p/vS = \rho c/S$. Это сопротивление полу-

чается в S^2 раз меньше механического волнового сопротивления, определенного по электромеханическим аналогиям.

В отсутствии отражений от конца трубы, что получается при согласовании нагрузки трубы и волнового сопротивления ($Z_H = Z_{м.в}$), входное механическое сопротивление трубы будет определяться плоской бегущей волной, т. е.

$$Z_{вх} = \frac{F}{v} = \frac{\rho S}{v} = \rho c S. \quad (4.5)$$

При наличии отражений от концов труба будет резонировать на определенных частотах, которые определяются ее длиной и условиями отражения от ее концов, как и в случае электрических линий.

Широкое применение имеют различного рода акустические фильтры. В табл. 4.4 (рис. 2, д) приведены аналоги акустического фильтра НЧ и полосового фильтра.

4.5. ЭЛЕКТРОМЕХАНИЧЕСКИЕ ПРЕОБРАЗОВАТЕЛИ

Основные положения теории четырехполюсников. На рис. 4.2 показан линейный четырех-

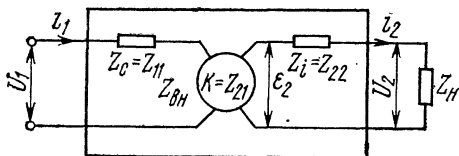


Рис. 4.2. Эквивалент четырехполюсника

полюсник, представляющий пассивный преобразователь колебаний. Со стороны входа четырехполюсник представляет собой некоторое сопротивление $Z_{вх} = U_1/i_1$, состоящее из двух последовательно соединенных частей: постоянной, не зависящей от сопротивления нагрузки во вторичной цепи, Z_c и переменной $Z_{вн}$, зависящей от тока во вторичной цепи (см. рис. 4.2). Исходя из этого, можно написать уравнение

$$U_1 = z_{11}i_1 + z_{12}i_2 \text{ или } U_1 = z_{\text{вх}}i_1 = z_c i_1 + z_{\text{вн}}i_1, \quad (4.6)$$

где U_1 —напряжение на входе четырехполюсника; i_1, i_2 —токи на входе и выходе четырехполюсника; $z_{11} = z_c$ —постоянная часть входного сопротивления, называемая *собственным сопротивлением* четырехполюсника; $z_{12} = K_1$ —коэффициент пропорциональности между током во вторичной цепи и напряжением на переменной части входного сопротивления, называемой *вносимым сопротивлением* $z_{\text{вн}}$.

Собственное входное сопротивление определяют при работе четырехполюсника на холостом ходу:

$$z_c = \frac{U_1}{i_1} \Big|_{i_2=0},$$

а вносимое сопротивление $z_{\text{вн}} = U_1/i_1 - z_c = z_{\text{вх}} - z_c$. Со стороны выхода четырехполюсник представляет собой генератор с ЭДС \mathcal{E} , определяемой током в первичной цепи, и *внутренним сопротивлением* z_{22} (см. рис. 4.2). Исходя из этого, можно написать уравнение

$$U_2 = z_{21}i_1 + z_{22}i_2 \text{ или } U_2 = \mathcal{E}_2 - z_i i_2, \quad (4.7)$$

где U_2 —напряжение на выходе четырехполюсника; $z_{22} = z_i$ —внутреннее сопротивление генератора; $z_{21} = K_2$ —коэффициент пропорциональности между ЭДС эквивалентного генератора \mathcal{E}_2 и током в первичной цепи, называемый *коэффициентом связи* (он имеет размерность сопротивления). Внутреннее сопротивление генератора определяют при работе четырехполюсника в режиме короткого замыкания:

$$z_i = z_{21} \frac{i_1}{i_2} \Big|_{z_{\text{н}}=0},$$

а коэффициент связи — в режиме холостого хода:

$$K_2 = z_{21} = \frac{U_2}{i_1} \Big|_{i_2=0} = \frac{\mathcal{E}_2}{i_1}.$$

Из (4.6) и (4.7) получаем вносимое сопротивление

$$z_{\text{вн}} = \frac{z_{12}i_2}{i_1} = \frac{z_{12}\mathcal{E}_2}{(z_{\text{н}} + z_{22})i_1} = \frac{z_{12}z_{21}}{z_{\text{н}} + z_i} = \frac{K_1K_2}{z_{\text{н}} + z_i}, \quad (4.8)$$

где $z_{\text{н}}$ — сопротивление нагрузки во вторичной цепи.

Вносимое сопротивление для любого из пассивных преобразователей определяет количество энергии, передаваемой во вторичную цепь. Коэффициент связи — реакция вторичной цепи, определяющая ЭДС, создаваемую во вторичной цепи. В обратимых четырехполюсниках эта реакция одинакова в обе стороны¹⁾.

Отсюда следует равенство абсолютных значений коэффициентов сопротивлений связи для обоих направлений:

$$|U_1/i_2|_{i_1=0} = |U_2/i_1|_{i_2=0} \text{ или} \\ |K_1| = |K_2| = K_{св}. \quad (4.9)$$

Электромеханические преобразователи. Электромеханические преобразователи являются четырехполюсниками, у которых одна сторона механи-

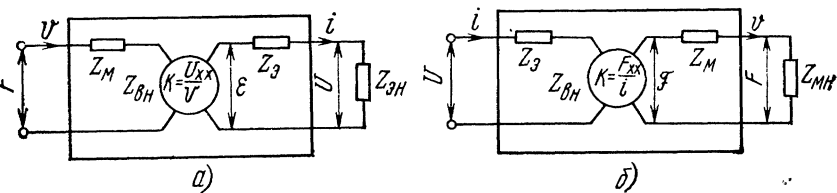


Рис. 4.3. Эквиваленты четырехполюсников: а) механоэлектрического (генератор); б) электромеханического (двигатель)

ческая, а другая — противоположная — электрическая. Рассмотрим электрогенератор (механоэлектрическую систему) и электродвигатель (электромеханическую систему).

Соответствующие модели приведены на рис. 4.3. Для генератора имеем вносимое механическое сопротивление

$$z_{м.вн} = |K_{св}|^2 / (z_э + z_{э.н}), \quad (4.8a)$$

где $z_э$ — внутреннее сопротивление генератора; $z_{э.н}$ — сопротивление его нагрузки и коэффициент электромеха-

¹⁾ Согласно теореме взаимности для обратимого четырехполюсника, если поменять местами вход и выход, то при одинаковом входном токе будет одинаковое выходное напряжение на холостом ходу.

нической связи (обозначение символов см. на рис. 4.3а)

$$K_{св} = \frac{\mathcal{E}}{v} = \frac{U}{v} \Big|_{i=0}. \quad (4.9а)$$

Для двигателя вносимое электрическое сопротивление

$$z_{э.вн} = |K_{св}|^2 / (z_m + z_{м.н}) \quad (4.8б)$$

и коэффициент электромеханической связи (рис. 4.3б)

$$K_{св} = \frac{\mathcal{F}}{i} = \frac{F}{i} \Big|_{v=0}. \quad (4.9б)$$

Применим эти формулы к магнитоэлектрическим системам, называемым в акустике электродинамическими. Из электротехники известны следующие выражения: для наводимой ЭДС $\mathcal{E} = Blv$ и для силы, действующей на проводник с током, $\mathcal{F} = Bli$, где B — индукция магнитного поля; l — длина проводника, откуда коэффициент электромеханической связи (4.9а) и (4.9б) для этих систем

$$K_{св} = Bl. \quad (4.10)$$

На холостом ходу вносимое сопротивление $z_{вн} = 0$ (4.8а) и (4.8б), так как сопротивление нагрузки бесконечно большое.

Интересно отметить, что заторможенный двигатель (скорость равна нулю) аналогичен работе четырехполюсника на холостом ходу (ток во вторичной цепи равен нулю). А холостая работа двигателя аналогична работе четырехполюсника на маленькое сопротивление нагрузки (скорость наибольшая, т. е. когда выходной ток максимальный).

Кроме электродинамических систем преобразования, в электроакустике применяются электростатические, электромагнитные, угольные и другие преобразователи.

Глава 5

МИКРОФОНЫ

5.1. ОПРЕДЕЛЕНИЯ

Микрофоны — это преобразователи акустических колебаний в электрические. Большинство микрофонов является преобразователями акустической энергии в элект-

рическую. Есть микрофоны, основанные на другом принципе — релейном. В них под действием акустических колебаний происходит преобразование энергии постоянного тока в энергию переменного тока (см. § 5.8).

Рассмотрим технические показатели микрофонов [86].

Чувствительность — отношение напряжения U на выходе микрофона к звуковому давлению p , действующему на микрофон:

$$E = U/p. \quad (5.1)$$

Чувствительность определяют в зависимости от задания или по напряжению холостого хода, или по напряжению на номинальной нагрузке. За номинальную нагрузку обычно принимают модуль внутреннего сопротивления микрофона на частоте 1000 Гц.

Внутреннее сопротивление микрофона z_i . Для ряда микрофонов оно активно и практически не зависит от частоты. Если внутреннее сопротивление зависит от частоты, в справочниках приводят или среднее значение по частотному диапазону или модуль на частоте 1000 Гц.

Чувствительность по давлению — чувствительность при звуковом давлении, действующем только на поверхность звуковоспринимающего элемента и распределенным по нему равномерно.

Чувствительность по свободному полю — это чувствительность при воздействии на микрофон звукового давления в свободном поле p_n , когда напряжение на выходе микрофона относят к звуковому давлению в точке поля до размещения в ней микрофона:

$$E_n = U/p_n. \quad (5.2a)$$

Свободным полем называют область звукового поля, в которой влияние отражающих поверхностей пренебрежимо мало.

Чувствительность по диффузному полю — чувствительность при воздействии на микрофон звукового давления в диффузном поле $p_{\text{диф}}$, причем напряжение на выходе микрофона относят к звуковому давлению в точке поля до размещения в ней микрофона:

$$E_{\text{диф}} = U/p_{\text{диф}}. \quad (5.26)$$

Диффузным полем называют область звукового поля, в каждой точке которого плотность звуковой энергии и поток акустической энергии ¹⁾ на единицу площади одинаковы во всех направлениях.

Чувствительность микрофона зависит от частоты, поэтому введено понятие средней чувствительности—среднеквадратичное значение в номинальном диапазоне частот, причем усредняют чувствительность, измеренную на частотах, распределенных равномерно в логарифмическом масштабе.

Уровень чувствительности — чувствительность, выраженная в децибелах относительно величины 1 В/Па.

Стандартный уровень чувствительности—выраженное в децибелах отношение напряжения $U_{1н}$, развиваемого на номинальном сопротивлении нагрузки $R_{ном}$ при звуковом давлении 1 Па, к напряжению, соответствующему мощности $P_0=1$ мВт, т. е. уровень мощности, отдаваемой микрофоном в номинальную нагрузку при $p=1$ Па,

$$N_M = 20 \lg (U_{1н} / \sqrt{R_{ном} P_0}) = 20 \lg (E_H / \sqrt{R_{ном} \cdot 10^{-3}}), \quad (5.3)$$

$$\text{или } N_M = 10 \lg (U_{1н} / R_{ном} P_0),$$

где $E_H = U_H / p = U_{1н}$; U_H —напряжение на номинальной нагрузке.

Частотная характеристика — зависимость уровня чувствительности от частоты. Ее неравномерность определяют в номинальном частотном диапазоне для данного типа микрофона (см. рис. 3.4).

Характеристика направленности — зависимость чувствительности микрофона в свободном поле от угла θ между рабочей ²⁾ осью микрофона и направлением на источник звука. Эту характеристику определяют или на ряде частот, или для полосы частот. Обычно приводят нормированную характеристику направлен-

¹⁾ В [86] вместо «энергии» ошибочно напечатано «мощности», что противоречит общепринятому понятию потока.

²⁾ Рабочей осью микрофона называют направление, по которому микрофон имеет наибольшую чувствительность. Эта чувствительность называется осевой. Для большинства микрофонов рабочая ось совпадает с геометрической. В том случае, когда этого совпадения нет, рабочую ось указывают в описании. В дальнейшем для краткости опускаем прилагательное «рабочая».

ности, т. е. зависимость отношения чувствительности E_θ измеренной под углом θ , к осевой чувствительности $E_{ос}$:

$$R(\theta) = E_\theta / E_{ос}. \quad (5.4)$$

Большинство микрофонов имеет осевую симметрию, поэтому характеристика направленности для них одинакова во всех плоскостях, проходящих через ось микрофона. По характеристике направленности микрофоны делятся на ненаправленные, односторонне направленные, остро односторонне направленные, двунаправленные и остро направленные. Графическое представление характеристик направленности часто дают в полярных координатах (рис. 5.1). Такой график называют *диаграммой направленности*.

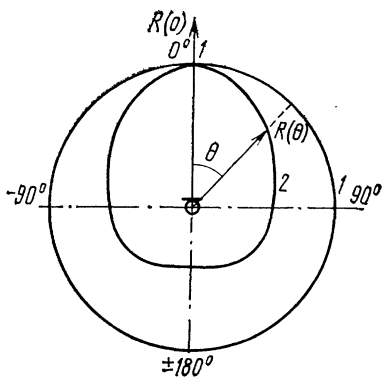


Рис. 5.1. Диаграмма направленности микрофона:

1 — для малых размеров микрофона в сравнении с длиной волны; 2 — при равенстве диаметра микрофона длине звуковой волны

В ряде случаев радиус-вектор выражают в децибелах, т. е. $R_{[дб]}(\theta) = 20 \lg R(\theta)$. Очевидно, что из-за направленности микрофона его чувствительность по диффузному полю, т. е. чувствительность, определенная при приходе звуковых волн к микрофону под всевозможными углами, будет меньше *осевой чувствительности*. Для учета величины этого уменьшения введен коэффициент направленности — отношение квадрата осевой чувствительности микрофона в свободном поле $E_{ос}^2$ к среднему из квадратов чувствительности по всем радиальным направлениям $E_{диф}^2$, т. е.

$$\Omega = E_{ос}^2 / E_{диф}^2. \quad (5.5)$$

Его определяют на ряде частот или для полосы частот.

Коэффициент направленности можно определить по специальному графику-шаблону (см. [86]) или при осевой симметрии по ф-ле

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

(вывод см. [1], стр. 109).

Индекс направленности — коэффициент направленности, выраженный в децибелах,

$$Q_M = 10 \lg \Omega \quad (5.6)$$

или, учитывая ф-лы (5.5) и (5.3),

$$Q_M = 10 \lg \frac{E_{oc}^2}{R_{ном} P_0} - 10 \lg \frac{E_{диф}^2}{R_{ном} P_0} = N_{м.о} - N_{диф}, \quad (5.7)$$

где $N_{м.о}$ — стандартный уровень чувствительности, измеренный на оси микрофона, т. е. стандартный уровень осевой чувствительности; $N_{диф}$ — стандартный уровень диффузной чувствительности. Индекс направленности показывает разницу в уровнях мощности, развиваемой микрофоном, при действии двух источников звука: одного (например, голоса лектора), расположенного на оси, и другого — источника рассеянных звуковых волн (например, шумовых), если оба создают в точке микрофона одинаковое давление. Иными словами, индекс направленности показывает величину подавления шума по отношению к сигналу, приходящему по оси микрофона.

Для ненаправленного микрофона $N_{м.о} = N_{диф}$ и индекс направленности равен нулю. Это означает, что такой микрофон не подавляет шум по отношению к сигналу.

Перепад чувствительности «фронт/тыл» — отношение чувствительности микрофона E_{oc} (в направлении оси) к чувствительности E_{180} (под углом 180° к его оси). Обычно его определяют в децибелах:

$$Q_{0/180} = 20 \lg (E_{oc}/E_{180}) = N_{м.о} - N_{м180}, \quad (5.8)$$

где N_{180} — стандартный уровень чувствительности микрофона, определенный под углом 180° к оси.

Большой интерес для практики представляет еще один показатель микрофона, не включенный в ГОСТ, — индекс «фронт/тыл» $Q_{ф/т}$. Под ним подразумевают разность между уровнями электрической мощности, развиваемой микрофоном на нагрузке при раздельном воздействии на него диффузного поля с фронтальной и ты-

льной полусфер, при условии равенства звуковых давлений, действующих с фронта и тыла микрофона:

$$Q_{\phi/\tau} = N_{\phi} - N_{\tau}. \quad (5.8a)$$

Этот индекс показывает, насколько уровень, развиваемый микрофоном от сигнала, поступающего с фронтальной полусферы (например, от оркестра), будет выше уровня, развиваемого микрофоном от действия помех, приходящих с тыльной полусферы (например, от шумов публики), при условии, что уровни сигнала и помех будут одинаковыми. Иными словами, этот индекс показывает величину дискриминации шума по отношению к сигналу.

Уровень собственного шума. Даже в отсутствии какого-либо акустического сигнала около микрофона напряжение на его выходе не равно нулю. Наличие напряжения является следствием флуктуаций частиц в окружающей среде, а также тепловых шумов сопротивлений в электрической части микрофона.

Уровень собственного шума микрофона, приведенный к акустическому входу, определяют как уровень эквивалентного звукового давления $p_{ш}$, при воздействии которого на микрофон получалось бы выходное напряжение, равное выходному напряжению микрофона $U_{ш}$, развиваемому им в отсутствии звуковых колебаний, т. е.

$$L_{ш} = 20 \lg (p_{ш}/p_0), \quad (5.9)$$

где $p_{ш} = U_{ш}/E_{ос}$; $p_0 = 2 \cdot 10^{-5}$ Па.

В соответствии с (5.3) можно выразить акустический уровень собственного шума микрофона через стандартный уровень осевой чувствительности $N_{м.о}$ и уровень электрической мощности шумов $N_{э.ш}$:

$$N_{ш.о} = N_{э.ш} - N_{м.о} = L_{ш} + 20 \lg p_0 = L_{ш} - 94,$$

где $N_{э.ш} = 10 \lg \frac{U_{ш}^2}{R_{ном} P_0}$; $P_0 = 1$ мВт.

Этим выражением обычно пользуются при измерении уровня собственных шумов микрофона.

Чувствительность звеньев микрофона. Чувствительность микрофона можно представить как произведение чувствительностей отдельных звеньев, входящих в него.

Для большинства микрофонов осевую чувствительность можно представить в следующем виде:

$$E_{oc} = \frac{U}{p} = \frac{F}{p} \frac{v}{F} \frac{\mathcal{E}}{v} \frac{U}{\mathcal{E}}, \quad (5.10)$$

где F/p — акустическая чувствительность; $v/F = 1/Z_M$ — механическая чувствительность; $\mathcal{E}/v = K_{св}$ — коэффициент электромеханической связи; $v/\mathcal{E} = R_H/|R_H + z_i|$ — электрическая (нагрузочная) характеристика; Z_M — механическое сопротивление подвижной системы микрофона (модуль); R_H — сопротивление нагрузки; z_i — внутреннее сопротивление микрофона. Обычно подбирают чувствительности звеньев так, чтобы общая чувствительность микрофона имела возможность меньшую зависимость от частоты, для чего используют метод взаимной коррекции частотных характеристик отдельных звеньев, входящих в микрофон.

Микрофоны по принципу электромеханического преобразования делятся на электродинамические, электростатические, электромагнитные и релейные. Электродинамические микрофоны по конструкции механической системы делятся на катушечные (в СССР их называют динамическими) и ленточные. Электростатические делятся на конденсаторные, в том числе и электретные, и пьезомикрофоны. Электромагнитные — на односторонние и дифференциальные. Релейные — на угольные и транзисторные.

5.2. АКУСТИЧЕСКИЕ ХАРАКТЕРИСТИКИ МИКРОФОНОВ

По акустическим характеристикам микрофоны делятся на приемники давления, приемники градиента давления различных порядков (преимущественно первого и иногда второго порядка), комбинированные и групповые.

Приемники давления. Характерной особенностью приемника давления является то, что его подвижная механическая система (например, диафрагма) открыта для действия звуковых волн только с одной стороны (рис. 5.2). Звуковые волны, длина которых больше размеров микрофона, огибают его. В этом случае давление у микрофона будет такое же, как и в свободном поле. Вследствие этого сила, действующая на диафрагму

микрофона, $F = pS$, а акустическая чувствительность $F/p = S$, где S — поверхность подвижной системы микрофона. В этом случае характеристика направленности будет сферической, т. е. микрофон будет ненаправленным. Так, для получения ненаправленного микрофона в диапазоне частот до 10 000 Гц ($\lambda = 3,4$ см) размеры микрофона должны быть менее 1,7 см.

Если размеры микрофона велики по сравнению с длиной волны, то давление, действующее на диафрагму при падении волны по его оси, будет удваиваться по отношению к давлению в свободном поле из-за отражения волн от поверхности микрофона¹⁾. Тогда акустическая чувствительность $F/p = 2S$. Пределы изменения давления по отношению к свободному полю $p \div 2p$, а акустической чувствительности

$$F/p = (1 \div 2) S. \quad (5.11)$$

Если звуковая волна падает на микрофон сбоку или сзади, то в общем случае звуковое давление, действующее на диафрагму, уменьшается из-за ослабления волны при огибании микрофона. Поэтому характеристика направленности будет заостряться тем сильнее, чем больше размеры микрофона по отношению к длине волны (см. рис. 5.2).

Приемник градиента давления. У приемника градиента давления подвижная механическая система открыта для звуковых волн с обеих сторон, поэто-

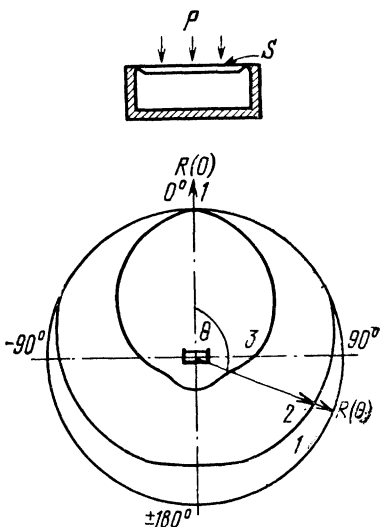


Рис. 5.2. Принцип действия приемника давления и его диаграммы направленности для разных отношений d/λ :

1 — 0,1; 2 — 0,5; 3 — 2,0

¹⁾ Звуковое давление отраженной волны практически равно звуковому давлению падающей волны, а сдвиг фаз между ними равен нулю, поэтому давления суммируются арифметически (см. § 7.4).

му на нее действует разность давлений волн падающей на фронтальную поверхность диафрагмы и огибающей диафрагму с тыльной стороны. Приемники градиента давления делят на симметричные (рис. 5.3) и асимметричные. Акустическая чувствительность такого приемника определяется по формуле

$$\frac{F}{p} = \frac{(p_{\phi} - p_{\tau}) S}{p} \approx \frac{(p_{\phi} - p_{\tau}) S}{p_{\phi}} = \frac{p_p}{p_{\phi}} S, \quad (5.12)$$

где p — давление в свободном звуковом поле; p_{ϕ} — давление у фронтальной поверхности диафрагмы (оно практически равно давлению

в поле, так как размеры микрофона обычно малы по сравнению с минимальной длиной звуковой волны); p_{τ} — давление у тыльной поверхности диафрагмы; S — поверхность диафрагмы.

Разность давлений $p_p = p_{\phi} - p_{\tau}$ получается вследствие разности хода звуковых волн Δr , т. е., во-первых, из-за образующейся разности фаз фронтальной и тыльной волн и, во-вторых, из-за разности амплитуд обеих волн, если приемник находится близко к источнику звука. Разность фаз между обеими волнами

$$\varphi = 2\pi \Delta r / \lambda = \omega \Delta r / c. \quad (5.13)$$

(5.13)

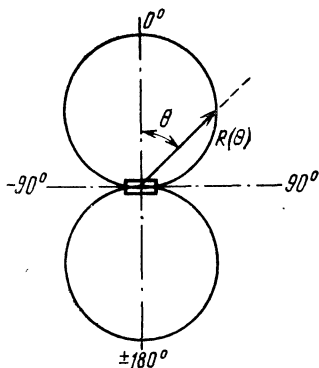
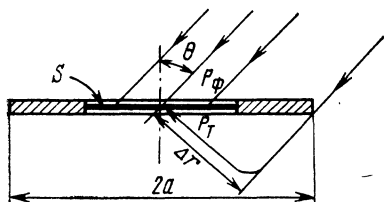
Рис. 5.3. Принцип действия приемника градиента давления и диаграмма его направленности

Относительная разность амплитуд для сферических волн (1.16а)

$$\frac{(p_1/r) - [p_1/(r + \Delta r)]}{p_1/r} \approx \frac{\Delta r}{r}. \quad (5.14)$$

(5.14)

На низких частотах длина волны велика по сравнению с разностью хода, поэтому для приемника, удаленного от источника звука, результирующее давление p_p ,



равное разности давлений фронтальной и тыльной волн, будет очень мало (поскольку оба давления близки друг к другу по фазе и амплитуде). С увеличением частоты разность фаз (5.13) нарастает, поэтому результирующее давление p_p растет. Когда разность фаз (5.13) достигает π , оба давления оказываются в фазе и давление p_p удваивается по сравнению с давлением фронтальной волны. При этом разность хода Δr будет равна половине длины волны.

Следовательно, для получения непрерывного роста акустической чувствительности с повышением частоты необходимо, чтобы ширина приемника $2a$ (рис. 5.3) была бы меньше наименьшей длины волны рабочего диапазона. Например, для верхней границы 10 кГц $\lambda = 3,4$ см, Δr должно быть менее 1,7 см (рис. 5.4).

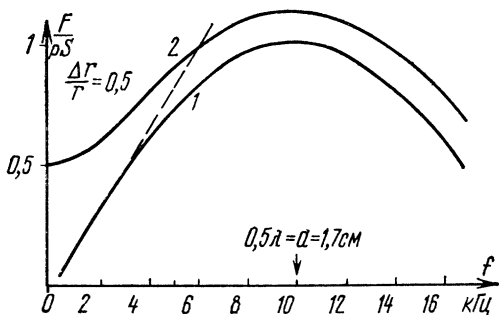


Рис. 5.4. Акустическая чувствительность приемника градиента давления:

1 — для плоской волны (удаленного источника звука); 2 — для ближнего источника звука

Если приемник находится близко к источнику звука, то создается разность амплитуд фронтальной и тыльной волн (5.14). Эта разность не зависит от частоты. Поэтому на низких частотах для близких расстояний результирующее давление будет определяться разностью амплитуд, из-за чего чувствительность этого приемника для ближнего источника будет выше, чем для удаленного источника звука, и не будет зависеть от частоты (см. рис. 5.4, кривая 2, вычисленная для $\Delta r/r = 0,5$).

Из этой же кривой видно, что на высоких частотах, для которых $\Delta r/r \leq 2\pi\Delta r/\lambda$, на величину чувствительности будет влиять и разность фаз, поэтому результирующая

щее давление будет определяться суммарным действием обоих факторов и даже с преобладанием последнего (см. рис. 5.4). В результате общее изменение чувствительности от самых низких частот до самых высоких будет меньше, чем для удаленного источника звука.

Если микрофон — приемник градиента давления — путем взаимной коррекции отдельных звеньев отрегулирован так, что его частотная характеристика, снятая для удаленного источника звука, будет близка к оптимальной, то при приближении его к источнику звука микрофон будет подчеркивать низкие частоты («бубнить»). Если же микрофон отрегулирован так, что его частотная характеристика близка к оптимальной при близком расположении его к источнику звука, то при работе с удаленным источником он будет подчеркивать высокие частоты.

Найдем соответствующие аналитические соотношения для приемника градиента давления первого порядка. Для сферической волны (1.16) имеем следующую разность давлений фронтальной и тыльной волн:

$$p_p = p_\Phi - p_T = \frac{p_1}{r} e^{i\omega \left(t - \frac{r}{c}\right)} - \frac{p_1}{r + \Delta r} e^{i\omega \left(t - \frac{r + \Delta r}{c}\right)} = \\ = \frac{p_1}{r} e^{i\omega \left(t - \frac{r}{c}\right)} \left[1 - \frac{r}{r + \Delta r} e^{-i \frac{\omega \Delta r}{c}} \right].$$

После преобразования получим

$$p_p = p_\Phi \left[1 - \frac{r - \Delta r}{r} e^{-i \frac{\omega \Delta r}{c}} \right] \approx p_\Phi \left[1 - \left(1 - \frac{\Delta r}{r} \right) \times \right. \\ \left. \times \left(1 - i \sin \frac{\omega \Delta r}{c} \right) \right],$$

что справедливо для случая, когда $\cos \frac{\omega \Delta r}{c} \approx 1$, т. е. $\Delta r < \lambda_{\text{мин}}/6$.

В итоге находим $p_p = p_\Phi \left[\frac{\Delta r}{r} + i \sin \frac{\omega \Delta r}{c} \right]$.

Для амплитуд это выражение имеет вид

$$p_p = p_\Phi \sqrt{\left(\frac{\Delta r}{r}\right)^2 + \sin^2 \frac{\omega \Delta r}{c}}.$$

Это выражение количественно определяет результирующее давление, действующее на диафрагму. Подставляя его в ф-лу (5.12) и

учитывая, что для рабочего диапазона $p=p_{\phi}$, находим акустическую чувствительность

$$\frac{F}{p} = S \sqrt{\left(\frac{\Delta r}{r}\right)^2 + \sin^2 \frac{\omega \Delta r}{c}}$$

а если $\Delta r < \lambda_{\text{мин}}/2$, то $F/p = S \sqrt{(\Delta r/r)^2 + (\omega \Delta r/c)^2}$. Заменяя в этом выражении $c/\omega r$ через тангенс сдвига фаз в сферической волне [см. (1.19)], получим $F/p = S \frac{\omega \Delta r}{c} / \cos \psi$. Из рис. 5.3 следует, что разность хода для симметричного приемника градиента давления $\Delta r \approx a \cos \theta$,

$$(5.15)$$

где $2a$ — ширина приемника звука (ширина диафрагмы с акустическим экраном); θ — угол падения волны по отношению к оси микрофона.

Окончательно при замене Δr , согласно (5.15), находим

$$\frac{F}{p} = S \frac{\omega a \cos \theta}{c} / \cos \psi. \quad (5.16)$$

В этом выражении учтены как фактор сдвига фаз, так и фактор близости к источнику звука. Последний учитывается $\cos \psi$, т. е. определяется сдвигом фаз между давлением и скоростью колебаний.

Для расстояния от источника звука, равного 1 м, и при частоте $f=100$ Гц из ф-лы (1.19) получаем $\text{tg} \psi = 0,55$, а $\cos \psi = 0,9$, т. е. в этом случае поправка $\cos \psi$ уже может не учитываться. Анализ полученного выражения целиком подтверждает ранее высказанные выводы о частотной характеристике приемника градиента давления. Из этого же выражения можно видеть, что характеристика направленности такого приемника представляет собой косинусоиду в полярных координатах (см. рис. 5.3). Заметим также, что форма этой характеристики не зависит от частоты.

Приемник градиента давления даже при удаленном расположении микрофона от исполнителя вносит дискриминацию в прием шума: индекс направленности его (5.6) вследствие косинусоидальной характеристики направленности равен 4,8 дБ. Следовательно, при равных звуковых давлениях, создаваемых исполнителем, находящимся на оси микрофона, и диффузными шумами в точке расположения микрофона уровень, развиваемый микрофоном от сигнала, будет выше на 4,8 дБ, чем от шумов [см. ф-лу (5.7)].

Если микрофон приближать ко рту исполнителя, то на низких частотах вследствие разности амплитуд фронтальной и тыльной волн дискриминация шума будет повышаться, так как чувствительность микрофона к шумам остается прежней, а чувствительность к сигналу, исходящему от исполнителя, увеличивается [см. (5.16)] в $k=1/\cos\varphi$. Например, при расстоянии от рта исполнителя, равном 2 см, на частоте 100 Гц коэффициент $k=27$, т. е. дискриминация шума будет равна $20 \lg 27=28,6$ дБ. С учетом индекса направленности подавление шума будет $Q_M=28,6+4,8=33,4$ дБ. Если к тому же учесть, что при приближении к исполнителю уровень сигнала повышается (при уменьшении расстояния с 0,5 м до 2 см он увеличивается на $20 \lg (50/2)=28$ дБ), то общая дискриминация шума будет составлять $33,4+28>60$ дБ. Такие приемники звука называют *шумозащищенными*. На более высоких частотах дискриминация шума будет значительно меньше, так как поправка $\Delta r/r$ уже не влияет на чувствительность. Вследствие этого шумозащищенность снижается до 30 дБ. При дальнейшем повышении частоты она несколько растет, так как размеры микрофона становятся соизмеримыми с длиной волны, и поэтому звуковые волны плохо огибают микрофон.

Применяется еще приемник градиента давления второго порядка. Он представляет собой сдвоенный приемник градиента давления первого порядка. На сдвоенную диафрагму такого приемника действует разность от разности давлений, действующей на каждую из диафрагм.

Чувствительность этого приемника определяется квадратичной зависимостью от частоты по отношению к приемнику градиента давления первого порядка. Поэтому приемник градиента второго порядка вносит более значительную дискриминацию в прием шума, чем приемник градиента давления первого порядка. Характеристика направленности его имеет форму квадрата косинусоиды в полярных координатах.

Асимметричный приемник градиента давления. На рис. 5.5а схематически показан принцип действия асимметричного приемника градиента давления. Диафрагма такого приемника находится под воздействием разности давлений, действующих на фронтальную (лицевую) и тыльную (заднюю) стороны диафрагмы. Сдвиг фаз между этими давлениями обусловлен, как и

в симметричном приемнике градиента давления, разностью хода звуковых волн, приходящих к фронтальной и тыльной сторонам диафрагмы. Разность хода Δr состоит из двух участков: внешнего d_1 и внутреннего d_2 . Длина внутреннего участка не зависит от угла падения звуковых волн на приемник и примерно равна осевому размеру приемника d . Длина внешнего участка $d_1 = d \cos \theta$, где θ — угол падения звуковой волны по отношению к оси приемника. Следовательно, общая разность хода $\Delta r = d_1 + d_2 \approx d(1 + \cos \theta)$.

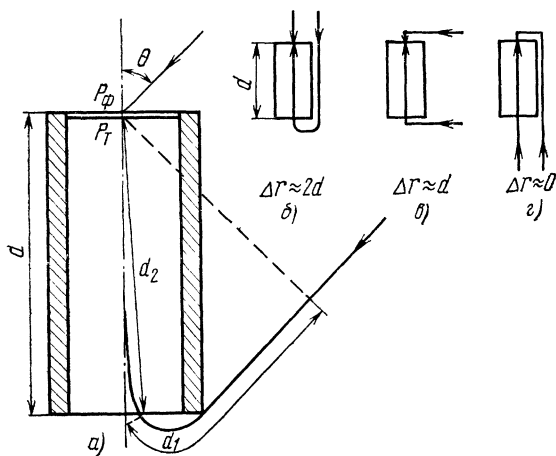


Рис. 5.5. Принцип действия асимметричного приемника градиента давления:

а) общий случай; б) приход звуковых волн с фронта; в) сбоку; г) с тыла приемника

На рис. 5.5б, в и г показаны разности хода для случая падения звуковой волны по оси приемника, а также под углами 90° и 180° к ней. Как видим, она равна в первом случае удвоенному осевому размеру приемника звука, во втором — ординарному размеру, а в третьем — почти равна нулю. Поэтому сдвиг фаз между фронтальной и тыльной звуковыми волнами будет наибольший при падении волны по оси и почти равен нулю при приходе сзади.

В рассматриваемом приемнике звука, как и в симметричном приемнике градиента давления, на диафрагму действует разность давлений звуковых волн, поэтому его акустическая характеристика может быть получена

из (5.16) при замене в ней разности хода $\Delta r = a \cos \theta$ [см. (5.15)] на $d(1 + \cos \theta)$, т. е.

$$\frac{F}{p} = \frac{\omega S d (1 + \cos \theta)}{c} / \cos \psi. \quad (5.17)$$

Из этого выражения также следует, что данный приемник звука имеет кардиоидную характеристику направленности

$$R(\theta) = 0,5 (1 + \cos \theta). \quad (5.17a)$$

Комбинированные приемники. Для получения различных форм характеристик направленности обычно комбинируют приемники давления и градиента давления. Рассмотрим простейшую комбинацию из этих приемников, наиболее часто применяемую в практике, состоящую из одного микрофона-приемника давления и одного микрофона-приемника градиента давления, располагаемых как можно ближе друг к другу (обычно один над другим) и так, чтобы их оси были параллельны. Будем считать, что приемник давления имеет небольшие размеры и поэтому не направлен на всех частотах диапазона. Тогда суммарная их чувствительность, если считать, что оба приемника находятся в одной точке поля, $E_{\theta} = E_{\text{д}} + E_{\text{г.д.}}$ $= E_{\text{д}} + E_{\text{г.д.о}} \cos \theta$, где $E_{\text{д}}$ — чувствительность приемника давления; $E_{\text{г.д.о}}$ — осевая чувствительность приемника градиента давления.

Осевая чувствительность комбинированного приемника $E_{\text{ос}} = E_{\text{д}} + E_{\text{г.д.о}}$.

Характеристика направленности комбинированного приемника

$$R(\theta) = \frac{E_{\theta}}{E_{\text{ос}}} = \frac{E_{\text{д}} + E_{\text{г.д.о}} \cos \theta}{E_{\text{д}} + E_{\text{г.д.о}}}.$$

Подставляя в эту формулу $q = E_{\text{г.д.о}} / (E_{\text{д}} + E_{\text{г.д.о}})$, получаем характеристику направленности, выраженную через этот параметр: $E/E_{\text{ос}} = (1 - q) + q \cos \theta$.

Меняя параметр q , можно получать различные характеристики направленности с соответствующим изменением индекса направленности и фронт/тыл (см. [1], с. 117—119). На рис. 5.6а приведены зависимости этих индексов от параметра q . А на рис. 5.6б изображены диаграммы направленности: 1—окружность для приемника давления ($q=0$); 2—кардиоида для комбинированного приемника с одинаковой чувствительностью

приемников давления и градиента давления ($q=0,5$); 3 — суперкардиоида ($q=0,63$); 4 — гиперкардиоида ($q=0,75$); 5 — косинусоида (восьмерка) для одного приемника градиента давления ($q=1$).

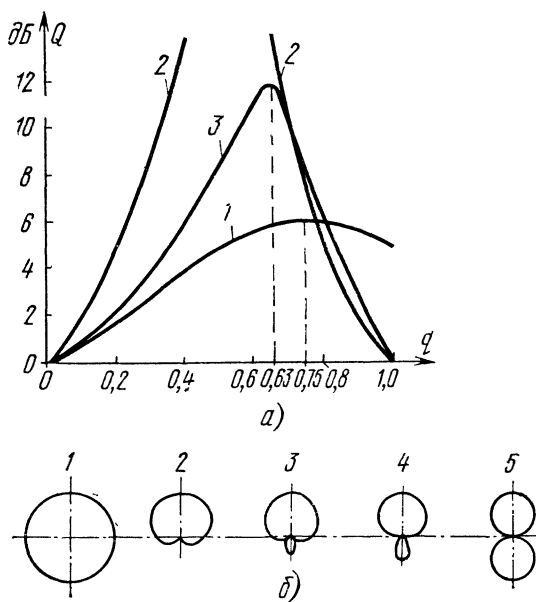


Рис. 5.6. Акустические характеристики комбинированных приемников:

а) индексы:

1 — направленности, 2 — перепада чувствительности фронт/тыл при разных соотношениях между чувствительностью приемников давления и градиента давления;

б) диаграммы направленности:

1 — работает только приемник давления; 2 — одинаковая чувствительность приемника давления и градиента давления; 3 — отношение чувствительностей $E_{д}/E_{г.д.о} = 0,37/0,63$, 4 — отношение $E_{д}/E_{г.д.о} = 0,25/0,75$, 5 — работает только приемник градиента давления

Наибольший индекс фронт/тыл получается при суперкардиоиде $Q_{ф/т} = 11,6$ дБ. Наибольший индекс направленности получается при гиперкардиоиде: $Q_{м} = 6$ дБ. Наибольший перепад чувствительностей получается для кардиоиды¹⁾. Для приемника градиента давления индекс направленности равен 4,8 дБ, а индекс

¹⁾ Теоретически этот перепад должен быть бесконечно большим, но практически он конечен, так как нулевой чувствительности под углом $\theta = 180^\circ$ не получается.

фронт/тыл равен нулю, так как этот приемник одинаково принимает спереди и сзади.

Заметим, что комбинированный приемник звука по характеристике направленности ничем не отличается от характеристики направленности асимметричного приемника градиента давления. Например, если взять неодинаковые по длине внутренний и внешний участки хода звуковой волны, то для асимметричного приемника градиента давления можно получить суперкардиоидную и гиперкардиоидную характеристики направленности.

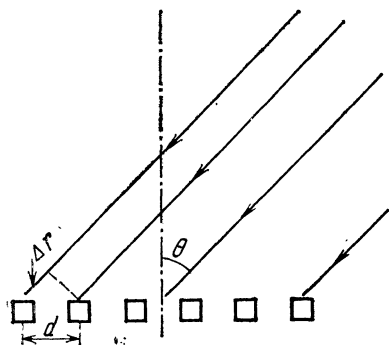


Рис. 5.7. Линейная группа микрофонов

Групповые приемники. Одинаковые приемники звука можно объединять в группы. К ним относятся линейные группы и трубчатые приемники.

Линейная группа приемников (микрофонов) — это несколько микрофонов, обычно располагаемых в ряд по прямой горизонтальной линии так,

чтобы их оси были параллельны (рис. 5.7) (иногда микрофоны располагают по небольшой дуге круга). Электрические выходы этих микрофонов соединяют последовательно в специальном смесителе.

Найдем характеристику направленности группового приемника, состоящего из n приемников, расположенных по прямой линии с шагом d , полагая, что каждый из них имеет характеристику направленности $R_1(\theta)$. Если плоская звуковая волна падает под углом θ к оси, то амплитуда напряжения на выходе каждого из микрофонов составляет [см. (5.1) и (5.4)]

$$U_{\theta 1} = E_{\theta} p_m = E_{oc} R_1(\theta) p_m,$$

где p_m — амплитуда звукового давления в точке микрофона; E_{oc} — осевая чувствительность микрофона.

Между выходными напряжениями соседних микрофонов будет иметь место сдвиг по фазе на величину

$$\varphi = 2\pi \frac{\Delta r}{\lambda} = 2\pi \frac{d}{\lambda} \sin \theta,$$

обусловленную разностью хода звуковой волны, $\Delta r = d \sin \theta$.

Для всей линейной группы результирующее напряжение

$$U_{\theta\Sigma} = U_{\theta 1} + U_{\theta 1} e^{i\varphi} + U_{\theta 1} e^{i2\varphi} + \dots + U_{\theta 1} e^{i(n-1)\varphi} = \\ = U_{\theta 1} \sum_{k=0}^{n-1} e^{ik\varphi} = U_{\theta 1} \frac{e^{in\varphi} - 1}{e^{i\varphi} - 1}.$$

Отсюда для амплитуды напряжения имеем

$$U_{m\theta\Sigma} = U_{\theta 1} \frac{\sin \frac{n\varphi}{2}}{\sin \frac{\varphi}{2}} = U_{\theta 1} \frac{\sin \left(\frac{n\pi d}{\lambda} \sin \theta \right)}{\sin \left(\frac{\pi d}{\lambda} \sin \theta \right)}.$$

Если звуковая волна направлена по оси, то сдвига фаз между напряжениями от отдельных микрофонов не будет и выходные напряжения суммируются арифметически: $U_{m\theta\Sigma} = nU_{\theta 1}$, где $U_{\theta 1} = E_{\text{оср.м.}}$.

Для такого группового приемника характеристика направленности

$$R(\theta) = \frac{U_{m\theta\Sigma}}{U_{\theta 1}} = \frac{U_{\theta}}{U_{\theta 1}} \frac{\sin \left(n\pi \frac{d}{\lambda} \sin \theta \right)}{n \sin \left(\pi \frac{d}{\lambda} \sin \theta \right)}.$$

Подставляя в эту формулу выражение для характеристики направленности одиночного приемника, получаем

$$R(\theta) = R_1(\theta) \frac{\sin \left(n\pi \frac{d}{\lambda} \sin \theta \right)}{n \sin \left(\pi \frac{d}{\lambda} \sin \theta \right)}. \quad (5.18)$$

Таким образом, характеристику направленности линейной группы приемников звука можно определить как произведение характеристики направленности одиночного приемника $R_1(\theta)$ и характеристики группы $R_{\text{гр}}$:

$$R_{\text{гр}}(\theta) = \frac{\sin \left(n\pi \frac{d}{\lambda} \sin \theta \right)}{n \sin \left(\pi \frac{d}{\lambda} \sin \theta \right)} = \frac{\sin nx}{n \sin x}, \quad (5.19)$$

где $x = \pi \frac{d}{\lambda} \sin \theta$.

Найдем углы прихода звуковой волны к приемнику, для которых характеристика направленности линейной группы $R_{\text{гр}}(\theta) = 0$, что может быть при условии $n\pi \frac{d}{\lambda} \sin \theta = m\pi$, где $m = 1, 2, \dots$.

Для большого числа приемников можно приближенно считать длину группы (расстояние между крайними приемниками) $l = nd$,

поэтому нулевая чувствительность будет при $\theta = \arcsin \frac{m\lambda}{l}$. Отсюда наименьший угол, для которого чувствительность равна нулю, $\theta_1 = \arcsin \frac{\lambda}{l}$.

Следовательно, чем меньше отношение длины волны к длине группы, тем уже будет основной лепесток диаграммы направленности, т. е. больше направленность. Поэтому направленность у группового приемника звука можно повышать путем увеличения его размеров. Но при этом следует иметь в виду, что при длине группы, сравнимой с расстоянием приемника от источника звука, будут сказываться интерференционные явления из-за разности хода звуковых волн от источника звука до отдельных микрофонов, входящих в состав группы.

Повышение направленности получается только в плоскости, проходящей через оси микрофонов. В плоскости, перпендикулярной ей, характеристика направленности остается такой же, как и для одиночного микрофона.

Из сказанного следует, что групповые приемники звука имеют более высокий индекс направленности, чем одиночные приемники. Увеличение индекса направленности определяется индексом направленности группы (5.19), т. е. ее длиной.

Определим угол расположения первого нуля характеристики направленности группового приемника, состоящего из шести ненаправленных микрофонов, расположенных на прямой линии с шагом в 10 см ($l=53$ см). Для частоты 1000 Гц ($\lambda=34$ см) имеем $\theta_1 = \arcsin \frac{34}{53} = \arcsin 0,64$, откуда $\theta_1 = 36^\circ$.

Расчет индекса направленности этой группы дает величину 8 дБ. Если применить кардиоидные микрофоны, то общий индекс направленности будет составлять $8+4,8=12,8$ дБ.

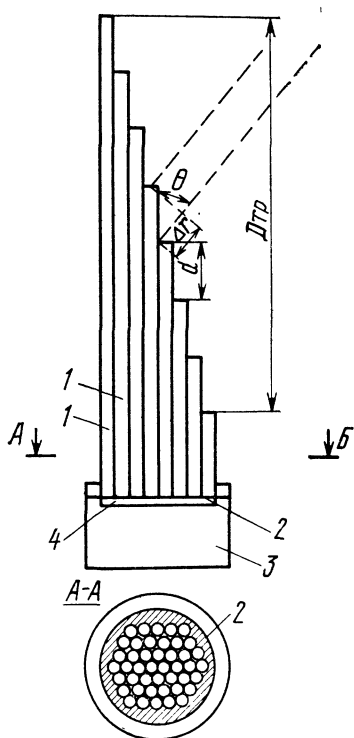


Рис. 5.8. Строение трубчатого приемника:

1 — звуководные трубки; 2 — срез трубок; 3 — капсоль микрофона; 4 — предкапсольный объем

Трубчатые приемники. Из трубчатых приемников получили некоторое распространение два варианта.

Первый вариант, схематически представленный на рис. 5.8, имеет несколько десятков тонких трубок 1 с длинами от нескольких сантиметров до метра и более. Эти трубки собирают в пучок: длинные по середине, короткие по наружной поверхности пучка. Концы трубок с одной стороны образуют плоский срез 2, входящий в предкапсюльный объем 4. Микрофонный капсюль 3 берёт или электродинамического или электромагнитного типа (приемника давления) в зависимости от требуемого частотного диапазона. Звуковые волны, приходящие к приемнику по осевому направлению, проходят в трубки и поступают в предкапсюльный объем в одинаковой фазе, и их амплитуды складываются арифметически. Звуковые волны, приходящие под углом к оси (см. рис. 5.8), оказываются сдвинутыми по фазе, так как трубки имеют разную длину. Если разность длин ближайших по размеру трубок будет d , то минимальная разность хода будет $\Delta r = d(1 - \cos\theta)$, где θ — угол между осью приемника и направлением прихода звуковой волны. Соответственно сдвиг фаз между этими волнами $\varphi = 2\pi \frac{d}{\lambda} (1 - \cos\theta)$.

Суммируя амплитуды звуковых волн всех трубок с учетом сдвига фаз аналогично предыдущему случаю, получаем следующую характеристику направленности:

$$R(\theta) = \frac{\sin nx}{n \sin x}; \quad x = \frac{\pi d}{\lambda} (1 - \cos\theta) = \frac{2\pi d}{\lambda} \sin^2 \frac{\theta}{2}.$$

Сравнивая ее с характеристикой направленности линейной группы (5.19), видим, что она отличается только множителем в аргументе: для линейной группы $\sin\theta$, а для трубчатого приемника $(1 - \cos\theta) = 2 \sin^2 \frac{\theta}{2}$.

Это означает, что одинаковый индекс направленности получится, если длина линейной группы приемника и расстояние между отверстиями самой длинной и самой короткой трубок $D_{\text{тр}}$ в трубчатом приемнике будут находиться в соотношении

$$l_{\text{тр}} \sin\theta = D_{\text{тр}} (1 - \cos\theta) \quad \text{или} \quad l_{\text{тр}}/D_{\text{тр}} = \text{tg}(\theta/2).$$

Для $\theta = 45^\circ$ $l/D_{\text{тр}} = 0,29/0,71 = 0,41$, т. е. линейная группа приемников может иметь длину, в 2,5 раза меньшую, чем трубчатый приемник.

Если частота 1000 Гц, число трубок $n = 38$, длина наибольшей трубки 90 см, наименьшей — 5 см, расстояние между ближайшими по размеру трубками $d = 2,3$ см, то индекс направленности у трубчатого приемника получается равным 8 дБ, т. е. довольно высокий.

Следует сказать, что разница в длине между ближайшими по размеру трубками определяет наивысшую частоту, при которой получается компенсация действия боковых волн. Если $d = \lambda$, т. е. $f = c/d$, то звуковые волны будут находиться в фазе. Следовательно, прием сбоку будет такой же, как и по оси. Поэтому наивысшая частота, при которой приемник будет еще иметь острую направленность, не превышает $c/2d$. Если $d = 2,3$ см, то $f_{\text{макс}} = 7500$ Гц.

Второй вариант — грубчатый щелевой приемник (его иногда называют приемником бегущей волны) — представляет собой трубку с продольной щелью. С некоторым приближением такую трубку можно рассматривать как множество трубок разной длины. Чтобы не было стоячих волн, наружный конец трубки закрыт поглощающей тканью. Через разные участки щели звуковые волны поступают к капсулю в разной фазе, как в случае приемника, состоящего из большого числа трубок.

5.3. ДИНАМИЧЕСКИЕ (КАТУШЕЧНЫЕ) МИКРОФОНЫ

Приемники давления. На рис. 5.9а схематически показана конструкция динамического микрофона приемника давления. Принцип его действия заключается в том, что катушка 5 с намотанным на нее проводом, находящаяся в радиальном магнитном поле (рис. 5.9б и в), колеблется под действием звукового давления, пересекая силовые линии. Вследствие этого в ней индуцируется ЭДС: $\mathcal{E} = Blv$, где B — индукция магнитного поля; l — длина провода катушки; v — скорость колебаний катушки.

Для создания магнитного поля обычно применяют кольцевой магнит 1 из высококоэрцитивных сплавов¹⁾ и магнитопровод (два фланца — 2, 6 и kern 3) из мягких материалов²⁾. Между kernом и верхним фланцем образуется кольцевой зазор 4, в котором размещают звуковую катушку 5. В зазоре $B \approx 1,0$ Тс. Катушка жестко связана с диафрагмой 9, имеющей куполообразную форму для придания ей большей жесткости. Диафрагма с помощью гофрированного гибкого подвеса 7 закреплена на верхнем фланце и может колебаться только по оси

¹⁾ В состав входят алюминий и никель с присадками меди и кобальта, или оксид бария.

²⁾ В состав входят никель и железо с различными добавками.

(вдоль зазора). Диафрагму изготовляют из легких, но прочных материалов, например из полистирола. Микрофон имеет корпус 13 с отверстием, спереди затянутым защитной сеткой 8 для предохранения диафрагмы от повреждений.

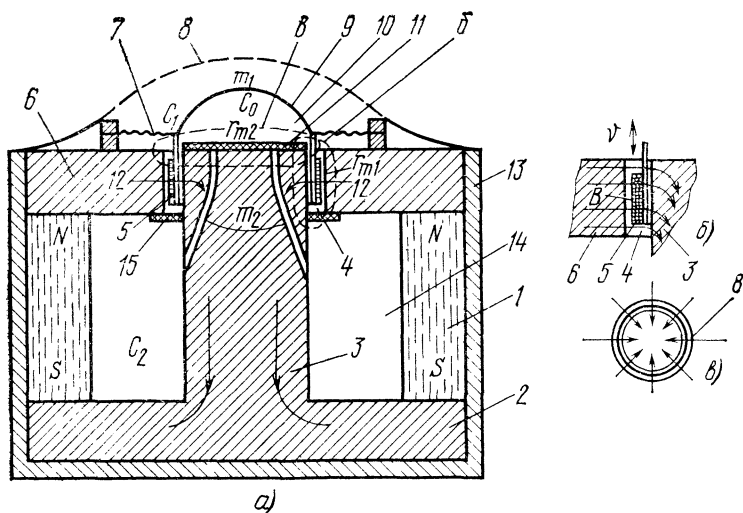


Рис. 5.9. Конструкция динамического микрофона-приемника давления с фрагментами, показывающими расположение катушки в зазоре:

а) общий вид; б) разрез катушки с одной стороны; в) вид сверху; 1 — кольцевой магнит; 2 — нижний фланец; 3 — kern; 4 — кольцевой зазор; 5 — звуковая катушка; 6 — верхний фланец; 7 — подвес; 8 — защитная сетка; 9 — диафрагма; 10 — объем под диафрагмой; 11 — шелк; 12 — каналы; 13 — корпус микрофона; 14 — внутренний объем; 15 — шайба из немагнитного материала

Электрическая нагрузочная характеристика микрофона $U/\mathcal{E} = R_n / (R_n + R_i)$ практически равномерна во всем частотном диапазоне, так как электрическое сопротивление катушки R_i почти не зависит от частоты (лишь несколько повышается на высоких частотах). Коэффициент электромеханической связи $K_{св} = Bl$ — величина постоянная. Как приемник давления, микрофон имеет акустическую чувствительность $F/p = (1 \div 2) S$, почти равномерную (лишь с небольшим повышением к высоким частотам, на которых длина волны становится сравнимой с размерами микрофона). Для большинства микрофонов это наступает на частотах около 10 кГц. Таким образом, в соответствии с ф-лой (5.10) для по-

лучения равномерной сквозной частотной характеристики микрофона U/p необходимо, чтобы механическая характеристика $v/F=1/Z_M$, а значит, и механическое сопротивление подвижной системы Z_M не зависели от частоты. Это можно осуществить только применением сложной механической системы, имеющей ряд резонансов в передаваемом частотном диапазоне. Наиболее распространена система из двух механоакустических резонаторов. В ней, кроме резонанса самой подвижной системы, образованной из ее массы m_1 , гибкости подвеса C_1 , гибкости воздуха в объеме 10 под диафрагмой δ C_0 и трения катушки о воздух r_M (при колебании ее в зазоре получается довольно значительное трение), создается вторая резонансная система, состоящая из массы воздуха в каналах 12 , трения r_{M2} в шелке 11 и гибкости воздуха C_2 в объеме 14 между магнитом и керном. Согласно правилам соединения аналогов механических элементов составим аналоговую электрическую схему. Конденсаторы C_1 и C_0 должны быть соединены последовательно (см. табл. 4.2б). Каналы 12 и объем 14 представляют собой резонатор Гельмгольца r_{M2} , m_2 , C_2 (см. табл. 4.4а). Этот резонатор соединен в механической схеме последовательно с объемом C_0 , поэтому в аналоговой схеме (см. табл. 4.2а) они соединены параллельно.

Аналоговая электрическая схема (рис. 5.10а) представляет собой Т-образное звено полосового фильтра, нагруженное на активное сопротивление r_{M2} , а r_{M1} является внутренним сопротивлением источника (рис. 5.10б). При соответствующем выборе соотношений между параметрами фильтра его частотная характеристика будет равномерной в диапазоне частот от резонансной частоты подвижной системы $\omega_1=1/\sqrt{m_1 C_1}$ до частоты $\omega_2=\omega_1 \sqrt{1+2(C_1+C_2)/C_0}$.

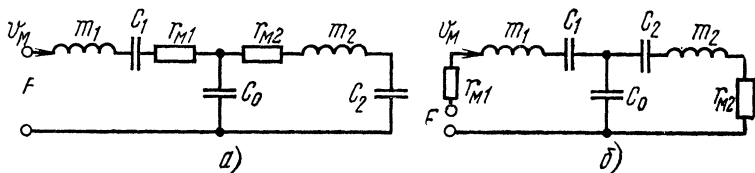


Рис. 5.10. Схемы механической системы динамического микрофона: а) аналоговая; б) та же схема, преобразованная в Т-образную форму

Поскольку механическое сопротивление в этой полосе определяется инерционным сопротивлением массы подвижной системы, то последнюю надо брать возможно меньшей. Но так как нижняя граница полосы повышается при уменьшении массы m_1 [ф-ла (4.2)], то надо брать гибкость подвижной системы возможно большей. Увеличение гибкости ограничено неустойчивостью подвижной системы и появлением перекосов, вследствие чего катушка при колебаниях может задевать за стенки зазора. Поэтому нижняя граница равномерной частотной характеристики микрофона получается не ниже 300 Гц. Чтобы понизить эту границу, применяют специальную коррекцию с помощью дополнительного резонатора, размещенного в керне магнитной цепи микрофона с резонансной частотой, в несколько раз меньшей нижней границы равномерной характеристики ω_1 . Это дает возможность получить равномерную частотную характеристику динамического микрофона в пределах 100—8000 Гц. Если применить дополнительные коррекции на самых низких частотах¹⁾ и на частотах около 10 кГц, то частотный диапазон микрофона расширяется до 50—10 000 Гц. Для отдельных типов микрофонов при тщательной коррекции и подборе их параметров можно еще выше поднять верхнюю границу (до 15 кГц), но это сильно усложняет процесс доводки микрофона в производстве. К тому же неравномерность частотной характеристики получается довольно значительной даже в основной полосе частот (6—8 дБ), а во всем частотном диапазоне она доходит до 15—20 дБ.

Стандартный уровень чувствительности динамических микрофонов находится около —58 дБ. Направленность проявляется только на частотах выше 5000 Гц. Применяются эти микрофоны в основном для передачи речи. Для музыкальных передач используются только широкополосные микрофоны (50—15 000 Гц). Динамические микрофоны обладают достаточно хорошей механической прочностью, удобны и могут работать в самых разнообразных условиях как в помещениях, так и на открытом воздухе, поэтому они получили широкое распространение.

¹⁾ Это делают, например, с помощью специальной трубки, передающей звуковые колебания с лицевой стороны диафрагмы к ее обратной стороне через сложную систему акустических фильтров.

Асимметричные приемники градиента давления. Такой динамический микрофон (рис. 5.11а) отличается по конструкции от динамического

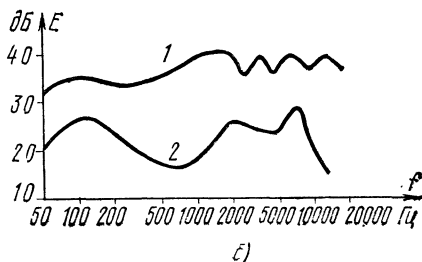


Рис. 5.11. Динамический микрофон:

а) микрофон МД-52А; б) его частотные характеристики (1 — фронтальная, 2 — тыльная)

микрофона — приемника давления — тем, что в его корпусе и в магнитной цепи имеются отверстия. Благодаря им звуковые волны проходят по пути: отверстие, внутренний объем, каналы, к обратной стороне диафрагмы, с соответствующей разностью хода, по отношению к звуковым волнам, приходящим к лицевой стороне ее. При этом разность хода определяется расстоянием отверстий от края диафрагмы.

В отличие от приемника давления, акустическая характеристика такого микрофона пропорциональна частоте, поэтому для него необходимо, чтобы механическая характеристика была обратно, а механическое сопротивление прямо пропорциональны частоте. А это согласно (4.1) и (4.2) будет при условии, когда резонансная частота подвижной системы будет возможно меньшей. На частотах выше резонансной механическое сопротивление Z_m будет определяться массой подвижной системы $Z_m \approx \omega m$, а нижняя граница передаваемого частотного диапазона будет близка к резонансной частоте подвижной системы ω_0 .

Характеристика направленности такого микрофона будет иметь форму кардионды [см. ф-лу (5.17а)] $R(\theta) = 0,5 (1 + \cos \theta)$, если длины внутреннего и внешнего участков хода звуковой волны будут одинаковыми при $\theta = 180^\circ$.

В микрофонах, выпускаемых промышленностью, характеристика направленности для средней части частотного диапазона близка к суперкардиоидной, для которой перепад чувствительностей и индекс фронт-тыл получаются около 10—12 дБ. Частотная характеристика такого микрофона (рис. 5.11б, кривые 1, 2) для фронтального и тыльного приема имеет диапазон частот 50—15 000 Гц. Уровень чувствительности — 54 дБ, неравномерность частотной характеристики 10 дБ. Микрофон применяют как в студиях, так и для звукоусиления¹⁾ в театрах и концертных залах, т. е. при наличии акустических шумов, создаваемых публикой.

Для работы в условиях акустических шумов повышенного уровня (60—70 дБ) и для уменьшения обратной акустической связи применяют комбинацию двух микрофонов с характеристиками направленности кардиоидного типа. Например, расположенные один за другим микрофоны типа МД-44 создают бикардиоидный микрофон МДО-1. Его характеристика направленности определяется ф-лой $R(\theta) = 0,25(1 + \cos \theta)^2$. У такого микрофона острая направленность и соответственно повышенный индекс направленности фронт/тыл (до 15—18 дБ). Из-за относительно большого расстояния между капсюлями не удастся получить равномерную передачу в широком частотном диапазоне. Например, в диапазоне 150—8000 Гц неравномерность составляет 12 дБ. Частотная характеристика имеет спад в сторону низких частот, обусловленный тем, что акустическая характеристика пропорциональна квадрату частоты в диапазоне до 1000 Гц. Поэтому этот микрофон непригоден для музыкальных передач. Для передачи речи его используют только для ее звукоусиления¹⁾ в условиях акустических шумов повышенного уровня.

5.4. ЛЕНТОЧНЫЕ МИКРОФОНЫ

Приемники градиента давления. Принцип действия ленточного микрофона — симметричного приемника градиента давления — заключается в том, что под действием разности звуковых давлений гибкая лен-

¹⁾ Высокий индекс фронт/тыл обеспечивает хорошую стойкость систем звукоусиления против самовозбуждения.

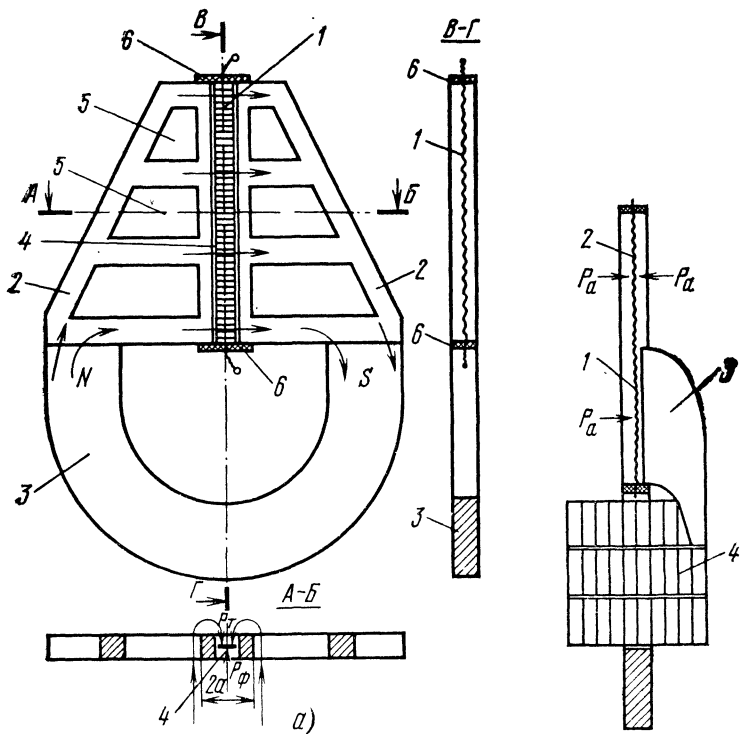


Рис. 5.13. Комбинированный ленточный микрофон:

1 — ленточка-приемник давления; 2 — ленточка-приемник градиента давления; 3 — камера входа в лабиринт; 4 — лабиринт

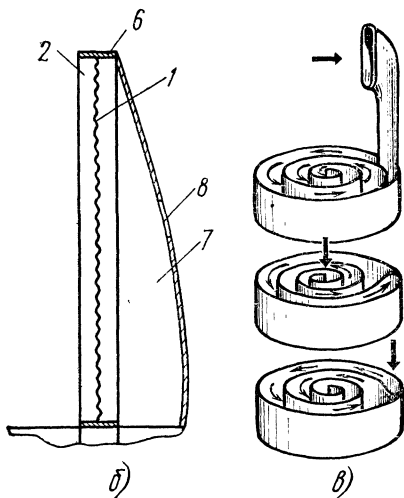


Рис. 5.12. Ленточные микрофоны:

а) микрофон градиента давления; б) асимметричный магнитофон градиента давления; в) камера с лабиринтом;

1 — гибкая ленточка; 2 — полюсные наконечники; 3 — магнит; 4 — щель между наконечниками; 5 — окна в полюсных наконечниках; 6 — изоляционные планки; 7 — камера; 8 — отверстие в стенке камеры

точка 1 (рис. 5.12) колеблется в магнитном поле, силовые линии которого идут вскользь по ширине ленточки. Вследствие этого в ленточке индуцируется ЭДС $\mathcal{E} = Blv$, где B — индукция поля у ленточки, в плоскости ленточки; l — длина ленточки; v — скорость ее колебаний.

Магнитное поле создается подковообразным магнитом 3. Полюсные наконечники 2 образуют щель 4, в которой размещена ленточка. В полюсных наконечниках сделан ряд отверстий (окон) 5 для того, чтобы уменьшить разность хода звуковых волн, действующих на ленточку с обеих ее сторон, и в то же время избежать насыщения магнитной цепи. Расстояние между отверстиями вместе с ленточкой (2а) не превышает 1,7 см, т. е. не превышает длины волны, соответствующей частоте 20 кГц. Это обеспечивает свободное огибание звуковых волн во всем диапазоне передаваемых частот и линейность акустической чувствительности микрофона в диапазоне до 15 кГц [см. рис. (5.4)].

Ленточка, укрепленная на изоляционных планках 6, имеет длину от 5 до 10 см. Индукция в зазоре не превышает 1,0 Тс, поэтому ЭДС, развиваемая ленточкой, составляет несколько микровольт. Для повышения напряжения микрофон снабжен трансформатором с большим коэффициентом трансформации (равным 50 и больше). Заметим, что сопротивление ленточки мало и даже при таком коэффициенте трансформации внутреннее сопротивление микрофона R_i получается не выше 200—250 Ом. Вследствие малости сопротивления ленточки трансформатор располагают как можно ближе к ней, чтобы сопротивление соединительных проводов было значительно меньше сопротивления ленточки.

Электрическая характеристика этого микрофона при нагрузке R_n и коэффициенте трансформации n , определяемая формулой $U/\mathcal{E} = nR_n/(R_n + R_i)$, не зависит от частоты. Коэффициент электромеханической связи $K_{св} = Bl$, как и у динамического микрофона, — величина постоянная. Акустическая чувствительность ленточного микрофона F/p как приемника градиента давления для удаленной зоны [см. ф-лу (5.16) для $\cos \psi = 1$] пропорциональна частоте¹⁾. Чтобы сквозная частотная харак-

¹⁾ Для ближней зоны действия (ближе 0,5 м от источника звука) ленточные микрофоны не применяют, так как в этом случае они будут подчеркивать низкие частоты (см. § 5.2).

характеристика микрофона была равномерной, необходима ее коррекция: механическая система должна иметь характеристику, обратную пропорциональную частоте, $\nu/F = 1/Z_M = K/\omega$, т. е. механическое сопротивление подвижной системы должно быть пропорционально частоте. Из ф-л (4.1) и (4.2) следует, что это возможно при условии, когда резонанс подвижной системы будет на частотах ниже самой низкой частоты передаваемого диапазона, т. е. $\omega_0 = 1/\sqrt{mC_M} \leq \omega_{\text{мин}}$.

При этом механическое сопротивление $Z_M \approx \omega m$, так как активное механическое сопротивление из-за его малости будет влиять только на резонансной частоте. Таким образом, осевая чувствительность микрофона (5.10) определяется следующим отношением:

$$E_{\text{ос}} = \frac{U}{p} = n \frac{2a\omega Bl}{2c\omega m} = \frac{nBlSa}{cm} = \frac{nBlSa}{c} \omega_0^2 C_M,$$

где S — площадь ленточки. Из него следует, что для повышения чувствительности микрофона необходимо увеличить площадь ленточки и индукцию в щели, уменьшать массу ленточки. Эти условия противоречивы. При заданной резонансной частоте ленточки (ее обычно берут около 30 Гц) необходимо увеличивать гибкость ленточки. Это делают путем ее гофрирования и возможно-го уменьшения ее толщины (до двух микрон). Ленточка является самым уязвимым местом этого микрофона: от сильного дуновения (например, от ветра) она рвется. Поэтому ленточный микрофон используют только в помещении.

Стандартный уровень чувствительности ленточного микрофона (например, МЛ-51) такой же, как и у динамического (—57 дБ), частотный диапазон лежит в пределах 50—16 000 Гц и имеет неравномерность частотной характеристики не более 8 дБ (наиболее равномерна она в диапазоне ниже 5 кГц).

Характеристика направленности его — косинусоидальная («восьмерка», см. рис. 5.6б, кривая 5) и не зависит от частоты. В этом преимущество ленточного микрофона градиента давления.

Во втором варианте микрофона (рис. 5.12б) камера закрывает всю ленточку, но в корпусе камеры сделано отверстие 8 для прохода звуковых волн к задней стороне ленточки.

Для того чтобы ленточка 1 не испытывала сопротивления со стороны объема камеры 7, находящегося за ней, необходимо создать условия полного поглощения звуковых колебаний, передаваемых ленточкой этому объему. Для этой цели объем соединяют с так называемым лабиринтом, представляющим собой длинную трубку, например, в виде спирали или зигзагообразной формы, заполненную поглощающим материалом (см. рис. 5.12в). Получается асимметричный приемник градиента давления, характеристика направленности которого имеет форму кардиоиды [ф-ла (5.17а)].

Применяется и сдвоенный микрофон градиента давления (МЛ-18), т. е. приемник градиента давления второго порядка (он называется биградиентным). Этот микрофон имеет более острую характеристику направленности $R(\theta) = \cos^2 \theta$, но более суженный частотный диапазон (100—10 000 Гц).

Комбинированные приемники. Существует ленточный микрофон и в виде комбинации приемника давления и приемника градиента давления (рис. 5.13). Часть ленточки с тыльной стороны защищена от действия звуковых волн камерой с лабиринтом. Таким образом получается, что одна часть ленточки 2 находится под действием разности давлений волн, приходящих с фронтальной и тыльной сторон, а другая часть 1 — только под действием волн, приходящих с фронтальной стороны. Напряжения от обеих частей ленточки складываются арифметически. Характеристика направленности такого микрофона будет иметь форму кардиоиды, если ленточка разделена пополам. Если же у приемника давления длина ленточки будет меньше, чем у приемника градиента давления, то можно получить суперкардиоидную или гиперкардиоидную характеристику направленности. Соответствующий этому случаю микрофон имеет ограниченный снизу частотный диапазон (70—15 000 Гц) и повышенную неравномерность частотной характеристики (10 дБ). Его используют в помещениях как для передачи музыки, так и для передачи речи.

Кроме таких микрофонов, выпускаются комбинированные, состоящие из катушечного микрофона-приемника давления и ленточного микрофона-приемника градиента давления, располагаемых один над другим. Можно включать оба микрофона или один из них и получать три вида характеристики направленности.

5.5. КОНДЕНСАТОРНЫЕ И ЭЛЕКТРЕТНЫЕ МИКРОФОНЫ

Принцип действия. Конструкция конденсаторного микрофона (рис. 5.14а) представляет собой конденсатор, один из электродов которого массивный 3, а второй — тонкая натянутая мембрана 1. На конденсатор подано поляризирующее напряжение U_0 через высокоомное сопротивление R_H . Заметим, что источник поляризирующего напряжения не расходует энергии, так как постоянной составляющей тока нет. При колебаниях мембра-

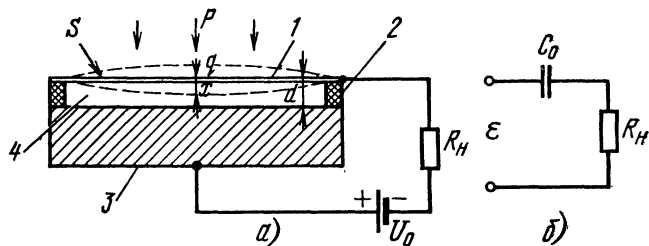


Рис. 5.14. Конденсаторный микрофон:

а) принцип действия; б) электрическая схема микрофона;

1 — мембрана; 2 — изоляционная прокладка; 3 — массивный электрод; 4 — зазор между электродами

ны емкость конденсатора C_0 изменяется, а так как заряд q остается постоянным (конденсатор не успевает перезарядиться из-за большой постоянной времени $R_H C_0 = \tau$), то изменяется напряжение на нем. Это дополнительное напряжение $\Delta U = \mathcal{E}$ и будет являться ЭДС от действия звукового давления на мембрану (рис. 5.14б). Напряжение, получаемое на нагрузке, несколько меньше ЭДС из-за падения напряжения на емкости конденсатора.

В электретном микрофоне, в отличие от конденсаторного, поляризирующее напряжение образовано предварительной электризацией одного из электродов, изготовляемого из полимеров или керамических поляризующихся материалов. Такой электрод имеет металлическое покрытие, которое, по существу, и является электродом конденсатора, а электрет служит лишь источником поляризирующего напряжения. Поляризация электрета постепенно уменьшается и через несколько лет требуется или его замена, или повторная поляризация. В этом недостаток электретного микрофона по сравнению с

конденсаторным, но и достоинство, так как для него не требуется источник напряжения. По механическим, акустическим характеристикам, а также по конструкции электретный микрофон ничем не отличается от конденсаторного.

Приемник давления. Для этого приемника акустическая чувствительность почти не зависит от частоты, так как $F/p = (1 \div 2)S$, где S — эффективная поверхность мембраны.

Чтобы неравномерность электрической характеристики была небольшой, необходимо выполнить условие $R_n \geq 1/\omega_n C_0$, где ω_n — нижняя граница передаваемого частотного диапазона. А так как емкость конденсатора C_0 составляет 100—200 пФ, то для нижней границы $f_n = 30$ Гц необходимо иметь сопротивление нагрузки $R_n \geq 50$ МОм. Поскольку входное сопротивление усилителя $R_{вх}$ должно быть в 10—20 раз больше сопротивления нагрузки, оно будет составлять примерно тысячи мегомов. При таких высоких входных сопротивлениях получается относительно высокий уровень собственных шумов микрофона. Это одно из слабых мест конденсаторного и электретного микрофонов. Но поскольку шумы создаются преимущественно в области низких частот, то это несколько облегчает применение этих микрофонов, так как на этих частотах музыкальные и речевые сигналы имеют достаточно высокие уровни (см. § 3.4).

Если расстояние d между электродами конденсатора изменяется, то соответственно изменяется емкость C_0 : $\Delta C/C_0 = -\Delta d/d$. Изменение емкости вызывает изменение напряжения на конденсаторе $\Delta U/U_0 = -\Delta C/C_0$. Абсолютное изменение напряжения есть ЭДС эквивалентного генератора, а изменение расстояния между электродами в среднем равно смещению мембраны, т. е. $\Delta U = \mathcal{E}$ и $\Delta d = x$, поэтому $\mathcal{E}/U_0 = x/d$. Но так как для синусоидального процесса $x = x_m e^{i\omega t}$ или $v = dx/dt = i\omega x$, то коэффициент электромеханической связи $K_{св} = \mathcal{E}/v = U_0/i\omega d$.

Для получения равномерной частотной характеристики микрофона (5.10) необходима взаимная коррекция коэффициента электромеханической связи и механической характеристики $v/F = 1/Z_m$.

Следовательно, механическое сопротивление подвижной системы микрофона должно быть обратно пропор-

ционально частоте. Из (4.1) и (4.2) следует, что это возможно, когда $\omega t < 1/\omega C_M$ или $\omega < \omega_0 = 1/\sqrt{mC_M}$, где m — масса мембраны; $1/C_M$ — упругость системы, состоящая из упругости мембраны и упругости воздуха в объеме под ней.

Таким образом, компенсация характеристик получается, когда основная резонансная частота подвижной системы — мембраны — будет выше самой высокой частоты передаваемого диапазона, т. е. при $\omega_0 > \omega_B$. Для этого мембрана должна быть сильно натянута.

Чувствительность микрофона будет определяться выражением (5.10)

$$E_{oc} = U/p = SU_0 C_M / d = SU_0 / \omega_0^2 m d, \quad (5.20)$$

так как $Z_M \approx 1/\omega C_M$.

Отношение поляризующего напряжения к расстоянию между электродами определяется электрическими прочностями воздуха и тонкого слоя диэлектрика, покрывающего электроды. При $U_0/d = 10^4$ В/мм конденсатор пробивается, поэтому при расстоянии, равном 20 мкм, поляризующее напряжение берет не более 150 В.

При заданной резонансной частоте масса мембраны должна быть возможно меньшей. Изготавливают ее обычно из дюралюминия или полимерной пленки, покрытой тонким слоем золота. Массу уменьшают за счет толщины. Но при этом соблюдают высокую механическую прочность на разрыв.

Чтобы повысить чувствительность микрофона, необходимо снизить резонансную частоту мембраны. Но чтобы при этом не создавать большую неравномерность частотной характеристики, необходимо ввести затухание в колебательную механическую систему. Для этой цели в неподвижном электроде делают канавки с острыми углами (рис. 5.15). При колебаниях мембраны воздух под ней протискивается вдоль радиусов электродов, вследствие чего образуются завихрения, вносящие существенные потери в механическую колебательную систему. Эти потери¹⁾ подбирают так, чтобы частотная характеристика была близка к равномерной (рис. 5.16, кривая 2). Обычно частоту резонанса в этих условиях берут вдвое

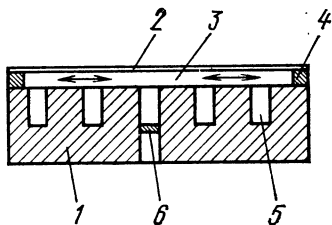
¹⁾ Кроме того, потери вносятся из-за вязкости воздуха в камере.

ниже верхней границы передаваемого частотного диапазона.

Частотная характеристика конденсаторного микрофона отличается своей равномерностью. В диапазоне до резонанса мембраны неравномерность может быть сде-

Рис. 5.15. Схематический разрез капсулы микрофона:

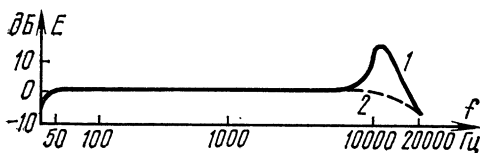
1 — массивный электрод; 2 — мембрана; 3 — зазор между электродами; 4 — изоляционная прокладка; 5 — канавки для демпфирования; 6 — канал и резиновая пленка для выравнивания атмосферного давления



лана очень малой, выше резонанса она несколько увеличивается. Вследствие малой неравномерности характеристики конденсаторные микрофоны часто используют

Рис. 5.16. Частотная характеристика конденсаторного микрофона:

1 — без демпфирования;
2 — с демпфированием



как измерительные. Измерительные микрофоны изготовляют на диапазон частот от 20—30 Гц до 30—40 кГц с неравномерностью 1 дБ до частоты 10 кГц и не более 6 дБ — выше 10 кГц. Размеры капсулы такого микрофона берут в пределах 6—15 мм, из-за этого он практически ненаправлен до частоты 20—40 кГц. Чувствительность его не превышает — 60 дБ. Микрофоны для передачи музыки имеют диапазон частот 20—20 000 Гц (КМС-14) с неравномерностью частотной характеристики в диапазоне 50—15 000 Гц не выше 6 дБ. Диаграмма направленности отклоняется от окружности только на самых высоких частотах передаваемого диапазона.

Недостаток конденсаторных микрофонов — необходимость применения усилителя возле самого капсулы. Раньше это сильно увеличивало размеры микрофона. С появлением полевых транзисторов это не вызывает особых конструктивных трудностей.

Стандартный уровень чувствительности конденсаторных микрофонов с усилителем составляет — 54 дБ (в микрофонах для кинозаписи уровень чувствительности составляет —30÷—40 дБ). Уровень собственных шумов микрофона составляет 0—10 дБ, т. е. на 10—15 дБ выше, чем у динамических микрофонов.

Комбинированные приемники. Наиболее распространенными конденсаторными микрофонами являются микрофоны, комбинированные из двух несимметричных приемников градиента давления (рис. 5.17).

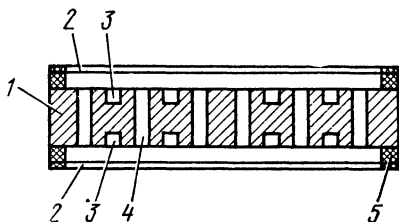


Рис. 5.17. Капсуля комбинированного конденсаторного микрофона:

1 — массивный электрод; 2 — мембраны; 3 — канавки для демпфирования; 4 — каналы для передачи звукового давления и внутренней стороны мембраны; 5 — изоляционные прокладки

В таком микрофоне средний электрод 1 массивный, металлический, а два внешних электрода 2 изготавливаются из тонкой, прочной полимерной пленки с золотым покрытием. Обе пленки натянуты до возможного предела. В неподвижном электроде сделаны как канавки для демпфирования 3, так и сквозные каналы 4. Кроме того, в корпусе есть небольшое отверстие, затянутое гибкой пленкой и служащее для выравнивания атмосферного давления. Звуковое давление, действующее на внешнюю сторону любой из мембран, передается через каналы в неподвижном электроде к внутренней стороне другой мембраны. Поэтому на каждую из мембран действует звуковое давление с внешней стороны, а через каналы — с внутренней. Между звуковыми давлениями есть сдвиг по фазе, обусловленный разностью хода звуковых волн, которая, в свою очередь, определяется толщиной капсулы микрофона.

В одном варианте поляризующее напряжение подают между неподвижным и одним из подвижных электродов микрофона — мембраной. Вторая мембрана в этом случае выполняет роль только передатчика колебаний извне к внутренней стороне рабочей мембраны. В этом случае микрофон имеет кардиоидную характеристику направленности.

Если подать поляризующее напряжение еще и между второй мембраной и неподвижным электродом, то по-

лучим два микрофона, каждый с кардиоидной характеристикой. Из двух кардиоидных можно получить круговую характеристику, если включить выходы микрофонов в фазе: $U(1 + \cos \theta) + U(1 - \cos \theta) = 2U$, или косинусоидальную («восьмерку»), если соединить их в противофазе: $U(1 + \cos \theta) - U(1 - \cos \theta) = 2U \cos \theta$.

Таким образом, простым переключением можно получить три типа характеристики направленности.

В настоящее время микрофоны имеют частотный диапазон 50—15 000 Гц, неравномерность частотной характеристики — не более 6 дБ (МК-13М), уровень чувствительности — 30÷—40 дБ (МК-13 имеет — 37 дБ), средний индекс фронт/тыл для простого кардиоидного варианта 12—16 дБ, уровень собственного шума 15—18 дБ.

Электретные микрофоны выпускают пока только для бытовых магнитофонов. Частотный диапазон их составляет 50—15 000 Гц, неравномерность частотной характеристики 10—15 дБ, уровень собственного шума 27—38 дБ (МКЭ-2, МКЭ-3). Из-за высокого уровня шумов они непригодны для вещательных систем.

5.6. ПЬЕЗОМИКРОФОНЫ

В этом типе микрофонов используют явление пьезоэффекта: при деформации пластинки, вырезанной из кварца, сегнетовой соли и других кристаллов, а также пьезокерамик (титаната бария и др.), происходит ее поляризация, т. е. выделение зарядов на плоскостях. Если пластинку вырезать под определенным углом к оси кристалла, то можно получить поляризацию при деформации пластинки от ее поперечного изгиба. При наклеивании металлических электродов на две противоположные грани пластинки между ними получают разность потенциалов, пропорциональную величине деформации пластинки от поперечного изгиба.

Для получения небольшого механического сопротивления при изгибе пластинку берут очень тонкой, а для получения небольшого электрического сопротивления длину и ширину пластинки выбирают сравнительно большими. Для уменьшения электростатического гистерезиса, аналогичного магнитному, склеивают две пластинки пьезоэлемента со встречным расположением электрических осей. В этом случае пьезоэлемент называют биморфным.

Пьезомикрофоны относят к электростатическому типу микрофона, поскольку основные соотношения, управляющие процессами преобразования колебаний, сходны с происходящими в электростатических преобразователях, например, типа электретных.

Разница между ними заключается в том, что пьезоэлектрические преобразователи не требуют электрической поляризации: электрический заряд у них образуется при деформации. У электретных преобразователей имеющийся заряд как бы пульсирует в такт изменению емкости преобразователя, вызываемой деформацией электрета.

Как и у конденсаторных преобразователей, коэффициент электромеханической связи для пьезомикрофонов обратно пропорционален частоте. При этом вместо градиента поляризующего напряжения U_0/d в ф-лу (5.20) должно быть подставлено выражение (см. [1], § 5.4) $K_h = K_0 l^2 / h^2$, где h — толщина пластинки; l — длина ее; K_0 — коэффициент пьезоэффекта.

Полное выражение для коэффициента электромеханической связи имеет следующий вид:

$$K_{св} = \frac{K_0}{\omega} \frac{l^2}{h^2}.$$

Применение микрофонов с кристаллами из сегнетовой соли ограничено температурной зависимостью ее работы. Допустимые пределы температур от -18 до $+22^\circ$. Наиболее пригодны для микрофонов титанат бария и другие керамические материалы, работающие (практически) в любом диапазоне температур. Основными недостатками пьезомикрофонов являются их высокое входное сопротивление, сложность механической системы, низкая чувствительность и большая неравномерность частотной характеристики. Применение их очень ограничено.

5.7. ЭЛЕКТРОМАГНИТНЫЕ МИКРОФОНЫ

Приемник давления. Принцип действия электромагнитных микрофонов этого типа (рис. 5.18) основан на возникновении ЭДС в катушке 1 при изменении магнитного потока, протекающего через сердечник катушки 8. Изменение магнитного потока получается вследствие изменения воздушного зазора 5 в магнитной цепи, между диафрагмой 3 и полюсным наконечником керна 4. Этот зазор изменяется при колебании диафрагмы и модулирует магнитный поток. Последний создается постоянным магнитом 2, сделанным из высококоэрцитивных материалов, чаще всего сплавов алюминия и никеля, и проходит через сердечник катушки, полюсный наконечник, воздушный зазор и диафрагму. Сердечники и диафрагму изготовляют из мягкого магнитного материала (пермаллой, пермендюр и другие железоникелевые сплавы).

Электрическая характеристика такого микрофона определяется индуктивностью катушек L_k (активное сопротивление невелико, поэтому внутреннее сопротивление его в передаваемом диапазоне частот растет про-

порционально частоте. Микрофон обычно нагружают на активное сопротивление, равное модулю его внутреннего сопротивления на частоте 1000 Гц, т. е. $R_H = |Z_i|_{1000 \text{ Гц}}$.

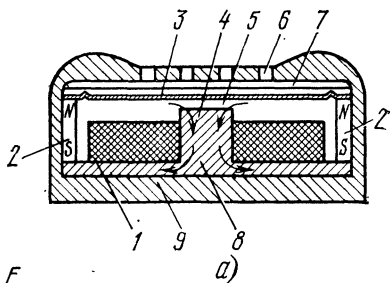
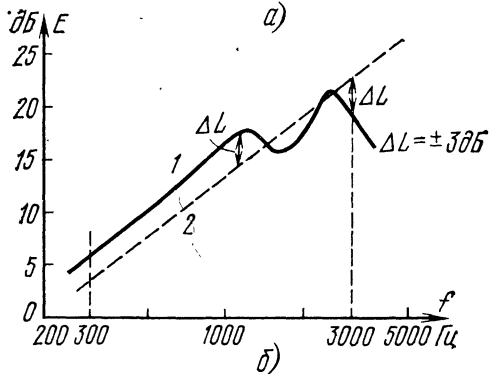


Рис. 5.18. Электромагнитный микрофон: а) конструкция капсуля; б) частотная характеристика микрофона МЭМ-60 (сплошная линия) и оптимальная (пунктир);

1 — катушка; 2 — кольцевой магнит; 3 — диафрагма; 4 — kern; 5 — зазор; 6 — отверстия в амбушюре; 7 — надмембранный объем; 8 — сердечник; 9 — корпус



Поэтому электрическая характеристика $U/\mathcal{E} = R/|R + z_i| \approx R_H/\sqrt{R_H^2 + \omega^2 L_K^2}$ получается равномерной на частотах до 1000 Гц; выше этой частоты она падает. Коэффициент электромеханической связи для данного типа преобразователя можно определить из следующего соотношения:

$$\mathcal{E} = n \frac{d\Phi}{dt} = K_{св} v,$$

где n — число витков катушки; $\Phi = \Phi_0 + \Phi_{\sim}$; Φ_{\sim} — переменная составляющая магнитного потока, появляющаяся вследствие изменения величины зазора $d = d_0 + x$. При $x \ll d_0$ $\Phi_{\sim} = \Phi_0 x/d_0 = B_0 S x/d_0$, поэтому $K_{св} = n B_0 S/d_0 \approx B_0 L_K/n$, поскольку $v = dx/dt$; B_0 — индукция в зазоре; S — поперечное сечение магнитопровода в нем; L_K — индуктивность катушки; d_0 — воздушный зазор.

Как видим, коэффициент электромеханической связи не зависит от частоты. Поскольку акустическая чувствительность приемника давления также не зависит от частоты, то должна корректироваться электрическая характеристика механической. При этом надо помнить, что электромагнитные микрофоны используются только для передачи речи, когда оптимальной частотной характеристикой будет характеристика с положительной тенденцией 6 дБ/окт (см. табл. 3.2). Поэтому необходимо, чтобы механическая характеристика имела подъем не менее 6 дБ/окт на частотах до 1000 Гц и более крутой—выше этой частоты. Это возможно только при выборе механической системы с резонансом на частоте примерно 2000—2200 Гц с дополнительной коррекцией частотной характеристики в диапазоне от 2000 до 3500 Гц. Для этого применяют резонатор Гельмгольца, включающий в себя отверстия в амбушуре 6 и надмембранный объем 7. Частотный диапазон микрофона получается не менее 250—3000 Гц с неравномерностью частотной характеристики (по отношению к положительной тенденции 6 дБ/окт) не более 4 дБ/окт (рис. 5.18б) и уровнем чувствительности не менее —45 дБ. На рис. 5.19а показан такой микрофон (МЭМ-60).

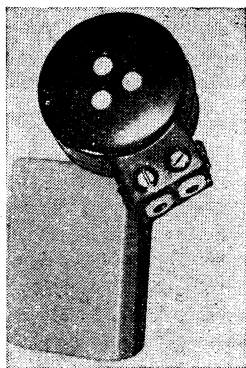
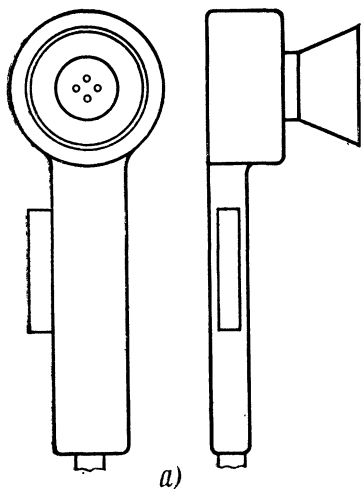


Рис. 5.19. Электромагнитные микрофоны:
а) микрофон МЭМ-60;
б) ДЭМШ-1А

Приемник градиента давления (см. рис. 5.19 б). Этот тип микрофона предназначен также только

для передачи речи по системам связи, оповещения, диспетчерских систем и т. п. Его акустическая, механическая и магнитная системы являются дифференциальными. В капсуле такого микрофона (рис. 5.20а) расположены два кольцевых магнита 1 с полюсными наконеч-

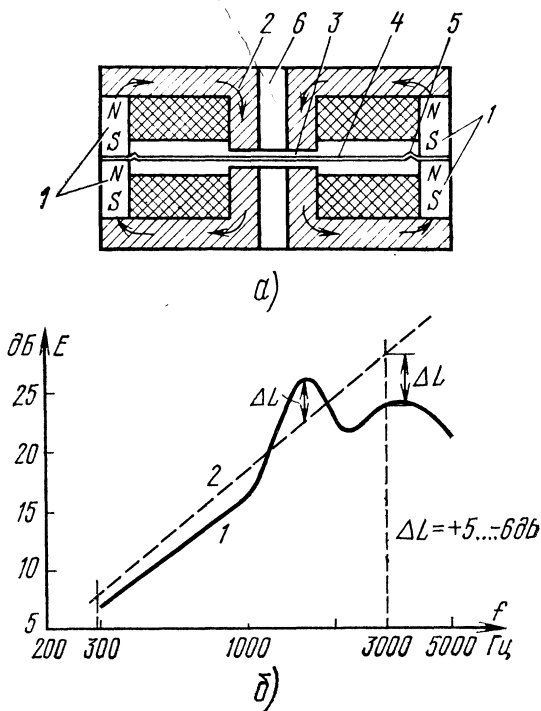


Рис. 5.20. Дифференциальный электромагнитный микрофон:
 а) конструкция; б) частотная характеристика микрофона
 ДЭМШ-1А (сплошная кривая) и оптимальная (пунктир);

1 — кольцевые магниты; 2 — магнитопровод; 3 — воздушный зазор; 4 — диафрагма; 5 — гофрировка диафрагмы; 6 — канал для подачи звукового давления к диафрагме

никами 2 и диафрагмой 4, между которыми с обеих сторон воздушные зазоры 3. По краям диафрагмы делают кольцевую гофрировку 5, чтобы она могла колебаться как одно целое (т. е. как поршень). На полюсных наконечниках размещены катушки, соединенные между собой последовательно. Звуковые волны проходят через

каналы 6. В состоянии покоя диафрагма занимает среднее положение и магнитный поток в ней практически равен нулю (это дает возможность использовать тонкую диафрагму, так как нет опасности ее насыщения). При смещении диафрагмы под действием звукового давления поток в одной магнитной цепи увеличивается, а в другой — уменьшается, и через диафрагму идет разностный поток. Индуктируемые напряжения в катушках складываются арифметически, так как находятся в фазе.

Капсюль микрофона размещен в пластмассовом корпусе, имеющем отверстия (см. рис. 5.19б), соединяющиеся с каналами 6. Эти отверстия вместе с каналами образуют резонатор Гельмгольца.

Размеры микрофона невелики: диаметр 23 мм, толщина 11 мм. Этот микрофон размещают только в ближней зоне источника звука на расстоянии 2—2,5 см от рта говорящего. Располагать микрофон необходимо сбоку от рабочей оси рта, так как иначе при произнесении взрывных звуков речи из-за завихрений, образующихся около микрофона, возникают значительные нелинейные искажения в виде хрипов. Характеристика акустической чувствительности этого микрофона, полученная с учетом реакции его на градиент давления и близости к источнику звука, имеет равномерный участок до частоты 1000 Гц и небольшой подъем выше этой частоты, т. е. мало отличается от характеристики электромагнитного микрофона приемника давления. Остальные характеристики у приемника градиента давления такие же, как у приемника давления. Резонанс механической системы у него выбирают также на частотах около 2500 Гц и также с помощью акустической коррекции получают равномерную частотную характеристику в диапазоне до 3500 Гц и даже до 5000 Гц. Нижняя граница передаваемого частотного диапазона находится около 250—300 Гц. Неравномерность частотной характеристики (по отношению к тенденции 6 дБ/окт) не превышает 6 дБ (см. рис. 5.20б). Уровень чувствительности находится около —60 дБ. Так как этот микрофон имеет высокую шумостойкость (см. § 5.2), то его используют для работы в шумах высокого уровня (до 110—115 дБ) и называют дифференциальным электромагнитным шумостойким микрофоном (ДЭМШ). Микрофон — приемник градиента давления второго порядка — составлен из

двух микрофонов ДЭМШ с дифференциальным включением. Такой же микрофон можно получить, применив один микрофон, снабженный специальной звукоподводящей трубкой, направляющей дополнительную звуковую волну непосредственно на микрофон. Таким образом, на микрофон действует разность давлений двух волн. Такие микрофоны обладают высокой шумоустойчивостью и могут работать в шумах с уровнем до 123 дБ.

5.8. УГОЛЬНЫЕ МИКРОФОНЫ

В угольных микрофонах постоянный ток, питающий микрофон, преобразуется в пульсирующий вследствие изменения сопротивления угольного порошка под действием переменного механического давления диафрагмы. Последняя колеблется под действием звукового давления. Переменная составляющая тока, являющаяся продуктом воздействия звукового давления, создает падение напряжения на нагрузке. Отношение этого напряжения к звуковому давлению и будет определять чувствительность микрофона. Чем больше постоянная составляющая тока через микрофон, тем больше чувствительность микрофона. При передаче речи уровень выходного напряжения близок к нулевому ($U_0=0,775$ В).

В частотном диапазоне 400—2500 Гц угольный микрофон имеет частотную характеристику, близкую к оптимальной для передачи речи. Частотный диапазон лучших угольных микрофонов не превышает 300—3400 Гц. Очень велики у него нелинейные искажения. На низких частотах КНИ доходит до 15—20%. Динамический диапазон не превышает 30 дБ. Снизу он ограничен собственными шумами, генерируемыми переменными контактами между угольными зернами, а сверху—резким изменением сопротивления контактов между зернами, а иногда и разрывом между контактами. В настоящее время угольные микрофоны применяют только в гражданских телефонных аппаратах.

Иногда угольные микрофоны заменяют на электромагнитные с усилителями на интегральных схемах, которые по габаритам, питанию и отдаче мощности такие же, как и угольные, но по качеству звучания превосходят их.

5.9. ЛАРИНГОФОНЫ

Ларингофоны, т. е. гортанные микрофоны, предназначены для приема речи через колебания тканей шеи, расположенных около гортани. В этом случае воспринимаются не акустические волны, а механические колебания стенок речевого тракта, вызываемые акустическими колебаниями при произнесении звуков.

Все существующие ларингофоны основаны на инерционном принципе действия. Капсюль ларингофона заключен в закрытый корпус, располагаемый с передней стороны шеи около стенок гортани. Обычно применяют два последовательно включенных ларингофонных капсюля, расположенных по обе стороны гортани.

Электромагнитный ларингофон (рис. 5.21а) вместо диафрагмы имеет плоскую прямоугольную пластинку 1, укрепленную в средней точке на корпусе 2 и прикрепленную к магнитной системе 3 с обоих концов. Магнит-

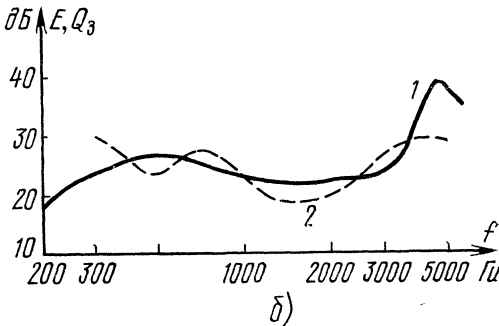
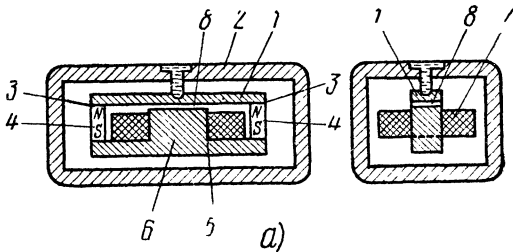


Рис. 5.21. Электромагнитный ларингофон:
а) конструкция; б) частотная характеристика чувствительности ларингофона, приведенная к обычному микрофону, находящемуся на расстоянии 2,5 см от рта (сплошная кривая) и шумостойкости (пунктир);

1 — диафрагма (планка); 2 — корпус; 3 — место спая планки с магнитами; 4 — магниты; 5 — фланец; 6 — керн; 7 — катушка; 8 — воздушный зазор

ная система состоит из двух плоских магнитов 4, одного фланца 5, керна 6 и пластинки 1. Между срезом керна и пластинкой имеется небольшой воздушный зазор 8. На керне находится катушка 7. Механическая система представляет собой массу (магнитная цепь и катушка) и гибкость (гибкость пластинки). Сила приложена к этой гибкости. Аналоговая электрическая схема представляет собой контур из индуктивности и емкости, соединенных параллельно (см. табл. 4.3б). Механические колебания стенок гортани приводят в движение корпус ларингофона. По инерции масса колеблется в противоположной фазе, поэтому зазор изменяется в такт механическим колебаниям гортани. Изменение зазора влечет за собой изменение магнитного потока. В результате в катушке индуцируется ЭДС.

Если учесть, что скорость колебаний стенок гортани при речи уменьшается обратно пропорционально квадрату частоты (см. [5], § 5.14), то необходимо, чтобы напряжение, развиваемое ларингофоном при постоянстве скорости колебаний, увеличивалось с повышением частоты по квадратичному закону. Этого можно добиться, если выбрать резонансную частоту механической системы выше передаваемого диапазона частот. В этом случае частотная характеристика чувствительности ларингофона, приведенная к чувствительности эквивалентного микрофона, будет достаточно равномерна. Такой ларингофон должен хорошо передавать все форманты звуков речи. На самом деле высокочастотные звуки передаются плохо, особенно шумовые, так как их уровень в колебаниях гортани сравним с уровнями шумов, возникающих в тканях тела из-за жизнедеятельности организма.

Ларингофоны имеют примерно такую же чувствительность, как и электромагнитные микрофоны. Неравномерность их частотной характеристики невелика. Частотный диапазон 300—3000 Гц. Они обладают высокой шумозащищенностью и могут работать в условиях шумов до 130 дБ (см. рис. 5.21б).

Сравнивая между собой различные типы микрофонов, можно сказать, что для художественного вещания по высшему классу качества звучания пригоден только конденсаторный микрофон. Для передачи речи в системах вещания пригоден динамический микрофон, преимущественно комбинированный с подъемом частотной

характеристики в сторону высоких частот на 6 дБ/окт. Для художественного вещания по первому классу качества пригодны микрофоны ленточный и высококачественный динамический. Для второго и третьего классов качества звучания наиболее подходящим будет динамический микрофон, для звукоусиления речи — динамические микрофоны с вторым классом качества. Для систем связи рекомендуются электромагнитные и угольные микрофоны.

Для стереофонических передач применяются специальные микрофоны, состоящие из двух отдельных микрофонов, разнесенных в горизонтальной плоскости на расстояние, равное расстоянию между ушами. Оси микрофонов должны быть параллельными.

Г л а в а 6

ГРОМКОГОВОРИТЕЛИ И ТЕЛЕФОНЫ

6.1. ОПРЕДЕЛЕНИЯ

Громкоговорители и телефоны — это преобразователи электрических колебаний в акустические. В большинстве типов громкоговорителей и телефонов электрическая энергия преобразуется в акустическую. Есть громкоговорители, основанные на релейном принципе, в которых энергия постоянного потока воздуха преобразуется в акустическую энергию под действием акустических или механических колебаний (например, пневматические громкоговорители).

Работа громкоговорителей оценивается с помощью следующих технических показателей [8в].

Номинальная мощность $P_{\text{ном}}$ — максимальная подводимая электрическая мощность, ограниченная тепловой и механической прочностью громкоговорителя и возникновением нелинейных искажений, превышающих заданную величину. Обычно она меньше паспортной. Громкоговоритель не должен выходить из строя при длительном воздействии этой мощности.

Частотная характеристика громкоговорителя по звуковому давлению — зависимость звукового давления, развиваемого громкоговорителем в точке свободного поля (находящейся на определенном расстоянии от *рабочего центра*) от частоты при постоянном напряжении на зажимах громкоговорителя.

Рабочий центр — обычно геометрический центр симметрии выходного отверстия излучателя. Для сложных излучателей рабочий центр указывается в описании громкоговорителей.

Неравномерность частотной характеристики и эффективно воспроизводимый диапазон частот определяются по частотной характеристике, снятой на *рабочей оси* (см. § 3.9). Рабочая ось обычно совпадает с геометрической осью излучателя, а для сложных излучателей она указывается в описании громкоговорителей.

Среднее звуковое давление $p_{\text{ср}}$ — среднеквадратичное значение звукового давления, развиваемого громкоговорителем в определенном диапазоне частот в заданной точке свободного поля. Усредняют значения звукового давления, измеренные на частотах, распределенных равномерно в логарифмическом масштабе.

Среднее стандартное звуковое давление $p_{\text{ст}}$ — среднее звуковое давление, развиваемое в номинальном диапазоне частот на рабочей оси на расстоянии 1 м от рабочего центра при подведении к громкоговорителю напряжения, соответствующего подводимой электрической мощности 0,1 Вт.

В справочниках иногда приводится *номинальное звуковое давление* $p_{\text{ном}}$, отличающееся от среднего стандартного тем, что определяется оно при подведении номинальной мощности.

Характеристическая чувствительность E_x — отношение среднего звукового давления $p_{\text{ср}}$, развиваемого громкоговорителем в номинальном диапазоне частот на рабочей оси на расстоянии 1 м от рабочего центра, к корню квадратному из подводимой электрической мощности $P_э$:

$$E_x = p_{\text{ср}}/\sqrt{P_э} = p_{\text{ном}}/\sqrt{P_{\text{ном}}} = p_{\text{ст}}/\sqrt{0,1}. \quad (6.1)$$

Между характеристической чувствительностью и средним стандартным звуковым давлением существует прямая связь: $p_{\text{ст}} = E_x \sqrt{0,1}$.

Для расчетов часто пользуются понятием осевой чувствительности громкоговорителя по напряжению¹⁾, под которой подразумевают отношение звукового давления p_1 , развиваемого на рабочей оси на расстоянии 1 м от рабочего центра громкоговорителя в свободном поле, к

¹⁾ Обычно ее называют просто чувствительностью.

подводимому напряжению: $E_{oc} = p_1/U$. Эта чувствительность зависит от частоты.

Входное сопротивление громкоговорителя — $z_{вх}$. Так как в общем случае $z_{вх}$ зависит от частоты, то в справочниках приводят *номинальное электрическое сопротивление* — минимальный модуль полного электрического сопротивления громкоговорителя в диапазоне частот выше частоты основного резонанса механической колебательной системы громкоговорителя.

Характеристика направленности — зависимость звукового давления p_θ , развиваемого громкоговорителем в точке свободного поля (находящихся на одинаковом расстоянии от рабочего центра), от угла между рабочей осью громкоговорителя и направлением на указанную точку. Обычно эту характеристику нормируют по отношению к осевому звуковому давлению p_{oc} :

$$R(\theta) = p_\theta/p_{oc} \text{ при } r = \text{const.} \quad (6.2)$$

Характеристика направленности изменяется в зависимости от частоты, поэтому ее измеряют или на ряде частот, или для заданной полосы частот. Характеристику направленности, снятую в плоскости, называют диаграммой направленности. Диаграмму направленности обычно изображают в полярных координатах (рис. 6.1). При этом радиус-вектор соответствует величине $R(\theta)$ [см. (6.2)]. Иногда диаграмма направленности строит-

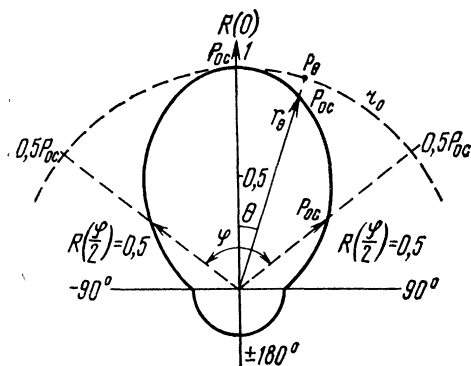


Рис. 6.1. Диаграмма направленности громкоговорителя; φ — угол излучения

ся для значений $20 \lg R(\theta)$ в децибелах. Определяют ее для ряда плоскостей, проходящих через рабочую ось. Если излучатель громкоговорителя имеет осевую сим-

метрию, то его характеристика направленности тоже будет иметь осевую симметрию. В этом случае достаточно иметь характеристику направленности только для одной плоскости. В большинстве случаев достаточно иметь диаграммы направленности для двух взаимно перпендикулярных плоскостей.

Направленность характеризуют коэффициентом осевой концентрации Ω . Коэффициентом осевой концентрации называют отношение квадратов величин звукового давления, измеренных в условиях свободного поля на определенном расстоянии от рабочего центра громкоговорителя: на рабочей оси (p_{oc}^2) и усредненного по всем радиальным направлениям ($p_{\theta\text{ср}}^2$), исходящим из рабочего центра ¹⁾:

$$\Omega = p_{oc}^2 / p_{\theta\text{ср}}^2. \quad (6.3)$$

Следовательно, для ненаправленных громкоговорителей коэффициент осевой концентрации равен единице, так как $p_{\theta\text{ср}} = p_{oc}$, а для направленных — больше единицы (он может достигать нескольких десятков). Так как акустическая мощность излучателя представляет собой поток энергии через всю сферическую поверхность, то для ненаправленного излучателя она может быть определена из (1.15) и (1.21):

$$P_{\text{нн}} = 4\pi r^2 I_r = 4\pi r^2 p_{\text{нн}}^2 / \rho c,$$

где I_r — интенсивность звука на расстоянии r от рабочего центра громкоговорителя; $p_{\text{нн}}$ — звуковое давление на том же расстоянии ²⁾; ρc — удельное акустическое сопротивление.

Отсюда следует, что излучаемая акустическая мощность громкоговорителя пропорциональна квадрату развиваемого им звукового давления. Исходя из этого, акустическая мощность направленного излучателя будет равна акустической мощности ненаправленного излучателя, создающего звуковое давление, равное $p_{\theta\text{ср}}$, при прочих равных условиях, т. е.

$$P_{\text{в}} = 4\pi r^2 p_{\theta\text{ср}}^2 / \rho c.$$

Следовательно, коэффициент осевой концентрации мож-

¹⁾ Формулировка коэффициента осевой концентрации, приведенная в [8в], заменена более простой, без ущерба для ее точности.

²⁾ В данном случае оно является и осевым давлением.

но определить как отношение акустических мощностей ненаправленного и направленного излучателей при условии равенства их осевых звуковых давлений

$$\Omega = P_{\text{нн}}/P_{\text{н}}, \text{ при } p_{\text{ос.нн}} = p_{\text{ос.н}}. \quad (6.4)$$

Для направленного громкоговорителя соответственно (6.3) акустическая мощность

$$P_{\text{н}} = P_{\text{нн}}/\Omega = 4\pi r^2 p_{\text{ос.н}}^2 / \rho c \Omega. \quad (6.5)$$

Исходя из этого коэффициент осевой концентрации можно определить как отношение квадратов осевых значений звукового давления, развиваемых направленным и ненаправленным громкоговорителями, при условии, что они излучают одинаковую мощность, т. е.

$$\Omega = p_{\text{ос.н}}^2 / p_{\text{ос.нн}}^2 \text{ при } P_{\text{н}} = P_{\text{нн}}.$$

Это определение показывает, что осевая концентрация энергии больше у того громкоговорителя, у которого при равной излучаемой мощности развиваемое звуковое давление на оси будет больше.

Следует сказать еще об одной интерпретации характеристики направленности. На больших расстояниях от излучателя (по сравнению с его размерами) для сферической волны звуковое давление [см. (1.16а)] изменяется обратно пропорционально расстоянию от громкоговорителя, т. е. $p_a/p_b = r_b/r_a$.

Основываясь на этом соотношении, можно прийти к важному выводу. Если на расстоянии r_0 от громкоговорителя под углом θ звуковое давление будет $p_\theta < p_{\text{ос}}$, то, оставаясь под тем же углом и приближаясь к громкоговорителю, можно найти точку, в которой звуковое давление будет равно осевому $p_{\text{ос}}$ (см. рис. 6.1). Эта точка будет находиться от громкоговорителя на расстоянии

$$r_\theta = r_0 p_{\text{ос}} / p_\theta.$$

Поэтому из (6.2) имеем

$$\text{для } p = p_{\text{ос}} = \text{const} \quad r_\theta / r_0 = R(\theta). \quad (6.2a)$$

Таким образом, угловая зависимость относительной величины расстояния (от громкоговорителя), для которого звуковое давление будет одинаковым для всех углов (изобара), совпадает по форме с характеристикой направленности. Это справедливо только для сферической волны.

Коэффициент осевой концентрации для характеристики направленности с осевой симметрией можно вычислить по следующей формуле (см. [1], с 51):

$$\Omega = 2 / \int_0^\pi R^2(\theta) \sin \theta d\theta.$$

Коэффициент нелинейных искажений измеряют для ряда заданных частот при подведении к громкоговори- телю синусоидального напряжения, соответствующего номинальной мощности, а иногда и для так называемой рабочей мощности.

КПД громкоговорителя. В паспортных дан- ных КПД громкоговорителя обычно не приводится. Вме- сто него указывают стандартное звуковое давление или характеристическую чувствительность, однозначно свя- занные между собой и с акустической мощностью. Если подвести к громкоговори- телю электрическую мощность $P_a=0,1$ Вт, то согласно определению стандартного зву- кового давления $p_{oc}=p_{ст}$. Для этой электрической мощ- ности при $r = 1$ м получаем акустическую мощность (6.5)

$$P_a |_{P_a=0,1} = 4\pi p_{ст}^2 / \rho c \Omega \quad (6.6)$$

и КПД

$$\eta = P_a / P_a = 4\pi p_{ст}^2 / \rho c \Omega 0,1 \approx 0,3 p_{ст}^2 / \Omega, \quad (6.7a)$$

где $p_{ст}$ в паскалях, $\rho c = 412$ кг/м²·с.

Согласно определению номинального звукового дав- ления при $P_a=P_{ном}$ имеем $p_{oc}=p_{ном}$, откуда в соответ- ствии с (6.5) и определением (6.1)

$$\eta = P_{a,ном} / P_{ном} = 4\pi p_{ном}^2 / \rho c \Omega P_{ном} = 4\pi E_x^2 / \rho c \Omega \approx 0,03 E_x^2 / \Omega, \quad (6.7b)$$

где E_x — характеристическая чувствительность в Па/ $\sqrt{\text{Вт}}$.

Осевая чувствительность громкоговори- теля может быть представлена в следующем виде:

$$E_{oc} = \frac{p_1}{U} = \frac{p_1}{v_m} \frac{v_m}{F} \frac{F}{i} \frac{i}{U}, \quad (6.8)$$

где p_1/v_m — акустическая чувствительность; $v_m/F = 1/Z_m$ — механическая чувствительность; $F/i = K_{св}$ — коэффициент электромеханической связи; $i/U = Z_{вх}$ — электри- ческая характеристика; Z_m — полное механическое со- противление подвижной системы (модуль); $Z_{вх}$ — вход- ное электрическое сопротивление громкоговорителя (мо- дуль); p_1 — звуковое давление на расстоянии 1 м от громкоговорителя; U — подводимое напряжение к нему.

В заключение приведем классификацию громкогово- рителей. По принципу преобразования громкоговори-

ли делятся на электродинамические (в просторечии — динамики), электростатические и релейные. Электромагнитные из-за низкого качества звучания теперь не применяются. По типу излучателя громкоговорители делятся на диффузорные и рупорные, а также на одиночные и групповые. Электростатические по типу преобразователя делятся на конденсаторные, электретные и пьезогромкоговорители. К релейным относятся только пневматические громкоговорители.

6.2. ДИФФУЗОРНЫЕ ИЗЛУЧАТЕЛИ

В диффузорных громкоговорителях диафрагма, входящая в его механическую подвижную систему, выполняет как функцию преобразования механических колебаний в акустические, так и функцию излучения звука в окружающую среду. Поэтому эту диафрагму называют диффузором, т. е. рассеивателем, а громкоговоритель относят к громкоговорителям с непосредственным излучением. В общем случае диффузор имеет сложную форму, но эксперименты показывают, что все основные выводы об излучении звуковых волн с помощью диффузора можно получить с достаточной точностью при его замене плоской диафрагмой, колеблющейся как поршень. Это обеспечивается соответствующим креплением диффузора к корпусу громкоговорителя: во-первых, гибким и, во-вторых, не допускающим иных колебаний, кроме осевого.

Процесс излучения звуковых волн довольно прост: при своих колебаниях диафрагма приводит в движение частицы прилегающей к ней среды, создавая попеременно сжатие и разрежение ее. Колебания этих частиц передаются соседним слоям среды и т. д., создаются волны сжатия и разрежения, которые движутся со скоростью звука вдаль. Вследствие принципа неразрывности газообразной (и жидкой) среды скорость колебаний диафрагмы v_m и прилегающих к ней частиц среды v_v должна быть одинаковой, т. е. $v_m = v_v$. Иначе пришлось бы допустить появление вакуума около диафрагмы или проникновение частиц среды в твердую диафрагму. При колебаниях диафрагмы среда оказывает сопротивление этим колебаниям. Ясно, что в безвоздушном пространстве диафрагму легче колебать, чем в воздухе, а в воздухе легче, чем в воде. Это сопротивление называют со-

противлением излучения ($z_{\text{изл}}$). Сопротивление излучения добавляется к механическому сопротивлению диафрагмы $z_{\text{м.д}}$, т. е. имеем

$$F/v_{\text{м}} = z_{\text{м.д}} + z_{\text{изл}} = z_{\text{м}}. \quad (6.9)$$

Сопротивление излучения по своей сути является акустическим сопротивлением звуковой волны в месте соприкосновения среды с излучающей поверхностью, т. е.

$$z_{\text{изл}} = \bar{z}_{\text{аR}} S = R_{\text{изл}} + i X_{\text{изл}}, \quad (6.10)$$

где S — площадь излучателя; $\bar{z}_{\text{аR}}$ — среднее удельное акустическое сопротивление среды около излучателя.

Полная излучаемая мощность.

$$P_{\text{изл}} = v_{\text{м}}^2 z_{\text{изл}}. \quad (6.10a)$$

В общем случае сопротивление излучения комплексное. Физически это означает, что излучаемая мощность имеет активную составляющую, определяющую поток энергии, уходящей в бесконечность, и реактивную, определяющую запас энергии, создаваемый в звуковом поле. Реактивная составляющая частично возвращается в излучатель обратно после окончания вынужденных колебаний диафрагмы.

Определим сопротивление излучения для одного из основных излучателей — излучателя нулевого порядка. Это пульсирующий шар, излучающий сферическую волну. Исходя из этого для излучателя с радиусом R удельное сопротивление можно определить из (1.18). Поэтому при подстановке значений радиуса излучателя и величины его излучающей поверхности в (6.10) и (1.18) получим:

$$z_{\text{изл}} = \rho c S \left[\frac{\omega^2 R^2}{\omega^2 R^2 + c^2} + i \frac{\omega R c}{\omega^2 R^2 + c^2} \right] = \rho c S [K_{1\text{изл}} + i K_{2\text{изл}}];$$

$$K_{1\text{изл}} = \frac{y^2}{y^2 + 1}; \quad K_{2\text{изл}} = \frac{y}{y^2 + 1}; \quad y = \frac{\omega R}{c} = \frac{2\pi R}{\lambda}, \quad (6.11)$$

где S — площадь излучателя; $K_{1\text{изл}}$ и $K_{2\text{изл}}$ — безразмерные коэффициенты сопротивления излучения.

На рис. 6.2а (кривые 1 и 5) показаны зависимости безразмерных коэффициентов активного и реактивного сопротивлений от частоты, точнее, от соотношения длины волны и размеров излучателя. Как видим из этого графика, на низких частотах, т. е. при малых отноше-

ях R/λ , активное сопротивление излучения растет пропорционально квадрату частоты: при отношении $R/\lambda \geq 1$ оно постепенно приближается к сопротивлению плоской волны $\rho c S$ (безразмерный коэффициент приближается к единице). Реактивная составляющая быстро уменьшается с увеличением частоты и стремится к нулю. Действительно, на высоких частотах ($R/\lambda \gg 1$) излучатель практически создает плоскую волну, для которой акустическое сопротивление чисто активно.

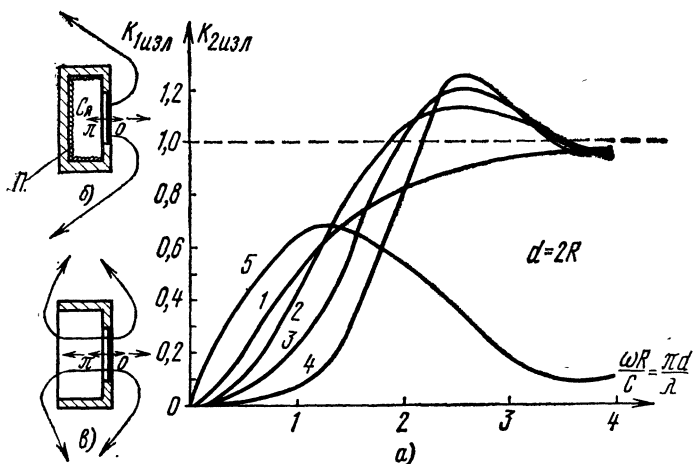


Рис. 6.2. К определению характеристик излучателей:

а) зависимость безразмерных коэффициентов активного 1, 2, 3, 4 и реактивного 5 сопротивлений излучения от соотношения между размерами излучателя и длиной звуковой волны: 1 и 5 — для сферического излучателя, 2 — для поршневой диафрагмы в бесконечном экране, 3 — для поршневой диафрагмы в закрытом ящике; 4 — то же самое, в ящике с открытой задней стенкой; б) закрытый ящик; в) ящик с открытой задней стенкой

Нетрудно показать, что реактивная составляющая сопротивления излучения представляет собой инерционное сопротивление $\omega m_{вн}$, т. е. является сопротивлением некоторой массы воздуха $m_{вн}$:

$$m_{вн} = \rho S R / \left(\frac{\omega^2 R^2}{c^2} + 1 \right).$$

Масса излучателя как бы увеличивается на эту величину, и поэтому ее называют соколеблющейся массой.

Заметим, что с некоторым приближением плоскую

диафрагму, колеблющуюся как поршень в бесконечном акустическом экране¹⁾, можно приближенно рассматривать как пульсирующий шар, излучающий сферическую волну. Если такую поршневую диафрагму возбуждать на частотах, длины волн которых значительно больше размеров диафрагмы, то излучаемые звуковые волны ничем не будут отличаться от сферических. При длинах волн меньших размеров диафрагмы закон излучения будет несколько сложнее, так как при этом звуковые волны, излучаемые различными участками диафрагмы, будут интерферировать между собой. В результате интерференции в одних точках поля возможно увеличение уровня, а в других — уменьшение по сравнению с уровнями, создаваемыми излучателями нулевого порядка. При этом и то, и другое будет зависеть от частоты колебаний. При длинах волн, значительно меньших размеров излучателя, последний создает плоскую волну²⁾.

Поэтому для плоского поршневого излучателя в бесконечном экране безразмерные коэффициенты имеют несколько иной вид (см. рис. 6.2а, кривая 2). Основное отличие в том, что переход от квадратичной зависимости к независимости от частоты совершается не плавно, а волнообразно, что объясняется интерференцией волн, излучаемых отдельными участками плоской диафрагмы.

Поршневая диафрагма, колеблющаяся в экране конечных размеров, также может рассматриваться как излучатель нулевого порядка, если излучаемые колебания будут иметь длину волны значительно меньше размеров экрана. При этом имеют место те же оговорки, что и для случая бесконечного экрана в отношении соизмеримости размеров диафрагмы и длины волны. Если же длина волны будет значительно больше размеров экрана, то имеют дело с излучателем первого порядка — диполем, так как звуковое поле будет образовываться разностным действием излучений лицевой (фронтальной) и

¹⁾ Акустическим экраном называют практически звуконепропускаемую перегородку, не участвующую в колебаниях. Часто такой экран называют стеной. Диафрагма размещается в сквозном отверстии, сделанном для нее в экране.

²⁾ Напомним, что на большом расстоянии от излучателя акустическое сопротивление сферической волны практически равно акустическому сопротивлению плоской волны, т. е. и по этому параметру на большом расстоянии от излучателя сферическая звуковая волна превращается в плоскую.

обратной (тыльной) сторон диафрагмы с учетом разности хода звуковых волн вокруг экрана (рис. 6.2в), поэтому для излучателя без экрана зависимость этих коэффициентов от частоты будет на низких частотах иной, чем с экраном (см. рис. 6.2а, кривая 4). Вследствие дифракции волн, имеющих длину больше размеров диафрагмы, происходит взаимная компенсация излучений, так как тыльная сторона диафрагмы излучает волны в противофазе с фронтальным излучением (наблюдается эффект своего рода короткого замыкания). Поэтому активное сопротивление излучения близко к нулю и начинает увеличиваться только, когда длина волны начинает превосходить размеры излучателя. На высоких частотах, для которых длина волны значительно больше размеров излучателя, такой излучатель по сопротивлению излучения мало отличается от излучателя нулевого порядка.

Определим факторы, влияющие на акустическую характеристику p_1/v_m , где p_1 — звуковое давление на расстоянии 1 м от рабочего центра по рабочей оси в свободном поле; v_m — скорость колебаний диафрагмы излучателя.

Из ф-лы (6.5) следует, что акустическая мощность (поток энергии в звуковом поле)

$$P_a = 4\pi p_1^2 / \rho c \Omega,$$

так как по определению $p_{oc} = p_1$, если $r = 1$ м. В то же время излучаемая активная мощность $P_{a,изл} = v_m^2 R_{изл} = v_m^2 \rho c S K_{1изл}$. Поскольку они должны быть равны для пассивной среды, то имеем

$$4\pi p_1^2 / \rho c \Omega = v_m^2 \rho c S K_{1изл},$$

откуда для акустической чувствительности получаем

$$p_1 / v_m = \rho c \sqrt{S \Omega K_{1изл} / 4\pi}, \quad (6.12)$$

где $K_{1изл}$ — безразмерный коэффициент сопротивления излучения; S — площадь диафрагмы. Следовательно, акустическая чувствительность зависит от частоты через коэффициенты сопротивления излучения $K_{1изл}$ и осевой концентрации Ω . Первый растет пропорционально квадрату частоты на низких частотах и постоянен на средних и высоких частотах. Второй постоянен на низких и растет на средних и высоких частотах с увеличением частоты. Вследствие этого акустическая чувстви-

тельность растет пропорционально частоте в широком диапазоне частот.

Рассмотрим характеристики направленности излучателей. Возьмем два одинаковых сферических излучателя с расстоянием между ними, равным d . Определим звуковое давление, создаваемое этими излучателями в удаленной точке от них под разными углами к оси (за ось примем перпендикуляр к линии, соединяющей центры излучателей; линия и перпендикуляр находятся в рассматриваемой плоскости). На оси звуковое давление удвоится. Под углом θ к оси разность хода между расстояниями от излучателей до рассматриваемой точки $\Delta r = d \sin \theta$. Поэтому звуковые давления будут складываться с учетом разности хода (т. е. разности фаз) между ними. Пока разность хода меньше $\lambda/3$, суммарное звуковое давление меньше, чем на оси, но больше, чем звуковое давление от одного излучателя. При разности хода, равной $0,5\lambda$, оно будет равно нулю, при $\Delta r = \lambda$ будет равно осевому, а при $\Delta r = 1,5\lambda$ оно опять будет равно нулю и т. д.

Если создаваемое одним излучателем звуковое давление $p_a = \frac{p_1}{r} \sin \omega \left(t - \frac{r}{c} \right)$, то создаваемое другим излучателем давление $p_b = \frac{p_1}{r} \sin \left[\omega \left(t - \frac{r}{c} \right) - \Delta \varphi \right]$, где $\Delta \varphi = \frac{2\pi \Delta r}{\lambda} = \frac{2\pi d}{\lambda} \sin \theta$ — разность фаз между этими звуковыми давлениями, а амплитуда суммарного звукового давления

$$p_{m\Sigma} = |p_a + p_b| = \frac{2p_1}{r} \cos \frac{\Delta \varphi}{2} = \frac{2p_1}{r} \cos \left[\frac{\pi d}{\lambda} \sin \theta \right].$$

Следовательно, характеристика направленности такого составного излучателя [см. (6.2)]

$$R(\theta) = p_\theta / p_{oc} = \cos x, \quad (6.13)$$

где $x = \frac{\pi d}{\lambda} \sin \theta$, так как при $\theta = 0$ $\Delta \varphi = 0$ и $p_{oc} = 2p_1/r$.

Нетрудно видеть из этого, что при больших расстояниях между излучателями по сравнению с длиной волны получается многолепестковая характеристика направленности. Если же длина волны много больше расстояния между излучателями, то даже под углом 90° к оси излучателя суммарное давление будет лишь немно-

го меньше давления на оси. В этом случае диаграмма направленности близка к окружности. Таким образом, из (6.13) следует, что характеристика направленности определяется отношением d/λ .

Для круглого поршневого излучателя в бесконечном акустическом экране характеристика направленности имеет вид (см. [3] § 9.1)

$$R(\theta) = [2J_1(x)]/x,$$

где $x = \frac{\pi d}{\lambda} \sin \theta$; d — диаметр излучателя; J_1 — функция

Бесселя первого порядка.

На рис. 6.3 приведены диаграммы направленности для этого излучателя при разных отношениях d/λ . Таким образом, во всех случаях направленность определяется отношением размеров излучателя к длине волны: чем оно больше, тем больше коэффициент осевой концентрации. Поэтому для одного и того же излучателя направленность повышается с увеличением частоты, а на одной и той же частоте — с увеличением размеров излучателя.

Диаграмма направленности поршневой диафрагмы в экране конечных размеров для низких частот будет иметь форму кривой $(1 - \sin \theta)$, так как в плоскости диафрагмы (см. рис. 6.2в) всегда будет полная компенсация излучения от обеих сторон излучателя, поскольку они сдвинуты по фазе на 180° . С увеличением частоты при длинах волн, примерно равных и несколько меньших размеров экрана, характеристика направленности несколько расширяется, а при дальнейшем увеличении частоты она приближается к характеристике направленности поршневой диафрагмы в бесконечном экране, становясь многолепестковой.

Следует еще остановиться на характеристике ближнего поля поршневой диафрагмы, так как оно отличается от поля сферической волны. На небольших расстояниях от поршневого излучателя, находящегося в бесконечном экране, имеет место интерференция звуковых волн, исходящих от разных участков диафрагмы, так как между ними получается разность хода. Если длина волны много больше размеров диафрагмы, эта разность хода невелика и все звуковые волны оказываются почти в одной фазе, если же длина волны значительно меньше размеров диафрагмы, разность хода может оказаться даже

больше длины волны. В результате этого амплитуда звукового давления в ближней зоне поршневого излучателя изменяется при удалении от него по сложному за-

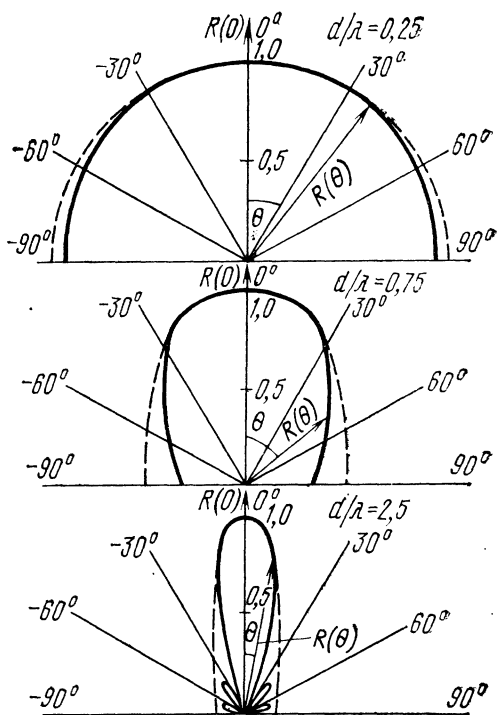


Рис. 6.3. Диаграммы направленности круглого поршневого излучателя в бесконечном экране для разных соотношений между диаметром излучателя и длиной волны

кону с максимумами и минимумами (в ряде точек давление может оказаться равным нулю). И только на расстояниях, превышающих в несколько раз размеры диафрагмы, закон изменения звукового давления при удалении от излучателя становится монотонным (гиперболическим) (1.16а).

6.3. ДИФFUЗОРНЫЕ ДИНАМИЧЕСКИЕ ГРОМКОГОВОРТЕЛИ

На рис. 6.4 приведен схематический чертеж устройства динамического громкоговорителя. Принцип его действия взаимен с принципом действия динамического микрофона (см. § 4.6) и заключается в том, что катушка с на-

мотанным на нее проводом l [ср. ее с 5 на рис. 5.9 *а* и *б*], находящаяся в радиальном магнитном поле (см. рис. 5.9*в*) при пропускании через нее переменного тока i , испытывает действие силы $F = Bli$, где B — индукция в зазоре; l — длина провода.

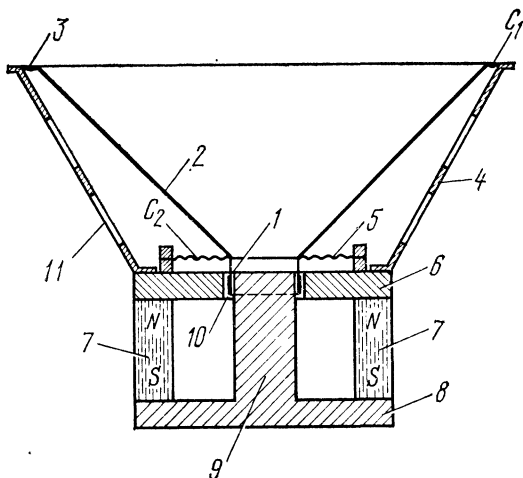


Рис. 6.4. Динамический диффузорный громкоговоритель:

1 — звуковая катушка; 2 — диффузор; 3 — подвес диффузора; 4 — корпус; 5 — шайба; 7 — магниты; 6 и 8 — фланцы; 9 — kern; 10 — кольцевой зазор; 11 — отверстия для выхода тыльного излучения

Эта сила приводит в движение диффузор 2, жестко скрепленный с катушкой 1, называемой звуковой, и подвешенный к корпусу 4 по внешнему краю 3, а также центрируемый «шайбой» 5. Вследствие этого диффузор является поршневым излучателем и имеет одну степень свободы колебаний (только по осевому направлению). Магнитное поле создается кольцевым постоянным магнитом¹⁾ 7 и магнитной цепью из двух фланцев 6 и 8 и керна 9. Между керном и верхним фланцем есть кольцевой зазор 10, в котором размещена звуковая катушка 1, свободно колеблющаяся в нем.

Механическая подвижная система, состоящая из диффузора с звуковой катушкой и креплений, может рассматриваться, по крайней мере, на низких и средних частотах как единое целое, т. е. как простая колебательная система, состоящая из массы всей подвижной

¹⁾ В ряде громкоговорителей магнитом является kern.

системы m , включая и соколеблющуюся массу $m_{\text{вн}}$; трех гибкостей, соединенных в аналоговой схеме последовательно [гибкость подвеса C_1 , гибкость центрирующей шайбы C_2 (рис. 6.4) и гибкость воздуха в ящике (см. рис. 6.2б) $C_{\text{я}}$]; трех активных сопротивлений (трение катушки о воздух в зазоре r_1 , механические потери в диффузоре, центрирующей шайбе и подвесе r_2 , а также сопротивление излучения $R_{\text{изл}}$). Механическое сопротивление (4.1) в этом случае имеет вид

$$z_{\text{м}} = (r_1 + r_2 + r_{\text{изл}}) + i\omega(m_{\text{д}} + m_{\text{вн}}) + \frac{1}{i\omega} \left(\frac{1}{C_1} + \frac{1}{C_2} + \frac{1}{C_{\text{я}}} \right) =$$

$$= r_{\text{м}} + i\omega m + \frac{1}{i\omega C_{\text{м}}}.$$

Чтобы диффузор не изгибался как мембрана, ему придают соответствующую форму. Для создания необходимой жесткости диффузору чаще всего придают форму усеченного конуса с круговым или эллиптическим основанием. Тем не менее на высоких частотах диффузор колеблется как мембрана, т. е. с изгибом его поверхности: волны изгиба двигаются от центра к периферии и обратно, создавая стоячие волны по радиусам диффузора. Для больших диаметров диффузора (около 25 см) эти колебания начинают появляться на частотах выше 1500 Гц, для меньших размеров — соответственно на более высоких частотах. Это приводит к тому, что величины излучающей поверхности, массы и гибкости подвижной системы резко изменяются при небольшом изменении частоты вынужденных колебаний диффузора. Поэтому механическую колебательную систему следует рассматривать отдельно: для низких и средних частот как простую систему с сосредоточенными постоянными и для высоких — как систему с распределенными параметрами.

Входное электрическое сопротивление громкоговорителя определяется суммой собственного сопротивления катушки $z_{\text{э}}$ и вносимого $z_{\text{вн}}$, т. е.

$$z_{\text{вх}} = z_{\text{э}} + z_{\text{вн}}. \quad (6.14)$$

Собственное сопротивление динамического громкоговорителя состоит из активного сопротивления $R_{\text{э}}$ катушки и небольшой ее индуктивности $L_{\text{э}}$. Вносимое сопротивление определяется полным механическим сопротивлением $z_{\text{м}}$ [см. (4.8б)] и коэффициентом электромеханиче-

ской связи $K_{св} = Bl$ [см. (4.10)]. На рис. 6.5а приведена аналоговая схема для данного случая, из которой следует, что вносимое сопротивление (4.8б)

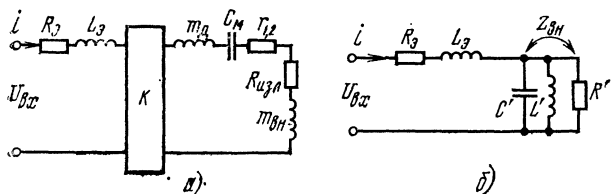


Рис. 6.5. Схемы входного сопротивления громкоговорителя: а) электрическая с аналоговой механической схемой; б) эквивалентная электрическая схема

$$z_{вн} = B^2 l^2 / z_{м} = B^2 l^2 / \left(r_{м} + i \omega m + \frac{1}{i \omega C_{м}} \right). \quad (6.15)$$

Это сопротивление можно представить в виде электрического эквивалента. Напишем выражение для вносимой электрической проводимости:

$$\frac{1}{z_{вн}} = Y_{вн} = \frac{r_{м}}{B^2 l^2} + \frac{i \omega m}{B^2 l^2} + \frac{1}{i \omega C_{м} B^2 l^2}.$$

В соответствии с характером частотной зависимости сделаем следующие замены:

$$R' = B^2 l^2 / r_{м}; \quad C' = m / B^2 l^2 \text{ и } L' = C_{м} B^2 l^2. \quad (6.16)$$

После этого получим, что общая проводимость эквивалентной цепи равна сумме проводимостей

$$Y_{вн} = \frac{1}{R'} + i \omega C' + \frac{1}{i \omega L'}.$$

Это означает, что все три электрические проводимости должны быть включены параллельно (рис. 6.5б). Интересно отметить, что в эквивалентной схеме инерционное сопротивление имеет емкостный эквивалент, а упругое сопротивление — индуктивный¹⁾ (нельзя путать этот эквивалент с аналогом).

Механическая колебательная система имеет резонансную частоту $\omega_{м} = 1 / \sqrt{m C_{м}} = 1 / \sqrt{L' C'}$. Эту частоту называют частотой механического резонанса. Из этого сле-

¹⁾ Здесь наблюдается такое же явление, как и в электрических связанных контурах при замене вторичного контура эквивалентным сопротивлением в первичном контуре: индуктивное сопротивление превращается в емкостное, а емкостное — в индуктивное.

дует, что и эквивалентный контур из L' и C' имеет ту же резонансную частоту. На этой частоте входное сопротивление громкоговорителя имеет максимум, определяемый суммой активных сопротивлений катушки и вносимого активного сопротивления

$$R_{\text{вх. макс}} = R_3 + B^2 l^2 / r_m. \quad (6.17)$$

На частотах ниже частоты механического резонанса входное сопротивление падает до активного сопротивления катушки, а на частотах выше (в диапазоне частот 150—400 Гц) достигает минимума, в основном обусловленного последовательным резонансом: индуктивностью L_3 и эквивалентной емкостью C' во вносимом сопротивлении.

Соответствующую частоту резонанса

$$\omega_{\text{э.м}} \approx 1/\sqrt{L_3 C'} \quad (6.18)$$

называют частотой электромеханического резонанса. Выше частоты $\omega_{\text{э.м}}$ входное сопротивление определяется только собственным сопротивлением катушки Z_3 и поэтому растет с увеличением частоты из-за ее индуктивного сопротивления. На рис. 6.6 приведена типовая частотная зависимость входного сопротивления.

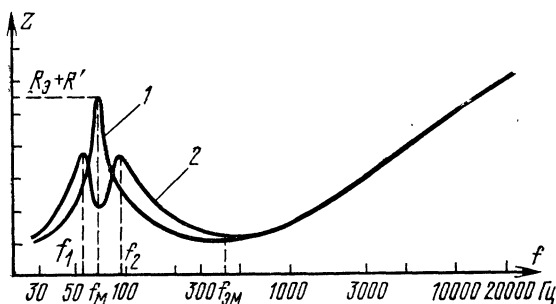


Рис. 6.6. Частотная зависимость модуля входного сопротивления громкоговорителя:

1 — без инвертора; 2 — с инвертором

Диффузорный громкоговоритель обычно устанавливают в ящике или плоском экране, называемыми акустическим оформлением. Ящики применяются с открытой и закрытой задней стенкой (см. рис. 6.2 б, в). Иногда заднюю стенку делают перфорированной, затянутой тка-

нюю или без нее. Для ящика с закрытой задней стенкой диффузор является излучателем нулевого порядка с теми оговорками, которые были сделаны для поршневых излучателей в бесконечном экране (см. § 6.2). **Заметим**, что излучение лицевой стороны диффузора в случае закрытой задней стенки происходит во всю сферу, а не в ее половину, как это получается в случае поршневой диафрагмы, находящейся в плоском бесконечном экране. Поэтому зависимость сопротивления излучения, приведенная на рис. 6.2а (кривая 3), несколько отличается от характеристики для бесконечного экрана (кривая 2).

Следует еще указать на то, что объем ящика с закрытой задней стенкой на низких частотах представляет собой упругостное сопротивление¹⁾, а на средних — является резонатором. Собственные частоты таких резонаторов обычно лежат в области 500—1000 Гц.

Чтобы избежать влияния резонансов объема ящика, стенки его покрывают внутри звукопоглощающим материалом (см. *П* на рис. 6.2б). Однако полностью устранить влияние резонансов не удастся, особенно на низких частотах (см. § 11.2), так как коэффициенты звукопоглощения тонких слоев материала малы, а толстые слои не входят в ящик.

Кроме того, сами стенки ящика также могут колебаться под действием звуковых волн, излучаемых диффузором, что приводит к усложнению картины звукового поля, создаваемого диффузорным громкоговорителем. При этом на определенных частотах стенки ящика резонируют и тем самым вносят большие частотнозависимые изменения в сопротивление излучения громкоговорителя.

Для ящика с открытой задней стенкой (а также для громкоговорителей без оформления) диффузор является излучателем первого порядка, если длина волны значительно больше размеров ящика (или самого громкоговорителя, если он используется без оформления), т. е. на низких частотах. Соответственно этому на низких частотах при $d/\lambda \ll 1$ излучение близко к нулю (см. на рис. 6.2а, кривая 4). С увеличением частоты, когда длина волны становится примерно равной удвоенной

¹⁾ Упругость воздуха в ящике добавляется к упругости механической колебательной системы и приводит к повышению собственной частоты подвижной системы громкоговорителя.

длине пути звуковых лучей вокруг стенок ящика от лицевой стороны диффузора до тыльной, наблюдается сложение излучений, а при удвоении частоты — полная компенсация их (излучение от тыльной стороны диафрагмы имеет противоположный знак по отношению к фронтальному). При дальнейшем повышении частоты снова наблюдается сложение колебаний. На более высоких частотах эффект дифракции становится уже небольшим, и излучение будет происходить независимо во фронтальную и тыльную полусферы, т. е. излучатель может считаться излучателем нулевого порядка. Чтобы не было резкой компенсации излучения при длине волны, равной длине пути вокруг экрана, громкоговоритель располагают несимметрично по отношению к передней стенке ящика.

Если вместо сплошной задней стенки применена, например, перфорированная стенка с определенным акустическим сопротивлением, звуковые волны, излучаемые обратной (тыльной) стороной диафрагмы, дополнительно сдвигаются по фазе. В результате этого компенсация фронтального и тыльного излучений получается на более низкой частоте, чем при открытой задней стенке.

Определим чувствительность громкоговорителя (6.8). Из ф-лы (6.12) следует, что акустическая чувствительность $p_1/v_M = \rho c \sqrt{\Omega S_M K_{1изл}}/4\pi$.

Согласно определению (6.8) механическая чувствительность

$$v_M/F = 1/Z_M = 1/\sqrt{r_M^2 + (\omega m - 1/\omega C_M)^2}$$

Для электродинамического громкоговорителя коэффициент electromеханической связи (4.10) $F/i = Bl = K_{св}$, а электрическая характеристика (6.14) и (6.15)

$$i/U = 1/Z_{вх} = 1/|z_э + z_{вн}| = 1/|z_э + (B^2 l^2/z_M)|$$

Из этих выражений находим осевую чувствительность громкоговорителя по напряжению (6.8):

$$E_{ос} = \frac{p_1}{U} = \frac{\rho c Bl}{Z_M Z_{вх}} \sqrt{\frac{\Omega S_M K_{1изл}}{4\pi}} = \frac{\rho c Bl}{|z_M z_э + B^2 l^2|} \sqrt{\frac{\Omega S_M K_{1изл}}{4\pi}}$$

Для средних частот и низких, выше частоты механического резонанса, эта чувствительность

$$E_{с.ч} = \frac{p_1}{U} = \frac{\rho c Bl}{\omega m R_э} \sqrt{\frac{\Omega S_M K_{1изл}}{4\pi}}$$

так как $z_э \approx R_э$, $z_M \approx \omega m$ и $B^2 l^2 < \omega m R_э$.

Как видим, эта чувствительность определяется массой подвижной системы, индукцией в зазоре и акустической чувствительностью (6.12). Последняя для излучателей нулевого порядка почти пропорциональна частоте (см. § 6.2), поэтому чувствительность громкоговорителя на средних частотах не зависит от частоты. Если электрическое сопротивление задано, то чувствительность громкоговорителя можно повысить при одновременном увеличении длины и поперечного сечения провода, т. е. путем увеличения объема провода. А это повлечет за собой увеличение зазора, что снизит индукцию в нем. Ее можно увеличить, применив более эффективные магнитные материалы и увеличив объем, что имеет свои границы. Таким образом, налицо противоречие, разрешить которое можно компромиссным путем. Во всяком случае следует уменьшать массу второстепенных деталей и хорошо использовать объем зазора. Для этого применяют провод с прямоугольным сечением, бескаркасную намотку катушки.

На частоте механического резонанса ω_M [см. (6.17)] $z_M = r_M$ и $z_g = R_g$, а при условии согласования сопротивлений механической и электрической цепи $R_g = B^2 l^2 / r_M$. А так как на низких частотах коэффициент концентрации Ω близок к единице, то на частоте механического резонанса чувствительность громкоговорителя

$$E_{p,ч} = \frac{p_1}{U} = \frac{\rho c B l}{2 r_M R_g} \sqrt{\frac{S K_{1изл}}{4\pi}}.$$

Следовательно, отношение чувствительностей на средней и резонансной частотах

$$E_{с.ч} / E_{p,ч} = 2 r_M / \omega_M m = 2/D,$$

так как $K_{1изл}(\omega) \Omega(\omega) / K_{1изл}(\omega_M) \approx \omega^2 / \omega_M^2$,

где D — добротность всей колебательной системы. При соответствующем подборе добротности механической системы ($D = 2 \div 1$) можно получить чувствительность на резонансной частоте, близкую к чувствительности на средних частотах. При таком условии частотная характеристика громкоговорителя будет иметь небольшую неравномерность в диапазоне от частоты механического резонанса до частот, на которых диффузор начинает колебаться как мембрана. Ниже частоты механического

резонанса чувствительность резко падает¹⁾. Поскольку чувствительность зависит от массы подвижной системы, снижать частоту механического резонанса (4.2) можно только увеличением гибкости системы. Частоту снижают до тех пор, пока подвижная система не начнет терять устойчивость и не возникнет опасность появления перекосов катушки и задевания ее за стенки зазора. Практически для широкополосных громкоговорителей не удастся снизить частоту механического резонанса ниже 60—70 Гц. Следовательно, нижняя граница передаваемого диапазона частот не получается ниже 50—60 Гц, а в большинстве случаев она не ниже 70—80 Гц (рис. 6.7).

Частоту, выше которой диффузор колеблется как мембрана, можно повысить (при сохранении его массы и тех же размеров) путем придания ему большей жесткости. Это делают путем утолщения стенок диффузора с уменьшением их толщины к периферии. Одновременно с этим уменьшают плотность материала, например, делают его пористым (без сквозных пор). Применяется различная пропитка материала диффузора.

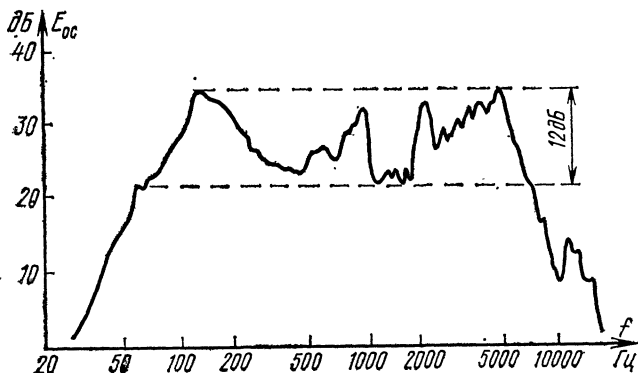


Рис. 6.7. Частотная характеристика диффузорного громкоговорителя 4ГД8Е в экране

¹⁾ Иногда делают добротность $D=0,5$, что соответствует критическо-апериодическому режиму колебательной системы громкоговорителя — отсутствию свободных колебаний этой системы. Правда, в этом случае неравномерность частотной характеристики на резонансной частоте доходит до —12 дБ. Но в виду плавности спада характеристики в сторону низких частот можно легко скомпенсировать это западание в электрической цепи.

В диапазоне частот, в котором диффузор колеблется как мембрана, частотная характеристика получается очень изрезанной (см. рис. 6.7). Но так как слух человека из-за достаточно широких критических полосок слуха (см. § 2.2) сглаживает частотную характеристику, то не все пики и провалы заметны на слух. Частотная зависимость осевой чувствительности громкоговорителя (без учета резких пиков и провалов) близка к равномерной до частот примерно 6000—7000 Гц (см. рис. 6.7). Это объясняется тем, что с увеличением частоты перестает колебаться внешняя часть диффузора и масса его резко уменьшается. Особенно это заметно при использовании диффузора с криволинейной формой образующей. Правда, при этом уменьшается и излучающая поверхность, но в меньшей степени. Выше 7000—8000 Гц частотная характеристика круто падает. Все это относится к несоставным громкоговорителям, рассчитанным для работы в широком частотном диапазоне.

Повысить верхнюю границу частотного диапазона до 10—12 кГц можно, например, кольцевой гофрировкой диффузора. При этом с увеличением частоты перестают колебаться один за другим внешние участки диффузора, одновременно уменьшается возможность колебания его как мембраны. Другой способ — применение дополнительного конуса, который вставляется внутрь диффузора (рис. 6.8). В этом случае на высоких частотах

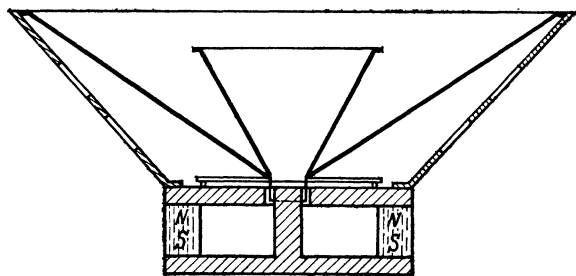


Рис. 6.8. Громкоговоритель с дополнительным конусом

основной диффузор перестает работать из-за относительно гибкого соединения его с звуковой катушкой, а в работу включается малый диффузор, достаточно жесткий и легкий.

Чувствительность громкоговорителя на высоких частотах можно повысить, уменьшая индуктивность звуковой катушки, например, с помощью токов Фуко, что уменьшает ее электрическое сопротивление и приводит к увеличению тока. Для этого на kern надевают насадку в виде медного колпачка с разрезом.

На низких частотах чувствительность громкоговорителя повышают с помощью фазоинвертора. Фазоинвертор (рис. 6.9) представляет собой ящик 1 (в котором расположен громкоговоритель 2) с отверстием 3 в передней стенке. Через это отверстие выходит наружу излучение с тыльной стороны излучателя.

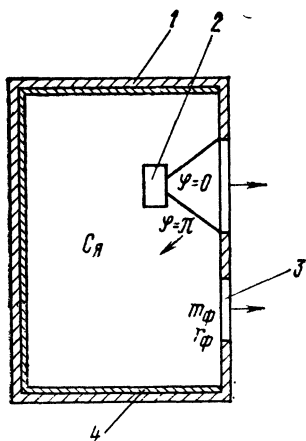


Рис. 6.9. Громкоговоритель с фазоинвертором:

1 — ящик; 2 — громкоговоритель; 3 — отверстие инвертора; 4 — внутренняя обивка поглощающим материалом

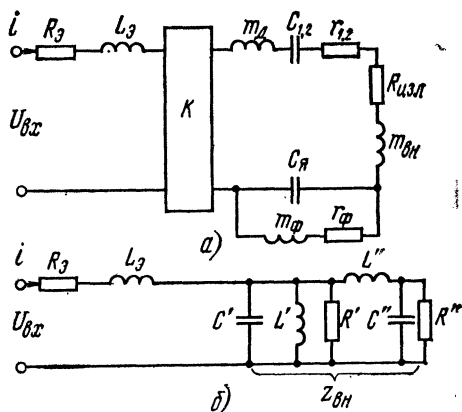


Рис. 6.10. Схема входного сопротивления громкоговорителя с инвертором:

а) электрическая с аналоговой механической; б) эквивалентная схема

Отверстие и объем ящика представляют собой резонатор с параллельным соединением гибкости ящика $C_я$ с массой $m_ф$ и активным сопротивлением $r_ф$ (рис. 6.10а), соответствующих отверстию (эта масса равна массе воздуха в отверстии с добавлением соколеблющейся массы окружающей среды; активное сопротивление включает в себя потери на трение о стенки отверстия и его сопротивление излучения). Частоту такого резонатора подбирают равной частоте механического резонанса подвижной системы ω_m (без учета гибкости объема

воздуха в ящике $C_{я}$, которая уже входит в систему резонатора). В результате получаем механическую систему, состоящую из двух резонансных систем (рис. 6.10а) с последовательным резонансом ($m_{д} + m_{вн}$); $C_{1,2}$; ($r_{1,2} + R_{изл}$) и параллельным $C_{я}$, $m_{ф}$, $r_{ф}$ (последний имеет вид фильтра-пробки). На рис. 6.10б дана эквивалентная схема, приведенная к электрическому входу громкоговорителя. При сравнении этой схемы со схемой рис. 6.5б видим, что появилось дополнительное звено $L'' = B^2 l^2 C_{я}$; $C'' = m_{ф} / B^2 l^2$ и $R''_{ф} = B^2 l^2 / r_{ф}$. Поэтому входное сопротивление громкоговорителя будет иметь провал на частоте механического резонанса и два максимума ниже и выше его (см. рис. 6.6, кривая 2).

Нижний резонанс получается на частоте $f_1 < f_M$ и определяется гибкостью подвижной системы C_{12} и массой $m_{ф}$, верхний $f_2 > f_M$ — всей массой подвижной системы m и гибкостью объема воздуха в ящике $C_{я}$. Поскольку резонансная частота подвижной системы f_M снизилась, так как в нее уже не входит гибкость $C_{я}$ [см. (4.1) и рис. 6.10а], то нижняя граница передаваемого диапазона тем самым тоже снизилась. Появление резонанса на частоте f_1 , лежащей ниже частоты резонанса подвижной системы, еще несколько сдвигает нижнюю границу передаваемого диапазона. Кроме того, на частоте резонанса f_2 скорость колебаний в цепи $m_{ф}$, $r_{ф}$, т. е. в отверстии ящика, будет находиться в фазе со скоростью колебаний лицевой поверхности диффузора, так как инвертор поворачивает фазу на 180° , а фазы волн, излучаемых лицевой и тыльной поверхностями диффузора отличаются на 180° . В результате этого тыльное излучение диффузора добавляется к лицевому излучению. На частоте механического резонанса инвертор поворачивает фазу только на 90° , поэтому тыльное излучение добавляется к лицевому в меньшей степени, а на частоте f_1 уже никакой добавки нет. Поэтому фазоинвертор повышает чувствительность громкоговорителя преимущественно на частотах выше частоты механического резонанса.

Характеристика направленности одиночных диффузорных громкоговорителей целиком определяется характеристиками излучателей поршневого типа нулевого или первого порядка в зависимости от размеров экрана или ящика, в котором помещается громкоговоритель. Коэффициент концентрации больших диффузор-

ных громкоговорителей не превышает четырех на частотах от 1000 до 2000 Гц. Заметим для сравнения, что для миниатюрных громкоговорителей (с диаметром диффузора не более 10 см) такой коэффициент концентрации получается только на частотах около 4000 Гц.

Диффузорные громкоговорители выпускают на мощность от 0,1 до 25 Вт и больше. Громкоговорители, используемые для непосредственного действия, имеют мощность до 3 Вт.

У диффузорных громкоговорителей КПД мал из-за несогласованности сопротивления механической системы и акустического сопротивления воздуха. Недостаточно высок и КПД электромеханического преобразователя, так как у него мал коэффициент электромеханической связи. В результате этого диффузорные громкоговорители имеют стандартное звуковое давление в пределах 0,2—0,3 Па. В соответствии с (6.7а) для коэффициента концентрации, равного четырем, получаем $\eta = 0,3 (0,2 \div 0,3)^2 100/4 = 0,3 \div 0,7\%$.

Нелинейные искажения в диффузорных громкоговорителях в основном создаются из-за нелинейности механической системы в центрирующей шайбе и подвесе диффузора и из-за неравномерного распределения индукции в зазоре. Первая причина обусловлена тем, что при больших амплитудах колебаний диффузора величина изгиба центрирующей шайбы и подвеса диффузора нелинейно связана с силой, действующей на них. Вторая причина также сказывается при больших амплитудах колебаний диффузора, так как при этом звуковая катушка выходит за пределы равномерного магнитного поля в зазоре (см. [2], § 6.7). При одинаковой излучаемой мощности амплитуда скорости колебаний диффузора растет с уменьшением частоты до резонанса, около частоты которого она достигает максимального значения. Дело в том, что излучаемая мощность определяется произведением квадрата скорости колебаний на сопротивление излучения (6.10). Последнее уменьшается с уменьшением частоты. А так как амплитуды скорости колебаний v_m и смещения x_m связаны соотношением $v_m = \omega x_m$, то амплитуда колебаний звуковой катушки резко возрастает с уменьшением частоты вплоть до резонанса. Ниже частоты резонанса амплитуда резко падает. Коэффициент нелинейных искажений на частотах около 100 Гц доходит до 10 и более процентов. Для его

уменьшения применяют центрирующие шайбы, имеющие сложную конфигурацию и выполненные из специальных материалов, гофрированные подвесы, а также полюсные наконечники такой формы, при которой создается более равномерное поле в зазоре. Для маломощных громкоговорителей высоту звуковой катушки делают больше высоты зазора, вследствие чего число пересекаемых силовых линий не зависит от амплитуды колебаний, что, правда, приводит к снижению КПД, но для таких громкоговорителей это не играет роли.

Следует еще сказать о возможности появления субгармонических искажений, в результате которых создаются составляющие с частотами, равными половине частоты колебаний диффузора, т. е. субгармоники. Эти субгармоники создаются в тех случаях, когда образующая диффузора прямолинейна, т. е. когда диффузор имеет коническую форму. Чтобы уменьшить возможность возникновения субгармоник, образующей диффузора придают криволинейную форму.

Внутреннее сопротивление громкоговорителей обычно составляет несколько ом. Для его согласования с сопротивлением приемника, трансляционной линии и т. п. применяют трансформаторы. При этом входное сопротивление громкоговорителей с трансформатором определяется номинальным напряжением источника мощности и номинальной мощностью громкоговорителя $Z_{вх} = U^2_{ном} / P_{ном}$.

К диффузорным громкоговорителям электродинамического типа можно отнести также и электродинамические ленточные громкоговорители. В настоящее время находятся в разработке ленточные громкоговорители высокочастотного типа, рассчитанные на диапазон частот от 2 до 30 кГц. По конструкции они сходны с ленточным микрофоном, но имеют бóльшую поверхность излучателя (ленточки).

6.4. ГРУППОВЫЕ ИЗЛУЧАТЕЛИ И ГРОМКОГОВОРИТЕЛИ

Для получения острых характеристик направленности и для повышения мощности применяют групповые излучатели, составленные, как правило, из однородных громкоговорителей. К ним относятся звуковые колонки, радиальные громкоговорители и звуковые люстры.

Звуковые колонки состоят из нескольких диффузорных громкоговорителей (от трех до восьми штук), поставленных один над другим (в виде колонны) (рис. 6.11а). В удаленной точке на оси группового излучателя звуковые давления от каждого из n сферических излучателей суммируются арифметически. В плоскости, проходящей через оси излучателей на том же расстоянии от группового излучателя, но под углом θ к оси, звуковые давления будут суммироваться с учетом разности хода звуковых волн от каждого излучателя:

$$p_{\theta} = p_a + p_b + p_c + \dots + p_n = \frac{p_1}{r} \sum_{(k)} \sin \left[\omega \left(t - \frac{r}{c} \right) - k \Delta\varphi \right],$$

где $\Delta\varphi = \frac{2\pi d}{\lambda} \sin \theta$ — сдвиг фаз между звуковыми давлениями, создаваемыми соседними излучателями, находящимися на расстоянии d друг от друга.

После суммирования получаем

$$p_{m\Sigma} = \frac{p_1}{r} \frac{\sin nx}{n \sin x},$$

где $x = \frac{\pi d}{\lambda} \sin \theta$.

Из этих данных получим выражение для характеристики направленности излучателя, составленного из n излучателей:

$$R(\theta) = \frac{p_{\theta}}{p_{oc}} = \frac{\sin nx}{n \sin x}$$

(при $n = 2$; $R(\theta) = \frac{\sin 2x}{2 \sin x} = \cos x$ [см. (6.13)]).

При большом числе элементарных излучателей (см. § 6.2), $n \rightarrow \infty$; $d \rightarrow 0$; $nd = l$) из предыдущей формулы получаем

$$R(\theta) = \frac{\sin x_l}{x_l},$$

где $x_l = \frac{\pi l}{\lambda} \sin \theta$.

При увеличении размеров излучателя направленность его увеличивается соответственно отношению l/λ .

Таким же образом можем получить характеристику направленности для группового излучателя длиной l и шириной b :

$$R(\theta) = \frac{\sin x_l \sin x_b}{x_l x_b}, \quad (6.19)$$

где $x_b = \frac{\pi b}{\lambda} \sin \theta_b$.

Из этой формулы следует, что звуковые колонки имеют характеристику направленности, значительно заостренную в продольной плоскости из-за большой величины l/λ . В поперечной плоскости эта характеристика определяется направленностью одного громкоговорителя. Для уменьшения излучения вверх, что не нужно при озвучивании наземной поверхности, колонки ставят вертикально. Из-за этого продольную плоскость часто называют вертикальной, а поперечную — горизонтальной. На практике колонки устанавливают и по-другому.

В некоторых типах звуковых колонок громкоговорители ставят в два столбца с разворачиванием осей под углом 60° (рис. 6.11а). Это делается для расширения угла излучения в поперечной плоскости, т. е. для увеличения ширины озвучиваемой поверхности, так как такие колонки в этой плоскости имеют направленность, почти не зависящую от частоты, и с углом излучения до 90° . На рис. 6.11б приведены характеристики направленности звуковых колонок типа КЗ-100.

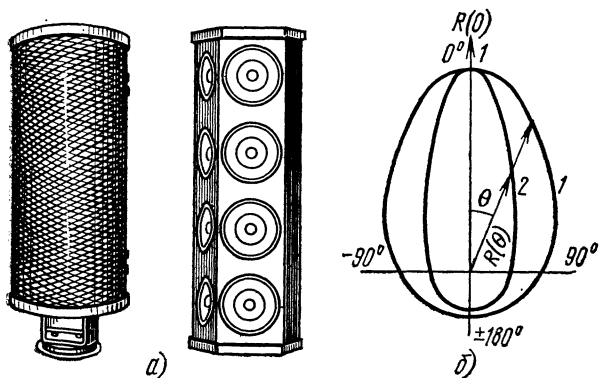


Рис. 6.11. Звуковые колонки:

а) звуковая колонка 25КЗ-2; б) диаграммы направленности звуковой колонки в поперечной 1 и продольной 2 плоскостях

Иногда звуковые колонки ставят одну на другую. При этом направленность составной колонки увеличивается

ется в продольной плоскости. В этом случае надо помнить о том, что зона интерференции в ближнем поле соответственно увеличивается вдвое (см. § 6.2).

Частотные характеристики звуковых колонок имеют большую равномерность, чем характеристики входящих в нее отдельных громкоговорителей. Это получается, во-первых, потому, что не может быть громкоговорителей, имеющих совершенно одинаковые частотные характеристики (есть много факторов разброса характеристик). Вследствие этого при совместном действии громкоговорителей происходит усреднение характеристик, т. е. сглаживание их неравномерностей. Особенно это относится к области частот выше 1000 Гц, где наблюдается много максимумов и минимумов характеристики. Во-вторых, на низких частотах из-за взаимодействия громкоговорителей, находящихся на расстояниях, значительно меньших длины волны, излучение увеличивается, так как оно пропорционально квадрату размеров излучателя (6.11) и нижняя граница передаваемого частотного диапазона снижается. Вследствие этих причин частотный диапазон колонок расширяется по сравнению с частотным диапазоном входящих в нее громкоговорителей и составляет 80—10 000 Гц с неравномерностью не более 12 дБ. В СССР звуковые колонки выпускают мощностью от 0,5 до 100 Вт. Высота мощных колонок (от 25 Вт и более) доходит до 1,5 м. В результате этого коэффициент концентрации мощных звуковых колонок доходит до 16 при наличии разворота громкоговорителей на 60° и до 25 — без него.

Радиальные громкоговорители состоят из нескольких диффузорных громкоговорителей, расположенных по окружности. Оси громкоговорителей наклонены вниз под углом около 45° (рис. 6.12а). Обычно таких громкоговорителей берут от четырех до шести и получают ненаправленное излучение в горизонтальной плоскости. В нижней части радиального громкоговорителя располагают отражатель, уменьшающий излучение вниз по вертикали. Вверх такой громкоговоритель почти не излучает. Наибольшая чувствительность у него получается при излучении вниз под углом $60\text{—}80^\circ$ к вертикали (см. рис. 6.12б). Это сделано потому, что высота установки радиального громкоговорителя не превышает 6—7 м, а радиус действия составляет около 15—20 м.

В СССР выпускаются радиальные громкоговорители на мощность 10 и 25 Вт.

Звуковые люстры состоят как из диффузорных громкоговорителей, так и из звуковых колонок, располагаемых по окружности. По характеристикам направленности звуковые люстры сходны с радиальными громкоговорителями.

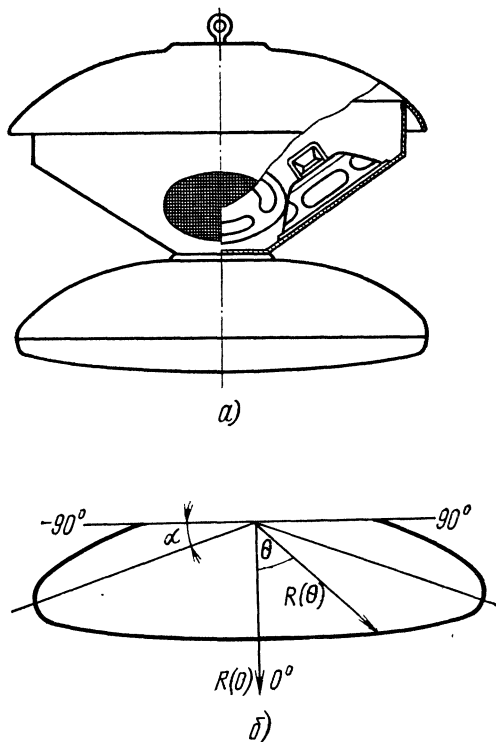


Рис. 6.12. Радиальный громкоговоритель:
 а) громкоговоритель 10ГДН; б) его характеристика направленности в вертикальной плоскости

Для групповых излучателей на средних и высоких частотах КПД равен КПД одиночных диффузорных громкоговорителей, входящих в их состав, так как их взаимодействие на этих частотах невелико (расстояния между ними превышают длину волны). На низких частотах КПД несколько повышается соответственно повышению чувствительности групповых излучателей на этих частотах. Объяснить это можно так. Излучаемая мощность при длинах волн, превышающих размеры излучателя, пропорциональна квадрату его размеров, т. е.

при числе громкоговорителей, входящих в групповой излучатель, равном n , возрастает в n^2 раз. Коэффициент нелинейных искажений групповых излучателей такой же, как и у одиночных громкоговорителей, входящих в их состав.

Если громкоговорители в групповом излучателе соединить последовательно, то силы, действующие на механические системы излучателей, будут находиться в одной фазе. Излучаемые звуковые волны будут иметь сдвиг по фазе только из-за разницы фаз в их механических сопротивлениях. При соединении громкоговорителей параллельно фазы звуковых волн будут расходиться и из-за разности фаз в электрических сопротивлениях. Поэтому вероятность когерентного излучения уменьшается. При последовательном соединении громкоговорителей имеется другой недостаток — обрыв в одном из них ведет к потере работоспособности всего группового излучателя. Таким образом, обе эти системы практически равнозначны.

6.5. РУПОРНЫЕ ИЗЛУЧАТЕЛИ

Основным недостатком громкоговорителей непосредственного излучения является их чрезвычайно низкий КПД. Причиной этого является несогласованность сопротивлений механической системы и окружающей среды. Для увеличения сопротивления излучения следовало бы увеличивать размеры излучателя, но это влечет за собой увеличение механического сопротивления массы излучателя и не дает выигрыша в КПД. Так как диффузор выполняет две функции: функцию преобразования механических колебаний в акустические и функцию излучения этих колебаний в окружающую среду, то разрешить такое противоречие можно только путем разделения этих функций. Это разделение функций осуществляется в рупорных громкоговорителях. Рупор служит также для согласования сопротивлений механической системы и окружающей среды.

Рупором называют трубу с переменным сечением. Входное отверстие излучающего рупора (горло) меньше, чем выходное (устье). Выходное отверстие является излучателем, а входное — служит нагрузкой для механической системы. Таким образом, излучатель может быть сделан сколь угодно большим, а механическая система — небольшой и потому легкой.

Рупоры применяют с различным законом изменения их поперечного сечения. Наиболее распространенные рупоры — экспоненциальные, реже — конические. Для экспоненциального рупора поперечное сечение изменяется по следующему закону:

$$S_x = S_0 e^{\beta x}, \quad (6.20)$$

где β — показатель расширения рупора; S_0 — входное поперечное сечение; x — расстояние от входа рупора (рис. 6.13).

Сначала рассмотрим бесконечный рупор, т. е. рупор, у которого нет отражения волн от выходного конца. Для такого рупора входное сопротивление (см. [1], с. 173) $z_p = R_p + i X_p = \rho c S_0 \left[\sqrt{1 - (\omega_{кр}/\omega)^2} + i \frac{\omega_{кр}}{\omega} \right]$ где R_p — активная составляющая входного сопротивления рупора; X_p — реактивная составляющая его; c — скорость звука; $\omega_{кр}/2\pi = \beta c/4\pi = f_{кр}$ — так называемая критическая частота рупора.

Из рассмотрения частотной зависимости входного сопротивления экспоненциального рупора бесконечной длины (см. рис. 6.13, кривые 1, 2) следует, что активная составляющая сопротивления рупора для частот,

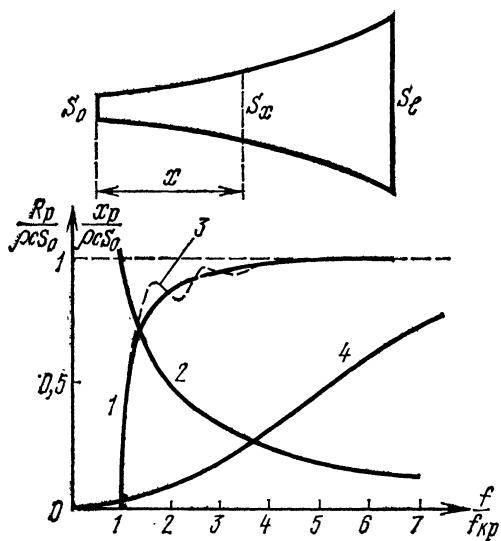


Рис. 6.13. Экспоненциальный рупор:

эскиз рупора и зависимость активной и реактивной составляющих входного сопротивления рупора от частоты (1 — активная составляющая для экспоненциального рупора бесконечной длины; 2 — реактивная составляющая для него же; 3 — активная составляющая для него же в случае конечной длины; 4 — активная составляющая входного сопротивления для конического рупора)

ниже критической, равна нулю, присутствует только реактивная составляющая. Это свидетельствует о том, что рупор на этих частотах не излучает энергию в окружающее пространство, а запасает и возвращает ее после окончания вынужденных колебаний в виде своих свободных колебаний в механическую систему. Реактивная составляющая имеет инерционный характер, т. е. представляет собой соколеблющуюся массу, вносимую в механическую систему. Эта составляющая на средних и высоких частотах ничтожно мала, а на низких — выше критической частоты в большинстве случаев ею можно пренебречь без внесения заметной ошибки, поэтому в дальнейшем не будем ее учитывать.

Выше критической частоты активная составляющая быстро нарастает до сопротивления, равного сопротивлению плоской волны, и далее остается постоянной. Закон ее изменения напоминает частотную характеристику фильтра ВЧ. Для сравнения на рис. 6.13 (кривая 4) приведена частотная зависимость входного сопротивления конического рупора, имеющая значительно менее крутой подъем к высоким частотам. В этом и заключается недостаток конического рупора по сравнению с экспоненциальным.

Критическая частота экспоненциального рупора тем выше, чем круче он расходится, поэтому для смещения нижней границы частотного диапазона вниз приходится применять рупоры с пологим расхождением.

В рупорах конечной длины из-за несогласованности сопротивлений рупора с окружающей средой возникают отражения звуковых волн от его устья. В рупоре возникают стоячие волны. А из-за этого частотная характеристика входного сопротивления рупора становится волнообразной (см. рис. 6.13, кривая 3), правда, только на низких частотах, на которых фронт излучаемой волны близок к сферическому. Для средних и высоких частот длины излучаемых волн оказываются больше размеров излучающего отверстия рупора, и потому фронт волны в конце рупора становится плоским и остается таким после выхода из него. Вследствие этого не происходит отражения волн от конца рупора. Так как размеры выходного отверстия для широкополосных громкоговорителей берут в пределах 0,6—1 м, то такое явление наблюдается, уже начиная с частоты $300\text{—}500$ Гц ($d=\lambda$).

Выходное отверстие рупора определяет и направленность его излучения. На рис. 6.3 были приведены характеристики направленности для поршневой диафрагмы в бесконечном экране при разных соотношениях d/λ . Оказывается, что эти соотношения почти полностью пригодны и для рупорного излучателя, если длины излучаемых волн меньше размеров выходного отверстия. В этом случае в отверстии рупора образуется волна по фронту, близкая к плоской. Следовательно, при размерах устья рупора в 0,6—1 м для частот выше 300—500 Гц можно пользоваться этими соотношениями. На низких частотах излучение из отверстия рупора будет менее направленным, чем у поршневой диафрагмы, так как из-за отсутствия экрана будет иметь место расхождение волн в угле 4π вместо 2π .

Длина рупора определяется из (6.20) отношением площадей входного и выходного отверстий рупора:

$$d = \frac{c}{4\pi f_{кр}} \ln \frac{S_1}{S_0} .$$

Если надо иметь острую направленность и низкую нижнюю границу передаваемого частотного диапазона, следует увеличивать выходное отверстие рупора и уменьшать критическую частоту, вследствие чего приходится брать рупор большой длины. Для этого рупор часто свертывают или складывают¹⁾ (рис. 6.14).

Коэффициент концентрации рупоров зависит от частоты. На средних частотах он доходит до 30—50. Такая высокая концентрация создает большое осевое звуковое давление, передающий рупор как бы усиливает звук. На самом деле он только концентрирует звуковую энергию в определенном направлении. Кроме того, вследствие согласованности сопротивлений рупора и окружающей среды, с одной стороны, и рупора и механической колебательной системы, с другой, излучаемая мощность при использовании рупора больше, чем без него. Наименьшая зависимость коэффициента концентрации от частоты получается, если выбрать параметры экспоненциального рупора с круглым выходным отверстием, удовлетворяющим следующему условию: $\lambda_{кр}/d = 3—3,5$, где $\lambda_{кр} = c/f_{кр} = 4\pi/\beta$, так как $f_{кр} = \beta c/2$;

¹⁾ Сравните эти данные с данными для духовых музыкальных инструментов: чем ниже регистр инструмента, тем длиннее его рупор.

d — диаметр выходного отверстия рупора. В этом случае коэффициент концентрации $\Omega=25$ в широком диапазоне частот.

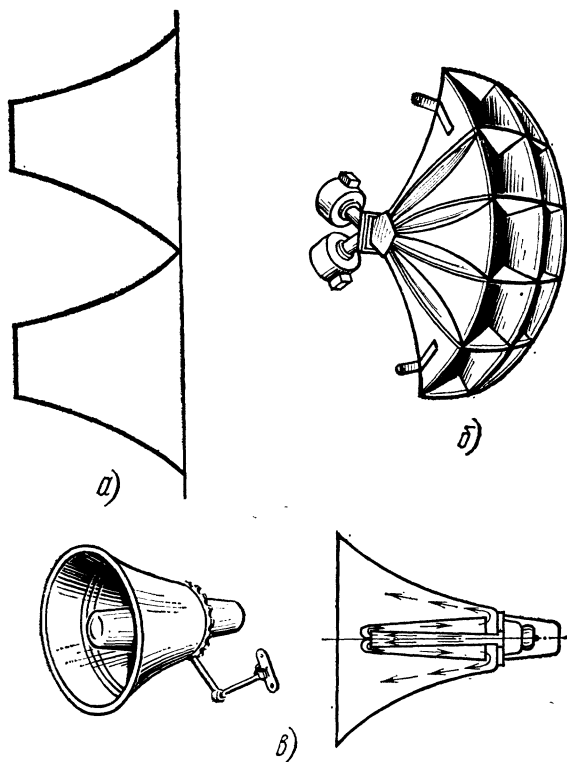


Рис. 6.14. Виды рупоров: а) сдвоенный рупор; б) секционированный рупор; в) сложенный рупор

Большое распространение получили рупоры с прямоугольным выходным отверстием. Такие рупоры имеют разную направленность во взаимно перпендикулярных плоскостях, проходящих через ось рупора, продольную и поперечную оси выходного отверстия. Направленность в каждой из этих плоскостей (продольной и поперечной) определяется отношениями размеров выходного отверстия с одной стороны и длиной волны с другой (6.19). Часто применяют сдвоенные круглые рупоры, т. е. два отдельных рупора со смежными выходными

ми отверстиями (см. рис. 6.14а). Такие рупоры могут приближенно рассматриваться как рупоры с прямоугольным выходным отверстием, имеющим поперечные размеры d и $2d$, где d — диаметр выходного отверстия рупора.

В тех случаях, когда надо иметь одинаковое излучение в пределах телесного угла около $\pi/2$, не зависящее от частоты, применяют секционированные рупоры (см. рис. 6.14б).

В заключение следует сказать, что для концентрации или рассеяния звуковых волн применяют акустические линзы, основанные на преломлении звуковых лучей при переходе из одной среды в другую с разными скоростями распространения (например, скорость распространения звуковых волн в пористых материалах или в решетках и жалюзи из пластин отличается от скорости распространения в открытом пространстве).

Кроме частотных искажений, рупор вносит нелинейные искажения, обусловленные большой величиной и резким изменением амплитуды звукового давления в пределах одной длины волны в горле рупора.

6.6. РУПОРНЫЕ ЭЛЕКТРОДИНАМИЧЕСКИЕ ГРОМКОГОВОРИТЕЛИ

Рупорные громкоговорители имеют два конструктивных варианта: узкогорлые и широкогорлые. Площадь входного отверстия рупора в узкогорлых громкоговорителях в несколько раз меньше площади поршневой диафрагмы, в широкогорлых — они или одинаковы или близки друг к другу.

В узкогорлых рупорных громкоговорителях, схематическое соединение головки которого с рупором дано на рис. 6.15а, применен понижающий акустический трансформатор для согласования входного сопротивления рупора с механическим сопротивлением диафрагмы. В качестве такого трансформатора (см. табл. 4.3, рис. 2) использована предрупорная камера 1 с коэффициентом трансформации, равным отношению площадей диафрагмы S_d и входного отверстия рупора S_0 , т. е. $n = S_d/S_0$ [см. (4.3)]. Вследствие этого входное сопротивление экспоненциального рупора, приведенное к диафрагме, будет увеличено в n^2 раз и составит

$$z_p^* = \rho c S_0 S_d^2 / S_0^2 = \rho c S_d^2 / S_0.$$

Определим условия получения равномерной частотной характеристики рупорного громкоговорителя. Входное сопротивление экспоненциального рупора практиче-

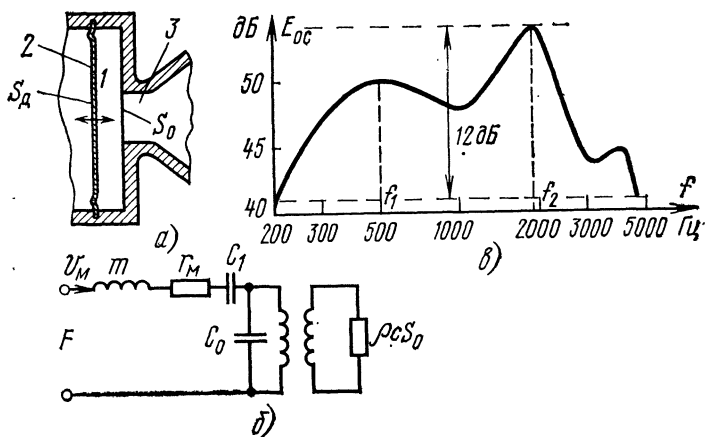


Рис. 6.15. К построению частотной характеристики рупорного громкоговорителя:

а) соединение головки громкоговорителя с рупором (1 — предрупорная камера, 2 — диафрагма громкоговорителя, 3 — входное отверстие рупора); б) аналоговая схема механоакустической системы; в) частотная характеристика чувствительности

ски не зависит от частоты для частот выше удвоенной критической. Коэффициент электромеханической связи $K_{св} = Bl$ — постоянная величина. Электрическая характеристика громкоговорителя $i/U = 1/Z_{вх}$ слабо зависит от частоты, как и у диффузорного громкоговорителя. Акустическая чувствительность (6.12)

$$p_1/v_0 = \rho c \sqrt{\Omega S_0 K_{изл}/4\pi},$$

где p_1 — звуковое давление, измеренное в удаленной зоне и пересчитанное на расстоянии 1 м от громкоговорителя; v_0 — скорость колебаний в горле рупора.

Из этого выражения следует, что чувствительность зависит от частоты только через коэффициент концентрации, изменяющийся в небольших пределах, так как для больших излучающих поверхностей $K_{изл} \approx 1$ (см. рис. 6.2а). Чтобы чувствительность электродинамического рупорного громкоговорителя [см. ф-лу (6.8)] практически не зависела от частоты, необходимо, чтобы и

механическая чувствительность $v_0/F = 1/Z_m$ также не зависела от частоты.

Механическая колебательная система — диафрагма — представляет собой простую колебательную систему с массой m (масса подвижной системы), гибкостью подвеса C_1 и активным сопротивлением потерь r_m из-за трения звуковой катушки о воздух в зазоре (рис. 6.15б). Гибкость объема воздуха в предрупорной камере C_0 соединена последовательно с гибкостью воротника диафрагмы C_1 , так как объем воздуха в предрупорной камере повышает упругость механической системы (см. табл. 4.2, рис. а). Из-за сжимаемости воздуха предрупорная камера шунтирует входное сопротивление рупора. В связи с этим в аналоговой схеме они соединены параллельно через акустический трансформатор (рис. 6.15б). Входное сопротивление рупора можно считать активным. При такой схеме коэффициент передачи от входа механической системы до рупора почти не зависит от частоты в пределах диапазона: от частоты механического резонанса подвижной системы $\omega_1 = 2\pi f_1 = 1/\sqrt{mC_1}$ до частоты последовательного резонанса между массой подвижной системы m и гибкостью предрупорной камеры C_0 (см. [1], с. 207—209) $\omega_2 = 2\pi f_2 = 1/\sqrt{mC_0}$. Частотная характеристика для такой схемы приведена на рис. 6.15в. Удастся получить достаточную равномерность характеристики (12—15 дБ) в диапазоне 200—4000 Гц.

Одной из причин ограничения частотного диапазона рупорного громкоговорителя является компенсация звуковых давлений в предрупорной камере вследствие того, что на частотах, длина волны которых близка к диаметру предрупорной камеры, наблюдается уменьшение звукового давления в горле рупора. Объясняется это тем, что звуковые волны, исходящие от периферии диафрагмы и от ее центральной части на частотах $f = c/2\Delta r$, где Δr близка к радиусу диафрагмы, оказываются в противофазе (разность хода Δr получается равной $0,5\lambda$). Для устранения этого явления применяют, например, противоинтерференционные вкладыши (рис. 6.16а и б), радиальные каналы (рис. 6.16в) и т. п. В этом случае разность хода звуковых волн уменьшается вдвое. При диаметре диафрагмы, равном 8,5 см, предельная частота будет не ниже 5000—6000 Гц. Так как такая ширина частотного диапазона вполне пригодна для переда-

чи речи и третьего класса качества художественных программ, то этот тип громкоговорителей используют преимущественно для этих и других второстепенных передач.

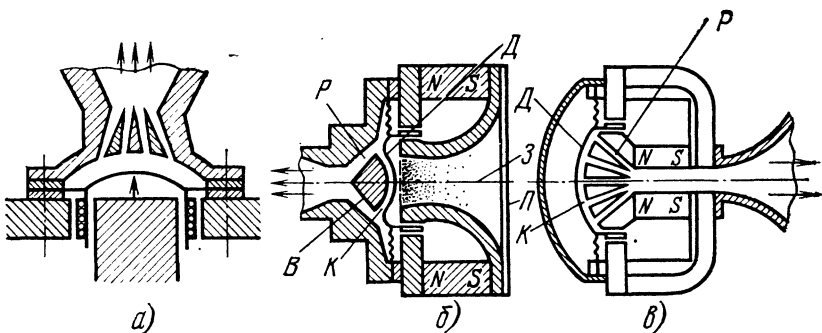


Рис. 6.16. Способы устранения интерференции в предрупорной канале;
 а) и б) противоинтерференционные вкладыши; в) радиальные каналы:

Р — канал, *В* — противоинтерференционный вкладыш, *К* — предрупорная камера, *Д* — диаграмма, *П* — перегородка, *З* — звукопоглощающий материал

В широкогорлых рупорных громкоговорителях в качестве головок используют диффузорные громкоговорители. Как правило, их применяют без предрупорной камеры, так как входное сопротивление рупора достаточно велико и мало отличается от механического сопротивления подвижной системы, что не требует согласующего трансформатора. Широкогорлый рупор получается коротким, даже при небольших показателях расширения, т. е. для низкой критической частоты, так как входное отверстие рупора достаточно велико. Громкоговорители с таким рупором передают более широкий частотный диапазон, чем узкогорлые. Он получается не уже 100—6000 Гц при той же неравномерности (~ 15 дБ). Кроме того, широкогорлые рупоры не вносят больших нелинейных искажений в передачу, так как коэффициент расхождения волны у них невелик. Широкогорлые громкоговорители электродинамического типа в СССР выпускают мощностью от 25 до 100 Вт.

У рупорных громкоговорителей получается КПД выше, чем у диффузорных, вследствие более лучшего согласования механического и акустического сопротивле-

ний. Так, например, рупорный громкоговоритель 100 ГРД-1 развивает номинальное звуковое давление¹⁾ в пересчете на 1 м, равное 48 Па, при номинальной электрической мощности в 100 Вт. Подставляя эти данные в (6.76) и учитывая, что коэффициент осевой концентрации Ω равен 25, получаем КПД $\eta = 4\pi \cdot 48^2 \cdot 100 / 412 \cdot 25 \cdot 100 = 2,68\%$.

При более высоком коэффициенте электромеханической связи можно получить КПД до 5—7%, например путем увеличения индукции в зазоре в 1,5 раза. Уменьшая массу подвижной системы, можно повысить КПД до 20%. Коэффициент нелинейных искажений в узкогорлых рупорных громкоговорителях в общей сложности получается не меньше, чем у диффузорных, так как искажения уменьшаются в механической системе и увеличиваются в рупоре. В широкогорлых рупорах они значительно меньше.

Коэффициент осевой концентрации рупорных громкоговорителей находится в пределах 25—50 и может быть повышен до 100 с помощью увеличения размеров устья рупора.

6.7. ЭЛЕКТРОСТАТИЧЕСКИЕ ГРОМКОГОВОРТЕЛИ

Конденсаторные громкоговорители. На рис. 6.17а приведена схематическая конструкция конденсаторного громкоговорителя. На ребристом полуцилиндре 1 с помощью винта 3 натянута тонкая металлическая фольга 2, с внутренней стороны облицованная диэлектриком, или полимерная пленка, покрытия металлом снаружи. Поверхности полуцилиндра и фольга служат электродами конденсатора. Между электродами приложено поляризующее напряжение U_0 . Если на эти электроды подать еще переменное напряжение U , то сила притяжения электродов $F \approx (U_0 + U)^2 S / 8\pi d^2$, где S — площадь электродов; d — расстояние между электродами.

При $U \ll U_0$ можно пренебречь квадратичной составляющей, и тогда переменная сила $F = CU_0U/d$, так как $C = S/4\pi d$. Следовательно, сила, действующая на гиб-

¹⁾ Измерять звуковое давление, развиваемое рупорным громкоговорителем на расстоянии 1 м, нельзя из-за неравномерности ближнего поля.

кий электрод, определяется градиентом поляризующего напряжения U_0/d , емкостью конденсатора C и переменным напряжением. В соответствии с принципом взаим-

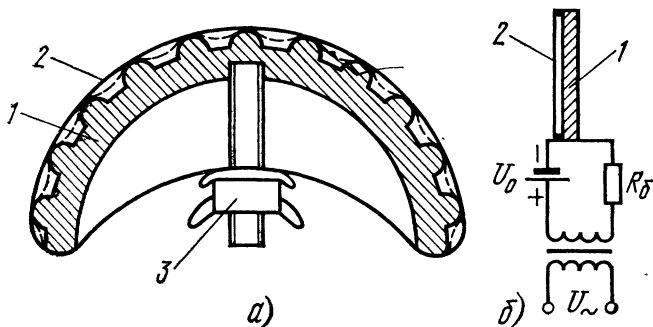


Рис. 6.17. Конденсаторный громкоговоритель:

а) конструкция; б) схема включения;

1 — массивный электрод; 2 — гибкий электрод с изоляцией; 3 — натягивающий винт

ности коэффициент электромеханической связи получается таким же, как и в случае конденсаторного микрофона (см. § 5.5):

$$K_{св} = \frac{F}{i} = \frac{CU_0UZ_{вх}}{Ud} \approx \frac{U_0}{\omega d}, \text{ так как } Z_{вх} = \frac{U}{i} \approx \frac{1}{\omega C},$$

т. е. коэффициент электромеханической связи обратно пропорционален частоте, а электрическая характеристика $i/U = \omega C$ прямо пропорциональна частоте. Поэтому они взаимно компенсируют друг друга.

Конденсаторный громкоговоритель используют, как правило, в качестве высокочастотного элемента акустических систем. Например, при внешних размерах 15×10 см и длине волны не более 8 см. (т. е. частоте 4250 Гц) такой громкоговоритель будет иметь сопротивление излучения, близкое к сопротивлению плоской волны, т. е. коэффициент излучения $K_{изл}$ (6.11) не будет зависеть от частоты, а акустическая чувствительность (6.12) из-за увеличения коэффициента концентрации будет медленно расти с увеличением частоты. Для получения частотнонезависимой чувствительности такого громкоговорителя [см. (6.8)] необходимо, чтобы его механическое сопротивление медленно росло с увеличением частоты. Если выбрать частоту резонанса ме-

ханической системы на нижней границе передаваемого диапазона частот, то выше ее механическое сопротивление (4.1) будет расти пропорционально частоте. Для частичной компенсации этого роста последовательно с громкоговорителем включают активное электрическое сопротивление R_6 (рис. 6.176), которое уменьшает падение напряжения на громкоговорителе с увеличением частоты, и, таким образом, его чувствительность становится не зависящей от частоты.

Градиент поляризирующего напряжения U_0/d ограничен электрической прочностью пленки, поэтому чувствительность громкоговорителя зависит только от размеров излучателя. Имеются громкоговорители конденсаторного типа и на широкий диапазон частот, но производство их очень дорого.

Электретные громкоговорители отличаются от конденсаторных только применением в них электретной пленки, заранее наэлектризованной. В остальной конструкции их, поведение и применение те же самые, что и для конденсаторных громкоговорителей. Промышленного производства этих громкоговорителей пока нет.

Пьезогромкоговорители. Действие таких громкоговорителей основано на пьезоэффекте. Если к пластинке из пьезокристалла приложить напряжение, то она будет деформироваться. При переменном напряжении пластинка будет испытывать переменную деформацию. При соответствующем срезе можно заставить пластинку изгибаться. Если при этом ее край связать с диффузором, то получится громкоговоритель непосредственного излучения. Коэффициент электромеханической связи для такого преобразователя получается таким же, как и в случае конденсаторного громкоговорителя, если коэффициент $K = U/a$ заменить на поляризационный коэффициент K_h (см. § 5.6). В остальном он сходен с конденсаторным громкоговорителем. Малая климатическая стойкость сегнетовой соли, низкая чувствительность пьезокерамики, большая неравномерность частотной характеристики, а также высокое входное сопротивление и большие нелинейные искажения помешали внедрению этого типа громкоговорителей в систему вещания и связи.

6.8. ГРОМКОГОВОРЯЩИЕ АКУСТИЧЕСКИЕ СИСТЕМЫ

Для работы в широком диапазоне передаваемых частот создают системы, составленные из нескольких громкоговорителей, каждый из которых передает сравнительно узкую полосу частот. При создании узкополосных

громкоговорителей с равномерной частотной характеристикой не возникает таких трудностей, с которыми сталкиваются при разработке широкодиапазонных громкоговорителей. Если, например, ограничить диапазон сверху частотой 3 кГц, то его нижнюю границу можно снизить до 30—40 Гц. Точно также, если ограничить диапазон снизу частотой 3000 Гц, то верхнюю границу удастся повысить до 15 кГц. Поэтому выпускаются двух- и трехполосные системы. Для двухполосных систем диапазон делят на частоте примерно от 300 до 500 Гц или от 2000 до 4000 Гц. А для трехполосных средняя полоса берется примерно от 400 до 4000 Гц. Подобные системы выпускают для радиовещательных устройств, причем для трехполосных берут один-два низкочастотных громкоговорителя, один или два среднечастотных и два-три высокочастотных. Такие же системы делают и для ряда радио- и телеприемников. Применение в системах большего числа высокочастотных громкоговорителей, чем низкочастотных, объясняется большей направленностью высокочастотных. Для получения одинакового излучения во все стороны оси высокочастотных громкоговорителей располагают в разных направлениях.

Для стереофонического воспроизведения применяют специальные разнесенные акустические системы, каждый из которых работает от своего канала. К этим громкоговорителям предъявляются сравнительно жесткие требования в отношении идентичности звучания.

Громкоговорящие системы комплектуют или из одних диффузорных громкоговорителей электродинамического, или электростатического типа (последние используются только как высокочастотные элементы), или из диффузорных низкочастотных и рупорных высокочастотных, или рупорных низкочастотных (обычно мощных, применяемых в кинотеатрах) и диффузорных высокочастотных. Существуют варианты узкогорлых рупорных громкоговорителей для отдельной передачи низкочастотного и высокочастотного диапазонов. Для низкочастотного диапазона применяют громкоговорители с очень длинным рупором (в виде улитки), имеющем большое выходное отверстие. Передаваемый им частотный диапазон находится в пределах 50—500 Гц. Высокочастотные рупорные громкоговорители имеют соответственно маленький рупор (длиной не более 20 см с диаметром выход-

ного отверстия не более 10 см). Передаваемый ими частотный диапазон находится в пределах 2000—15 000 Гц.

Для разделения частотных диапазонов применяют специальные схемы разделения. Одна из таких схем отличается независимостью входного сопротивления от частоты¹⁾ (рис. 6.18). Условия для этого следующие:

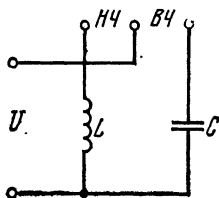


Рис. 6.18. Схема разделительного устройства НЧ и ВЧ громкоговорителей

$$R_{НЧ} = R_{ВЧ} = \sqrt{L/C} \text{ и}$$

$$\omega_0 = 1/\sqrt{LC} = 2\pi f_0,$$

где L — индуктивность, включаемая в разделительное устройство; C — емкость в нем; $R_{НЧ}$ и $R_{ВЧ}$ — сопротивления НЧ и ВЧ громкоговорителей; f_0 — частота разделения диапазонов (500 или 2000 Гц).

6.9. ПНЕВМАТИЧЕСКИЙ ГРОМКОГОВОРИТЕЛЬ

Пневматический громкоговоритель основан на принципе модуляции постоянного потока воздуха. Для его работы требуется компрессор, сжатый воздух из которого подводится к колеблющейся заслонке. Для приведения последней в колебательное состояние применяют возбудитель, например, в виде электродинамического преобразователя, подобного головке динамического громкоговорителя. Постоянный поток воздуха замыкается около громкоговорителя, а переменное давление в виде звуковых волн распространяется вдаль. Такой громкоговоритель требует небольшой мощности для управления возбудителем, т. е. более «дорогая» мощность, необходимая для возбуждения, требуется небольшая, а для работы компрессора расходуется более «дешевая» мощность. Громкоговоритель дает большие нелинейные искажения и пока не применяется, хотя он может быть использован для целей оповещения, так как с его помощью можно создать очень большие уровни.

Итак, для обеспечения высшего класса точности передачи художественных программ пригодны только системы. Для первого класса точности могут использоваться как одиночные динамические громкоговорители, так и звуковые колонки, реже применяются системы. Для второго класса точности передачи художественных программ и для речевых передач используются рупорные громкоговорители и одиночные диффузорные, иногда даже без всякого оформления.

¹⁾ Для высококачественных систем схема разделения частотных диапазонов гораздо сложнее.

Телефоны предназначены для работы непосредственно на объем слухового канала, поэтому его технические параметры несколько отличаются от параметров громкоговорителей.

Чувствительность телефона — отношение эффективных значений звукового давления, развиваемого телефоном в камере искусственного уха, к напряжению, приложенному к телефону. Камера искусственного уха представляет собой объем, соответствующий среднему объему слухового канала и ушной раковины (6 см^3) или только слухового канала (2 см^3) в зависимости от типа испытываемого телефона.

Отдача телефона — звуковое давление, развиваемое телефоном в камере искусственного уха, при подведении к нему стандартной мощности в 1 мВт через сопротивление, равное входному сопротивлению телефона на частоте 1000 Гц.

Кроме того, телефоны, как и громкоговорители, характеризуются следующими техническими параметрами: входным сопротивлением, нелинейными искажениями и частотной зависимостью отдачи или чувствительности телефона. Неравномерность частотной характеристики обычно принято определять по частотной зависимости отдачи телефона.

По принципу действия телефоны делятся на электромагнитные, электродинамические и электростатические.

Электромагнитные телефоны самые распространенные. Они применяются в радио- и проводной телефонной связи в системах индивидуального озвучивания, например, при синхронном переводе речей, при слушании в шумном зале, в слуховых аппаратах и т. п. (рис. 6.19а и 6.20а).

Электромагнитные телефоны выпускаются в двух конструктивных вариантах: внешние (рис. 6.20а) и втулочные (рис. 6.19а). Первые прикладывают к ушной раковине, вторые вставляют в нее или в слуховой канал. По типу магнитной цепи они делятся на цилиндрические и центральные. В цилиндрических (рис. 6.19б) применяется магнит кольцевого типа 1. Магнитный поток от него проходит через всю диафрагму 3 и зазор 5 в керн 2. На керне расположена одна катушка 6. Диафрагма имеет накладку 4 на центральной части во из-

бежание ее насыщения. В телефонах с центральным магнитом (рис. 6.206) магнитный поток от магнита 1 проходит через один сердечник 2 и зазор 8 в диафраг-

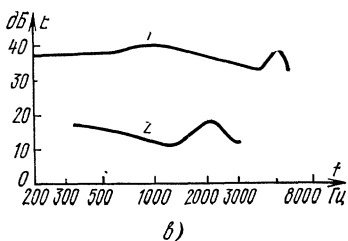
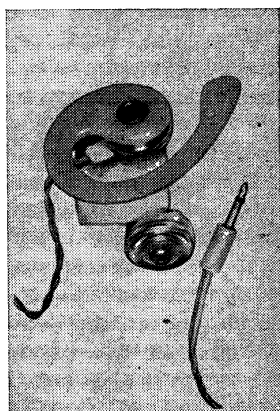
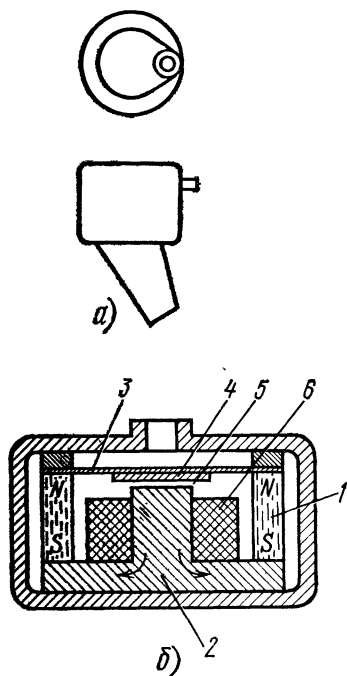


Рис. 6.19. Втулочные телефоны ТГ-9 и ТМ-4:
 а) общий вид ТГ-9 (слева) и ТМ-4 (справа); б) конструкция капсюля ТМ-4 (справа); в) частотная характеристика отдачи телефонов ТГ-9 (вверху) и ТМ-3 (внизу)

му 4 и возвращается в магнит через другой зазор и сердечник 2. Две катушки 3 (по одной на каждом сердечнике) соединены последовательно. Для повышения эффективности диафрагму делают поршневой, для чего ее края гофрируют.

Магнит изготовляют из сплавов алюминия и никеля с присадкой кобальта, а диафрагму и магнитопровод — из железоникелевых сплавов (пермаллой и пермендюр). Во втулочных телефонах типа ТГ-7, ТМ-4, ТМ-2

и ТМ-3 резонансную частоту диафрагмы выбирают около 2000 Гц, а типа ТГ-9 — около 5000 Гц, поэтому частотная характеристика отдачи этих телефонов равномерна до этой частоты и падает выше ее (см. рис. 6.19 в).

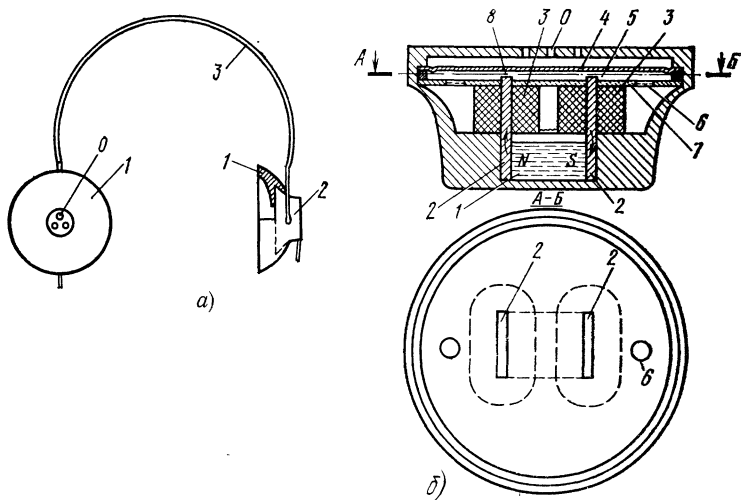


Рис. 6.20. Телефоны ТА-56М:

а) общий вид телефонов с оголовьем 3 и заглушками 1, капсюлем 2;
б) конструкция телефона:

1 — магнит, 2, 8 — полюсные наконечники, 3 и 5 — катушки, 4 — диафрагма, 5 — объем под диафрагмой, 6 — отверстие в прокладке, 7 — прокладка, 8 — зазоры

Для внешних телефонов применяют специальную акустическую коррекцию (см. рис. 6.20б) с помощью прокладки 7 с отверстиями 6, затянутыми шелком. Эта прокладка делит объем под диафрагмой на две неравные части (меньшую между диафрагмой и прокладкой), из-за чего получается двойной резонатор. Резонансная частота диафрагмы берется около 2000 Гц. На эту частоту настраивается и корректирующее устройство, работающее как фильтр-пробка. В результате этого частотная характеристика выравнивается. Дополнительный резонанс между отверстиями *О* в амбушюре (рис. 6.20а и б) и объемом камеры искусственного уха делает частотную характеристику еще более равномерной в диапазоне частот до 3500 Гц (телефоны ТА-56 и ТА-4). Отдача этих телефонов — не менее 6—10 Па, неравномерность — не более 4 дБ.

Динамические телефоны по конструкции ничем не отличаются от динамических микрофонов, но у них меньше по размерам магнитная система. По внешнему оформлению они похожи на электромагнитные телефоны ТА-4, но имеют несколько бóльшую высоту. Диапазон передаваемых частот 100—5000 Гц, средняя отдача не менее 10 Па, неравномерность частотной характеристики не более 4 дБ. Применяются они для измерительных целей и для слухового контроля вещательных передач. Динамические телефоны являются обратимыми преобразователями и поэтому могут служить микрофонами.

Устройство пьезотелефонов аналогично пьезогромкоговорителям. В данное время они практически не применяются.

Глава 7

АКУСТИКА ПОМЕЩЕНИЙ

7.1. РАСПРОСТРАНЕНИЕ ЗВУКА В ОГРАНИЧЕННОМ ПРОСТРАНСТВЕ

При своем распространении звуковые волны, доходя до какой-либо преграды, частично отражаются от нее, а частично ее огибают. Последний эффект определяется дифракционной способностью волн и зависит от соотношения между размерами преграды и длиной волны. Для звуковых волн в воздухе в диапазоне частот 30—15 000 Гц дифракция может наблюдаться при размерах преград от нескольких сантиметров до нескольких метров. При встрече звуковых волн с преградами бóльших размеров дифракционный эффект присутствует только на краях преграды. Часть энергии звуковых волн отражается, а часть поглощается, соотношение этих частей определяется свойствами материала преграды. Для учета этого эффекта введены понятия *коэффициентов поглощения* и *отражения* звука. Отношение интенсивности отраженных звуковых волн $I_{\text{отр}}$ к интенсивности падающих $I_{\text{пад}}$ называется коэффициентом отражения $\alpha_{\text{отр}} = I_{\text{отр}}/I_{\text{пад}}$, а отношение поглощенной энергии к падающей — коэффициентом поглощения $\alpha = I/I_{\text{пад}}$, где I — интенсивность поглощенной энергии. Если нет дифракции, то $\alpha = 1 - \alpha_{\text{отр}}$. Заметим, что коэффициенты

поглощения и отражения зависят от частоты. Отраженные волны интерферируют с падающими волнами и образуют стоячие волны с пучностями и узлами.

7.2. АКУСТИЧЕСКИЕ ПРОЦЕССЫ В ПОМЕЩЕНИЯХ

Статистическая теория. Допустим, что коэффициент поглощения ограничивающих поверхностей данного помещения очень мал, поэтому каждый звуковой луч будет многократно отражаться от поверхностей, прежде чем его уровень упадет до неслышимого значения. Вследствие этого усредненные потоки энергии в каждой точке звукового поля помещения будут одинаковыми во всех направлениях, причем звуковая энергия рассредоточится по помещению так, что ее плотность в каждой точке будет одинаковой. Такое звуковое поле называют диффузным.

Для диффузного поля можно статистически определить среднюю длину пробега звукового луча между двумя последующими отражениями. Для помещения прямоугольной формы с размерами, близкими к так называемому «золотому» сечению (длина : ширина : высота = 2 : 1,41 : 1), получена следующая средняя длина свободного пробега звукового луча (см. [1], с. 71):

$$l_{\text{ср}} = 4V/S, \quad (7.1)$$

где V — объем помещения; S — общая поверхность стен, потолка и пола.

Оказывается, что и для помещений более сложной формы и с размерами, отклоняющимися от «золотого» сечения, средняя длина свободного пробега звукового луча с достаточной точностью все же может определяться равенством (7.1).

Между двумя последующими отражениями среднее (статистическое) время пробега

$$\tau = l_{\text{ср}}/c = 4V/cS. \quad (7.2)$$

Эта величина служит базой для вывода основных уравнений акустических процессов в помещениях. Рассмотрим эти процессы в установившемся режиме. В этом случае количество энергии, излучаемой источником звука, должно быть равно количеству поглощаемой энергии за один и тот же промежуток времени. За промежуток времени, равный среднему времени свободного пробега

звукового луча, излучаемая энергия $W_{\text{изл}} = P_a \tau$, где P_a — акустическая мощность источника звука.

За это время каждый звуковой луч в среднем испытывает одно отражение, поэтому энергия, имеющаяся в помещении, будет частично поглощена. Поглощенная энергия $W_{\text{погл}}$ пропорциональна коэффициенту поглощения α и общей энергии, имеющейся в помещении $W_{\text{пом}} = \varepsilon_m V$, где ε_m — плотность энергии в установившемся режиме, т. е. $W_{\text{погл}} = W_{\text{пом}} \alpha = \varepsilon_m V \alpha$. Если $W_{\text{изл}} = W_{\text{погл}}$, то $P_a \tau = \varepsilon_m V \alpha$. Подставляя в это выражение среднее время пробега из ф-лы (7.2), находим, что установившееся значение плотности энергии

$$\varepsilon_m = 4P_a / c \alpha S. \quad (7.3)$$

В соответствии с (1.11) и (1.14) можно определить звуковое давление при установившемся режиме в помещении:

$$p_s^2 = I \rho c = \varepsilon_m \rho c^2 = \frac{4\rho c^2 P_a}{c \alpha S} = 1650 \frac{P_a}{\alpha S}, \quad (7.3a)$$

где P_a , Вт; S , м²; p_s , Па.

Плотность энергии и звуковое давление, определяемые по ф-лам (7.3) и (7.3a), выведены при условии очень малого коэффициента поглощения ограничивающих поверхностей помещения. В залах, аудиториях, жилых помещениях и т. п. коэффициент поглощения достаточно велик (0,2—0,4), поэтому интенсивность звуковой волны при каждом отражении от таких поверхностей резко уменьшается. Вследствие этого уже нельзя считать, что в каждой точке помещения будут сходиться звуковые лучи всевозможных направлений и примерно с одинаковой интенсивностью и что плотность энергии в каждой точке помещения будет одинаковой. В таких помещениях плотность энергии распределяется по помещению неравномерно: наблюдаются пучности и узлы колебаний. Формулы (7.3) и (7.3a) для таких помещений дают лишь средние значения плотности энергии и звукового давления.

В знаменателе выражения для плотности энергии (7.3) стоит произведение коэффициента поглощения на площадь ограничивающих поверхностей помещения. Это произведение называют *общим поглощением помещения* A . Следовательно, плотность энергии в помещении в установившемся режиме прямо пропорциональна аку-

стической мощности источника звука и обратно пропорциональна общему поглощению помещения.

Общее поглощение измеряется в сэбинах (Сб) или в квадратных метрах (1 Сб равен поглощению 1 м² открытого окна без учета дифракции). Если поверхности помещения будут иметь неодинаковые коэффициенты поглощения, то на основе статистических законов можно говорить о среднем коэффициенте поглощения

$$\alpha_{\text{ср}} = \left[\sum_{(k)} \alpha_k S_k \right] / \sum_{(k)} S_k = A/S, \quad (7.4)$$

где S_k — участки поверхностей помещения; α_k — их коэффициенты поглощения.

Так как в помещении, как правило, находятся люди и различные предметы, поглощающую поверхность которых трудно учесть, то для удобства расчетов введены эквивалентные коэффициенты поглощения для людей и предметов на их единицу. В этом случае произведение эквивалентного коэффициента поглощения $\alpha_{\text{п}}$ на число предметов $N_{\text{п}}$ будет также исчисляться в сэбинах или метрах квадратных, и общее поглощение будет суммой поглощений поверхностей и предметов:

$$A = \sum_{(k)} \alpha_k S_k + \sum_{(n)} \alpha_{\text{п}} N_{\text{п}}. \quad (7.5)$$

Оказывается, что даже при резком различии в коэффициентах поглощения формула среднего коэффициента достаточно точна, хотя плотность энергии около участков поверхности с экстремальными коэффициентами поглощения будет значительно отклоняться от своего среднего значения в помещении.

Рассмотрим процесс затухания звука в помещении после выключения источника звука.

В начальный момент ($t=0$) плотность энергии $\varepsilon = \varepsilon_m$, после первого отражения $t=\tau$, $\varepsilon = \varepsilon_m \alpha_{\text{отр}}$, после второго отражения $t=2\tau$, $\varepsilon = \varepsilon_m \alpha_{\text{отр}}^2$, после n -го отражения $t=n\tau$, $\varepsilon = \varepsilon_m \alpha_{\text{отр}}^n$. Так как число отражений $n=t/\tau$, то, заменяя в нем среднее время пробега звукового луча соответственно (7.2), получим $n = cSt/4V$. Следовательно, для плотности энергии в момент времени t имеем

$$\varepsilon = \varepsilon_m \alpha_{\text{отр}}^{cSt/4V}.$$

Переходя к экспоненциальной форме, находим

$$\varepsilon = \varepsilon_m e^{\frac{cSt}{4V} \ln \alpha_{отр}}.$$

Заменяя в нем $\ln \alpha_{отр}$ на $-\alpha'$ и $\alpha_{отр}$ на $1-\alpha_{ср}$, получим следующее выражение для процесса затухания звука в помещении:

$$\varepsilon = \varepsilon_m e^{-\frac{c \alpha' S}{4V} t}, \quad (7.6)$$

где $\alpha' = -\ln(1-\alpha_{ср})$.

Соответственно можно получить и выражение для процесса нарастания звука:

$$\varepsilon_n = \varepsilon_m \left(1 - e^{-\frac{c \alpha' S}{4V} t}\right), \quad (7.7)$$

как это следует из общей теории затухания и нарастания колебаний.

На рис. 7.1а приведены кривые нарастания и затухания звука в помещении для плотности энергии при наличии диффузного поля в нем (сплошные кривые). Поле в помещении в практических случаях отклоняется от диффузного, в частности, плотность энергии в различных точках помещения в силу интерференции ограниченного числа звуковых волн может довольно значительно отличаться от среднего значения. Например, если рассматривать точку, в которой был узел стоячей волны от двух каких-либо звуковых лучей, то при исчезновении одного из них (в процессе затухания звука в помещении) уровень звука в этой точке может повыситься на некоторое время, пока не исчезнет и другой звуковой луч. Поэтому в практических случаях звук затухает не монотонно: кривая затухания (и соответственно — нарастания) отклоняется от экспоненциальной. Эти отклонения могут быть довольно заметной величины. Чем значительней отклоняется поле от состояния диффузности, тем больше эти отклонения (см. рис. 7.1а, пунктирные кривые). Кривые затухания и нарастания звука выглядят нагляднее (применительно к слуховому восприятию человека), если изобразить их в логарифмическом масштабе по оси ординат, т. е. в виде затухания и нарастания уровней звука. Переходя от (7.6) к (2.5), имеем

$$L = 10 \lg \frac{\varepsilon}{\varepsilon_0} = 10 \lg \frac{\varepsilon_m}{\varepsilon_0} - 10 \frac{c \alpha' S}{4V} t \lg e = L_m - bt, \quad (7.8)$$

$$\text{где } L_m = 10 \lg(\epsilon_m/\epsilon_0) \quad (7.9)$$

— уровень звука при установившемся режиме;

$$b = 10 \frac{c \alpha' S}{4V} \lg e \approx 375 \frac{\alpha' S}{V}$$

— показатель затухания; здесь S , м²; V , м³.

Как и следовало ожидать, уровень уменьшается по линейному закону (рис. 7.1б). Для слуха этот процесс

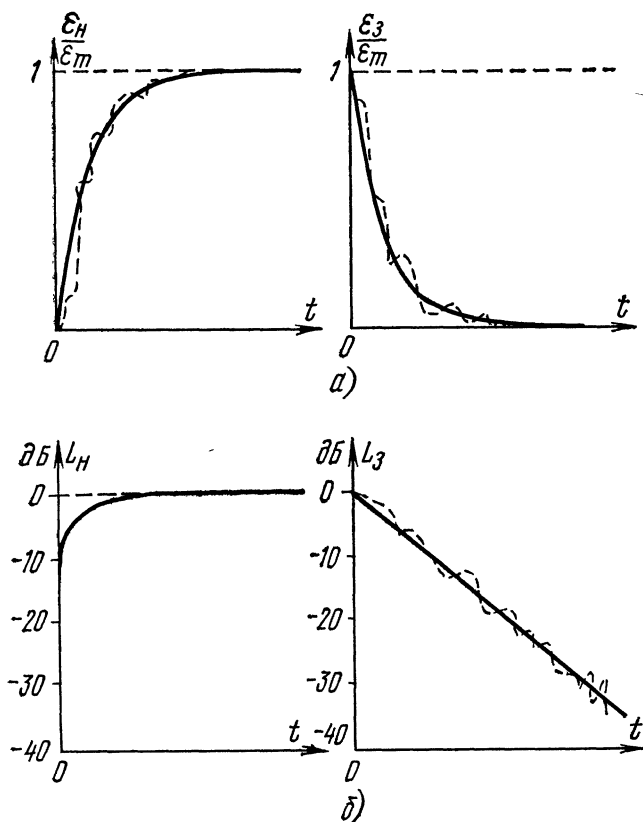


Рис. 7.1. Кривые нарастания и затухания звука в помещении: а) уровень плотности энергии в помещении для диффузного поля (сплошная линия), фактические уровни (пунктир); б) уровни интенсивности звука в диффузном поле (сплошная линия), фактические уровни (пунктир)

происходит довольно медленно¹⁾. В то же время нарастание уровня звука происходит довольно быстро (рис. 7.16), так как при уменьшении переменной части выражения (7.7) до 0,1 уровень будет отличаться от максимального на величину $10 \lg 0,9 = -0,4$ дБ (за такое же время уровень (7.8) уменьшится только на 20 дБ). На рис. 7.16 (пунктир) приведена и реальная кривая затухания для уровней звука.

Процесс затухания звука получил название реверберации.

Волновая теория процессов в помещениях. Согласно волновой теории процесс затухания звука в помещении рассматривается как свободные колебания трехмерного пространства с заданным распределением энергии по помещению.

Если взять помещение простой формы, например, в форме параллелепипеда с размерами l , b и h , то согласно теории колебаний трехмерного пространства его собственные частоты определяются следующим выражением:

$$f_m = \frac{c}{2} \sqrt{\left(\frac{n_1}{l}\right)^2 + \left(\frac{n_2}{b}\right)^2 + \left(\frac{n_3}{h}\right)^2},$$

где n_1 , n_2 и n_3 — порядковые числа от нуля до бесконечности.

Распределение этих частот по диапазону для помещений с большими размерами таково, что на частотах выше 100 Гц интервалы между соседними собственными частотами не превышают нескольких герц (например, для помещения с размерами $10 \times 6 \times 4$ м между соседними собственными частотами интервалы составляют менее 2 Гц). На частотах ниже 100 Гц эти интервалы больше (например, в диапазоне 25—50 Гц они в среднем около 4 Гц).

При выключении источника звука начинаются свободные колебания объема воздуха в помещении. Этот процесс происходит по экспоненциальному закону на каждой из собственных частот помещения с постоянной времени, определяемой затуханием на соответствующей частоте. Эти постоянные мало отличаются друг от друга. Начальные амплитуды свободных колебаний на каждой из частот определяются условием распределения плотности энергии по помещению, а также разностью между частотой вынужденных колебаний и рассматриваемой собственной частотой. При затухании звука в помещении происходят биения между колебаниями на собственных частотах, в результате чего звук затухает не монотонно.

Реверберация в связанных помещениях. На практике очень часто имеют дело со связанными помещениями, т. е. с такими, процессы в которых могут зависеть от параметров обоих помещений. Нап-

¹⁾ Например, уменьшение плотности энергии в 100 раз, т. е. до одного процента, соответствует уменьшению уровня на 20 дБ, что при средних уровнях передачи, равных 60—90 дБ, еще не очень велико.

пример, два зала, связанные между собой открытыми дверьми или небольшой аркой; студия, из которой ведут передачу в зал, или жилое помещение, в котором эту передачу прослушивают (рис. 7.2а). Разница между этими случаями сводится к тому, что во втором слу-

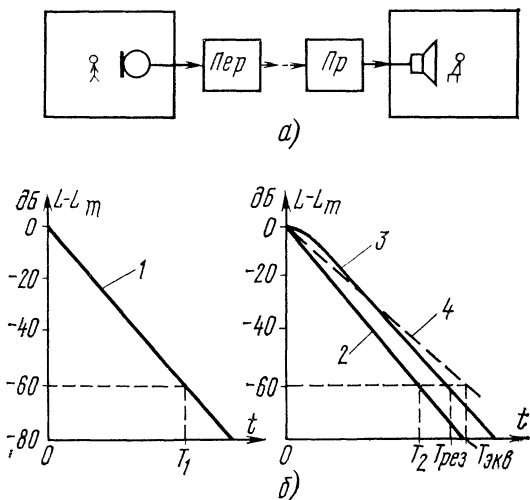


Рис. 7.2. Связанные помещения без обратной связи:
а) схема; б) кривые затухания уровня:

1 — в первичном помещении; 2 — во вторичном помещении при условии его независимости; 3 — результирующая при передаче звука из первичного помещения; 4 — эквивалентная реверберация

чае процессы в студии проходят независимо от процессов в помещении, в котором прослушивают передачу, т. е. без обратной связи, а в первом — они определяются параметрами обоих помещений, т. е. имеет место обратная связь. Помещение в котором находится первичный источник звука, называется первичным, а другое помещение — вторичным.

В первичном помещении без обратной связи процесс затухания звука происходит как обычно (рис. 7.2б, кривая 1), а во вторичном — медленнее (рис. 7.2, кривая 3), так как громкоговоритель после выключения первичного источника звука еще продолжает работать, передавая реверберационный процесс, происходящий в первичном помещении. Характерно, что во вторичном помещении, как показывают теория и эксперимент, кру-

тизна наклона кривой уровня звука сначала плавно уменьшается после выключения первичного источника звука (рис. 7.2б, кривая 3), а затем приближается к крутизне наклона кривой затухания уровня в том помещении, в котором процесс реверберации происходит медленнее. Физически понятно, что, как в любых связанных цепях, кривая затухания звука во вторичном помещении должна определяться медленным процессом. Наибольшее отклонение результирующей кривой затухания от этого процесса получается при одинаковой реверберации в обоих помещениях.

При наличии обратной связи между помещениями процесс происходит аналогично. Можно свести это к случаю отсутствия обратной связи, если ввести соответствующие поправки в уравнения, определяющие процессы в связанных помещениях без обратной связи (см. [2], § 4.7).

7.3. ХАРАКТЕРИСТИКИ ПОМЕЩЕНИЯ

Акустическое отношение. Звуковое поле в помещении можно представить как сумму составляющих поля «прямого» звука, создаваемого звуковыми волнами, не испытавшими ни одного отражения, и поля, создаваемого отраженными звуковыми волнами. Поле отраженных звуковых волн почти всегда можно считать близким к диффузному. Поэтому эту составляющую поля часто и называют диффузной составляющей. Отношение плотности энергии отраженных звуков к плотности энергии прямого звука, т. е. $R = \epsilon_{\text{диф}} / \epsilon_{\text{пр}}$ или с учетом (1.12)

$$R = p_{\text{диф}}^2 / p_{\text{пр}}^2 \quad (7.10)$$

называют акустическим отношением.

Переходя к уровням, имеем

$$\Delta L_R = 10 \lg R = L_{\text{диф}} - L_{\text{пр}}. \quad (7.106)$$

Величину ΔL_R называют также *акустическим отношением*, выраженным в децибелах,

Отраженные звуковые волны в той или иной степени являются помехами, поэтому акустическое отношение — характерный показатель акустических свойств помещения в установившемся режиме.

Диффузная составляющая может быть определена из выражения для установившейся плотности энергии (7.3), если учесть, что

последняя включает в себя энергию всех звуковых волн, претерпевших отражения, и прямого звука. Следовательно, для отраженных волн из (7.3) имеем

$$\epsilon_{\text{диф}} = \epsilon_m \alpha_{\text{отр}} = \epsilon_m (1 - \alpha_{\text{ср}}) = \frac{4P_a (1 - \alpha_{\text{ср}})}{c \alpha_{\text{ср}} S}$$

или с учетом (1.11) и (1.20)
$$p_{\text{диф}}^2 = \frac{4P_a (1 - \alpha_{\text{ср}})}{\rho c^2 \alpha_{\text{ср}} S}.$$

Переходя к уровням (2.5), имеем

$$L_{\text{диф}} = 10 \lg \frac{4P_a (1 - \alpha_{\text{ср}})}{\epsilon_0 c \alpha_{\text{ср}} S}, \quad (7.11)$$

где $\alpha_{\text{ср}}$ — средний коэффициент поглощения; $\epsilon_0 c = 10^{-12}$ Вт/м².

Составляющая поля прямого звука в общем случае зависит от формы звуковой волны, расстояния от источника звука и характеристики направленности. Поле прямого звука неоднородно, так как по мере удаления от источника звука плотность его энергии уменьшается. При небольших размерах источника звука, по сравнению с расстоянием от него, уменьшение плотности энергии происходит по квадратичному закону [см. (1.11) и (1.15а)] (при больших размерах источника плотность энергии уменьшается несколько медленнее). Для источников звука с большими размерами по сравнению с расстоянием до рассматриваемой точки, находящейся на рабочей оси источника, можно воспользоваться (6.5):

$$P_a = 4\pi r^2 p_{\text{пр}}^2 / \Omega \rho c,$$

где $p_{\text{пр}}$ — звуковое давление на расстоянии r ; Ω — коэффициент осевой концентрации источника звука.

Из этих выражений с учетом (1.11) получаем, что звуковое давление и плотность энергии прямого звука в заданной точке равны соответственно:

$$p_{\text{пр}}^2 = \Omega P_a \rho c / 4\pi r^2; \quad \epsilon_{\text{пр}} = \Omega P_a / 4\pi r^2 c.$$

Следовательно, для этой точки акустическое отношение (7.10)

$$R = \frac{\epsilon_{\text{диф}}}{\epsilon_{\text{пр}}} = \frac{16\pi r^2 (1 - \alpha_{\text{ср}})}{\alpha_{\text{ср}} S \Omega}. \quad (7.12)$$

Из этой формулы видим, что для одиночного источника звука, создающего сферическую волну, акустическое отношение уменьшается по квадратичному закону при приближении к источнику звука и, кроме того, оно обратно пропорционально коэффициенту осевой концентрации. В общем случае оно будет меньше там, где меньше уровень прямого звука. Акустическое отношение зависит от частоты, так как коэффициенты поглощения и концентрации зависят от нее.

В реальных условиях акустическое отношение для удаленных точек помещения в редких случаях бывает меньше единицы, а иногда доходит до 10—15, т. е. уровень отраженных волн, как правило, выше уровня поля прямого звука.

Если акустическое отношение велико, то это свидетельствует о высоком уровне отраженных звуков, запаздывающих по отношению к прямому звуку и являющихся помехами для его восприятия. Например, при акустическом отношении больше четырех отраженный звук уже создает большие помехи для приема речи. Для музыкальных передач акустическое отношение больше 6—8 (а для органной музыки 10—12) не рекомендуется. При малом акустическом отношении (менее двух) музыка звучит сухо. Для речи допускается акустическое отношение немного меньше единицы. Расстояние от источника звука, для которого $R=1$, называют радиусом гулкосты, так как при больших расстояниях диффузная составляющая становится больше составляющей прямого звука (в звучании появляется гулкость).

Четкость звучания. Акустическое отношение полностью не характеризует восприятие звука в помещении. Поэтому ввели еще одно понятие — *четкости звучания*. Под ним понимается отношение плотности энергии прямого звука $\epsilon_{\text{пр}}$, суммируемого с плотностью отраженных звуковых волн¹⁾, приходящих в данную точку помещения в течение $\tau=60$ мс после прихода прямого звука $\epsilon_{\tau < 60 \text{ мс}}$ и потому воспринимаемых слитно с ним, к общей плотности энергии:

$$S_r = \epsilon_{\text{пол}} / (\epsilon_{\text{пол}} + \epsilon_{\text{пом}}) = (\epsilon_{\text{пр}} + \epsilon_{\tau < 60 \text{ мс}}) / \epsilon_{\text{т}}$$

Четкость звучания характеризует относительную величину всей полезной энергии $\epsilon_{\text{пол}}$ (включая и полезную часть энергии отраженных звуков в общей плотности энергии). В этом ее преимущество перед акустическим отношением. Чем больше четкость звучания, тем меньше влияют помехи от запаздывающих лучей из-за явления реверберации. Из-за трудности измерения этой величины она пока ненормирована.

Время реверберации. Основная характеристика помещения — время реверберации, т. е. время затухания звука. Поскольку средние уровни сигналов в помещении значительно выше уровней шумов в них и, конечно, значительно выше порога слышимости, то условились оценивать процесс затухания звука временем уменьшения плотности энергии и интенсивности звука в 10^6 раз, а в соответствии с (1.21) по звуковому давлению в 10^3 раз. Это время называют *временем стандартной реверберации*. В литературе очень часто его

¹⁾ Эти отраженные звуки из-за малого запаздывания воспринимаются слитно с прямым звуком и тем самым увеличивают полезную составляющую звука.

называют просто временем реверберации. Если $\epsilon = \epsilon_m \cdot 10^{-6}$, то $t = T$ и из (7.6) следует

$$\epsilon_m \cdot 10^{-6} = \epsilon_m e^{-\frac{c \alpha' S}{4V} T}.$$

Отсюда получаем время стандартной реверберации

$$T = \frac{6 \cdot 4V}{(\lg e) c \alpha' S} = \frac{0,161V}{\alpha' S}, \quad (7.13)$$

где V , м³; S , м². Эта формула носит название формулы Эйринга, по имени ее автора. Из (2.5) и $\epsilon = 10^{-6} \cdot \epsilon_m$ следует, что время реверберации T соответствует времени уменьшения начального уровня на 60 дБ, т. е.

$$L_{t=T} = 10 \lg \frac{\epsilon}{\epsilon_0} \Big|_{t=T} = L_m - 60. \text{ Сопоставляя его с (7.8),}$$

получим $bT = 60$. Следовательно, $L = L_m - \frac{60}{T} t$.

Из (7.13) следует, что время стандартной реверберации пропорционально линейным размерам помещения (V/S). Кроме того, в знаменатель (7.13) входит выражение

$$\alpha' = -\ln(1 - \alpha_{\text{ср}}). \quad (7.14)$$

Если коэффициент поглощения $\alpha_{\text{ср}}$ невелик, то $\alpha' = \alpha_{\text{ср}}$, так как $-\ln(1 - \alpha_{\text{ср}}) \Big|_{\alpha_{\text{ср}} \rightarrow 0} = \alpha_{\text{ср}}$. Следовательно, для случая малых коэффициентов поглощения время стандартной реверберации

$$T = 0,161V/\alpha_{\text{ср}}S = 0,161V/A. \quad (7.15)$$

Эта формула называется формулой Сэбина. Как видим, время стандартной реверберации обратно пропорционально общему поглощению помещения. Для придания общности обеим формулам величину α' в формуле Эйринга называют *реверберационным коэффициентом поглощения*, в отличие от обычного коэффициента поглощения при установившемся режиме. В реальных помещениях (кроме специальных) время стандартной реверберации бывает в пределах от нескольких десятых секунд до нескольких секунд. Помещения с малым временем реверберации называют заглушенными, а с большим — гулкими. Здесь следует сказать, что постоянная времени слуха, находящаяся в пределах 125—150 мс, соответствует времени стандартной реверберации около 0,85—1,05 с, так как согласно общему определению постоянная времени соответствует уменьшению звукового

давления в e раз, т. е. на 8,68 дБ. Откуда $T_{\text{суб}} = 60 \times \times 125/8,68 = 850$ мс. Следовательно, время реверберации ниже 0,85 с менее заметно для слуха из-за маскировки собственным процессом затухания колебаний в ухе.

При распространении звука в воздухе происходит затухание колебаний из-за вязкости среды и, вследствие этого, как бы увеличивается поглощение $\alpha'S$. При расчете времени реверберации к поглощению помещения добавляют поправку на затухание энергии в воздухе. Поправка зависит от объема, поскольку энергия затухает по всему помещению. Чтобы привести это затухание к поверхностному, введен коэффициент затухания μ , обратно пропорциональный линейным размерам помещения. Таким образом, получается дополнительное поглощение, обусловленное вязкостью и равное $4\mu V$, а время стандартной реверберации (7.13) будет определяться выражением

$$T = \frac{0,161V}{\alpha'S + 4\mu V} \quad (7.16)$$

Эта формула носит название полной формулы Эйринга.

Дополнительное поглощение обычно невелико, с ним приходится считаться только в больших помещениях и притом на частотах выше 1000 Гц.

Для связанных помещений результирующее время стандартной реверберации будет больше наибольшего времени реверберации, так как результирующий процесс определяется реверберацией в наименее заглушенном помещении. Поэтому результирующее время стандартной реверберации

$$T_p = T_{\text{макс}} (1 + k), \quad (7.17)$$

где поправочный коэффициент $k = f(T_{\text{мин/макс}})$ изменяется в пределах 1—1,21.

При равенстве времен реверберации в обоих помещениях результирующее время увеличивается на 21% по отношению к времени реверберации в несвязанном помещении. С таким увеличением времени реверберации в связанных помещениях на практике часто приходится считаться. Так, при передаче какой-либо программы из студии в помещение, в котором она прослушивается, можно создать условия слушания или такие, как в студии, если в ней время реверберации большое (это делают при передаче музыкальных программ, чтобы слушателю казалось, что он находится в большом

помещении), или такие, как в зале для прослушивания (в этом случае в студии время реверберации должно быть значительно меньше, чем в зале для прослушивания).

Эквивалентная реверберация. При выключении источника уровень звука резко снижается, как только исчезнет прямой звук. Затем снижение уровня идет более или менее равномерно в зависимости от диффузности поля. На рис. 7.3 (кривая 1) показан не-

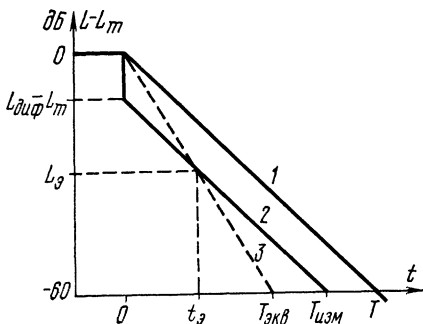


Рис. 7.3. К определению эквивалентной реверберации:

1 — затухание уровня при наличии диффузного поля; 2 — фактический ход кривой затухания уровня (при измерении времени реверберации); 3 — эквивалентная реверберация, воспринимаемая слухом

сколько идеализированный процесс, когда поле чисто диффузное. Там же приведены кривая 2 затухания звука в реальных условиях, т. е. при наличии значительного уровня прямого звука, и кривая 3, показывающая как затухание звука воспринимается слухом. Если начальный уровень равен 60 дБ, то соответственно измеренные время реверберации и время $T_{\text{экв}}$, ощущаемое на слух, будут отличаться тем значительней, чем меньше акустическое отношение. Ощущаемое время реверберации называют эквивалентной реверберацией. Из графика следует, что это время связано с временем стандартной реверберации T и акустическим отношением R следующим выражением (см. [1], с. 78):

$$\frac{1}{T_{\text{экв}}} = \frac{1}{T} + \frac{1}{6t_э} \lg \frac{1+R}{R}, \quad (7.18)$$

где $T_{\text{экв}}$ — время эквивалентной реверберации; $t_э$ — время, в течение которого слух достаточно хорошо интегрирует процессы. Это время измерено, оно оказалось приблизительно равным 0,2 с, что несколько превышает постоянную времени слуха.

Эквивалентная реверберация уменьшается при приближении к источнику звука, так как уменьшается аку-

тическое отношение, и это хорошо ощущается слушателями. А в удаленных точках зала, где акустическое отношение наиболее велико, всегда ощущается бо́льшая гулкость, чем в других точках помещения.

Для связанных помещений эквивалентная реверберация вычисляется как и для несвязанных, но так как кривая затухания для связанного вторичного помещения выгнута вверх (см. рис. 7.2б, кривая 3), то эквивалентная реверберация (кривая 4), получается больше фактической. Приблизительно можно определить эквивалентную реверберацию по следующей эмпирической формуле:

$$T_{p.э}^{5/2} = T_1^{5/2} + T_2^{5/2}. \quad (7.19)$$

При равенстве времени реверберации в обоих помещениях увеличение эквивалентной реверберации по сравнению с результирующим временем получается равным 10% и на 31% превосходит время реверберации в несвязанном помещении.

Оптимальная реверберация. Если в помещении, в котором исполняется музыкальная программа или произносится речь, время реверберации очень велико, то художественность исполнения музыки сильно страдает из-за большой гулкости, а речь становится неразборчивой из-за «наплывов» одного звука на другой. С другой стороны, если время реверберации очень мало, то музыка и речь звучат резко, отрывисто. Только при вполне определенном времени стандартной реверберации звучание получается наилучшим. Соответствующее время реверберации называют *оптимальной реверберацией*. Оказывается, что для разных видов программ оптимальное время реверберации различно (рис. 7.4). Для информационной речи оно наименьшее по сравнению с другими видами программ. Для органной музыки наоборот — время реверберации наибольшее. Для симфонической музыки оптимальная реверберация получается бо́льшая, чем для камерной. Ясно, что для кинотеатров по сравнению с театрами время реверберации должно быть меньше, так как оно увеличивается из-за связанности кинотеатра с киностудиями. Экспериментально установлено, что оптимальная реверберация зависит от объема помещения (см. рис. 7.4). Было высказано несколько гипотез о причинах этой зависимости. Наибольшее распространение получила гипотеза Лифшица, ос-

нованная на том, что один и тот же естественный источник звука (например, симфонический оркестр) в большом помещении создает меньший уровень звука, чем в малом. Для компенсации этого явления необходимо время затухания звука в большом помещении сделать более длительным по сравнению с малым.

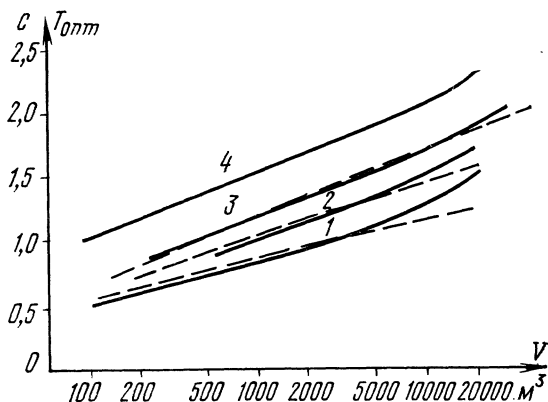


Рис. 7.4. Зависимость оптимальной реверберации для частоты 500 Гц от объема помещения:

1 — для речевых передач; 2 — для малых музыкальных форм и оперных театров; 3 — для концертных залов (симфоническая музыка); 4 — для органной музыки; — — — приближенная аналитическая зависимость

Из графиков рис. 7.4 следует, что для передачи информационной речи время оптимальной реверберации на частоте 500 Гц не превышает 1 с, т. е. почти не превышает времени субъективной реверберации. В концертных залах она находится в пределах 1—1,7 с.

Графические зависимости, полученные экспериментально, с достаточной точностью могут быть заменены следующими приближенными выражениями:

для передачи речи

$$T_{\text{опт}} = 0,3 \lg V_{\text{м}^3} - 0,05; \quad (7.20a)$$

для малых музыкальных форм и оперных театров

$$T_{\text{опт}} = 0,4 \lg V_{\text{м}^3} - 0,15; \quad (7.20б)$$

для симфонической музыки

$$T_{\text{опт}} = 0,5 \lg V_{\text{м}^3} - 0,3, \quad (7.20в)$$

где V — объем помещения.

Оптимальная реверберация зависит от частоты. Так, для речевых информационных передач оптимальное

время реверберации уменьшается в сторону низких частот, т. е. на низких частотах, имеющих в речи самые высокие уровни и наименее информативные, необходимо более быстрое затухание акустических процессов, чем на средних частотах. На высоких частотах оптимальное время реверберации также должно быть мень-

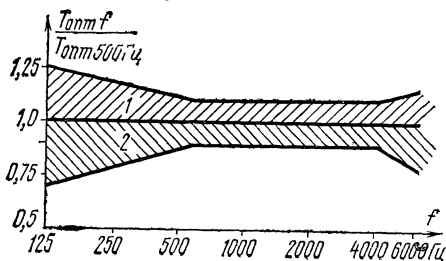


Рис. 7.5. Частотная зависимость времени оптимальной реверберации:

1 — для музыкальных программ; 2 — для речевых передач

ше, чем на средних. Объясняется это тем, что высокочастотные звуки имеют в большинстве своем меньшую длительность, чем звуки других диапазонов, и поэтому наличие более длительных процессов затухания будет их маскировать. На рис. 7.5 приведена относительная зависимость оптимальной реверберации от частоты для речевых и музыкальных передач в форме допусков, в которые следует укладываться при реализации времени реверберации в помещении.

Слитность звучания. В ряде случаев неравномерность распределения энергии в помещении настолько велика, что в кривой затухания появляются значительные максимумы с запаздыванием более чем на 50 мс по отношению к моменту выключения источника звука, в результате чего прослушивается эхо. Иногда получается многократное эхо. Появление эха возможно при наличии в помещении различных концентраторов энергии в форме куполов, а также при больших размерах помещения с малым коэффициентом поглощения на параллельных плоскостях (стенах помещения), удаленных друг от друга. К появлению эха также приводит наличие различного рода резонаторов с малым поглощением.

Акустические шумы в помещениях. Акустические шумы в помещениях ограничивают динамический диапазон передачи как художественных программ, так и информационных, ухудшая качество звучания первых и снижая разборчивость речи для вторых.

Эти шумы создаются как самими слушателями, так и шумами и вибрациями, проникающими в помещение извне (с улицы или из соседних помещений). Уровни шумов, создаваемые публикой, достаточно хорошо исследованы; их спектры и уровни обычно приводятся в различных справочниках. Уровни шумов, проникающих извне, определяются звукоизоляцией помещения и уровнями шумов с наружной его стороны. Аналогично определяются и уровни шумов, создаваемые вибрациями, проникающими извне.

7.4. ЗВУКОПОГЛОЩАЮЩИЕ МАТЕРИАЛЫ И КОНСТРУКЦИИ

Общая теория. Причиной отражения звуковых волн от любой пространственной границы двух сред является неравенство (несогласованность) их волновых акустических сопротивлений. Если волновое акустическое сопротивление воздуха равно $\zeta_{\text{воз}}$, а другой (отражающей) среды — $\zeta_{\text{отр}}$, то по общей теории отражения волн коэффициент отражения по звуковому давлению

$$\beta_{\text{отр}} = \frac{p_{\text{отр}}}{p_{\text{пад}}} = \frac{\zeta_{\text{отр}} - \zeta_{\text{воз}}}{\zeta_{\text{отр}} + \zeta_{\text{воз}}},$$

а для случая плоской падающей волны

$$\beta_{\text{отр}} = (\zeta_{\text{отр}} - \rho c) / (\zeta_{\text{отр}} + \rho c).$$

Таким образом, отражающая способность среды тем больше, чем резче отличается ее волновое сопротивление от волнового сопротивления первой среды, например воздуха.

Так как обычно пользуются коэффициентами отражения и поглощения по интенсивности звука (см. определение в § 7.1), то соответствующий коэффициент отражения

$$\alpha_{\text{отр}} = |p_{\text{отр}}/p_{\text{пад}}|^2 = |(\zeta_{\text{отр}} - \zeta_{\text{воз}})/(\zeta_{\text{отр}} + \zeta_{\text{воз}})|^2,$$

а коэффициент поглощения

$$\alpha = 1 - \alpha_{\text{отр}} = 1 - |(\zeta_{\text{отр}} - \zeta_{\text{воз}})/(\zeta_{\text{отр}} + \zeta_{\text{воз}})|^2. \quad (7.21)$$

Сопротивления обеих сред в общем случае могут быть комплексными, т. е.

$$\zeta_{\text{отр}} = \omega_{\text{отр}} + i q_{\text{отр}} \quad \text{и} \quad \zeta_{\text{воз}} = \omega_{\text{воз}} + i q_{\text{воз}},$$

поэтому абсолютное поглощение (коэффициент отражения, равный нулю) может быть только при равенстве вещественных и мнимых частей сопротивлений $\omega_{отр} = \omega_{воз}$ и $q_{отр} = q_{воз}$.

Отраженные звуковые волны, интерферируя с падающими, образуют стоячие волны с пучностями и узлами. В отсутствии реактивных составляющих волновых сопротивлений у обеих сред фаза отраженной волны может или совпадать с фазой падающей или быть сдвинутой на π в зависимости от того, какое из сопротивлений больше $z_{воз}$ или $z_{отр}$, т. е. у границы может быть либо пучность, либо узел колебаний.

В общем случае сдвиг фаз между падающей и отраженной волнами получается в интервале между 0 и π , поэтому у границы двух сред будет иметь место промежуточное состояние между пучностью и узлом.

Если звуковая волна падает на поверхность среды с большим акустическим сопротивлением (например, стена из мрамора), то непосредственно около нее скорость колебаний будет равна нулю, потому что частицы воздуха, подойдя к стене, будут останавливаться и затем двигаться назад. Это означает, что отраженная волна для скорости колебаний будет иметь противоположную фазу по отношению к падающей (сдвиг по фазе на π), т. е. у поверхности стены получается узел скорости колебаний. В то же время звуковое давление у поверхности стены будет иметь пучность, так как давления падающей и отраженной волн, как скалярные величины, складываются арифметически (сдвиг фаз равен нулю). Если акустическое сопротивление отражающей стены будет меньше, чем для воздуха, то картина меняется: у поверхности стены будет пучность скорости колебаний и узел давления, т. е. отраженная волна давления будет сдвинута на π , а отраженная волна скорости колебаний будет в фазе с падающей.

Следует заметить, что коэффициенты отражения зависят от угла падения волн: меньший коэффициент отражения получается при падении на отражающую поверхность под прямым углом. Он называется нормальным. В том случае, когда волны падают под всевозможными углами (рассеянная волна), коэффициент отражения (и поглощения) называют диффузным.

Звукопоглощающие материалы по строению делятся на сплошные и пористые, а по применению — на стеновые, облицовочные, драпировки и специальные. К пос-

ледним относятся, например, мембранные и резонаторные конструкции.

Сплошные материалы. Эти материалы (бетон, кирпич, мрамор, дерево и т. п.), как правило, твердые, т. е. имеют акустическое сопротивление значительно больше сопротивления воздуха. Поэтому их коэффициенты (7.21) очень малы, не более 5% (табл. 7.1). Некоторые из этих материалов (дерево, мрамор) используются и для стен, и как облицовочные. В последнем случае их коэффициент поглощения оказывается больше, чем в первом, так как происходит дополнительное поглощение из-за поперечных колебаний, возникающих в слое облицовочного материала. С увеличением частоты коэффициенты отражения от твердых сплошных материалов немного уменьшаются из-за некоторой шероховатости поверхности материалов и поэтому коэффициенты поглощения растут (см. табл. 7.1).

Таблица 7.

Материалы (объекты)	Коэффициент поглощения на частотах, Гц					
	125	250	500	1000	2000	4000
Стена, штукатуренная гипсом	0,013	0,015	0,020	0,028	0,040	0,050
Стена, штукатуренная, окрашенная	0,012	0,013	0,017	0,020	0,023	0,025
Акустическая штукатурка	0,22	0,27	0,31	0,31	0,33	0,40
Акустическая штукатурка типа АГШ	0,61	0,94	0,99	0,86	0,73	0,46
То же, типа АГШ-Б	0,99	0,78	0,73	0,76	0,60	0,59
Ковер с ворсом 1 см на бетоне	0,09	0,08	0,21	0,27	0,27	0,37
Резиновый ковер толщиной 0,5 см	0,04	0,04	0,08	0,12	0,03	0,10
Линолеум	0,02	0,025	0,03	0,035	0,04	0,045
Сосновая панель	0,098	0,110	0,100	0,087	0,082	0,110
Стекло ordinарной толщины	0,035	0,30	0,027	0,024	0,020	0,020
Мрамор	0,010	0,010	0,010	0,013	0,015	0,015
Драпировка вплотную к стене (бу-мажная ткань 500 г/м ²)	0,04	0,07	0,13	0,22	0,32	0,35
Щиты Бекешы (холст, натянутый по вате)	0,80	0,81	0,73	0,58	0,46	0,45
Один слушатель	0,33	0,41	0,44	0,46	0,46	0,46
Кресла, обитые бархатом, в расчете на 1 шт.	0,14	0,22	0,31	0,40	0,52	0,60
Два слушателя на 1 м ²	0,25	0,44	0,78	0,97	1,0	1,0
Три слушателя на 1 м ²	0,2	0,33	0,67	0,84	0,92	0,95

Из мягких сплошных материалов в качестве облицовочного материала используется только плотная резина. Ее акустическое сопротивление не очень велико, а коэффициент поглощения в среднем равен около 10% (см. табл. 7.1).

Пористые материалы. Эти материалы (штукатурки, облицовочные плиты с перфорацией и без нее, щиты, портьеры, ковры и т. п.) используются только

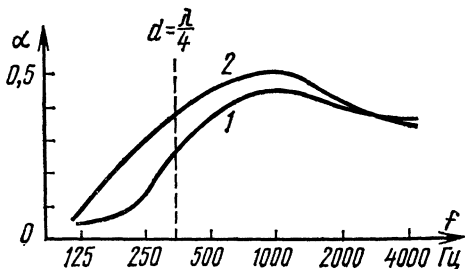
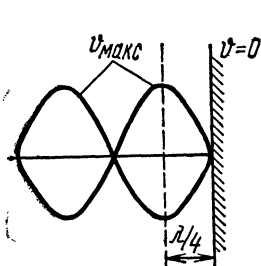


Рис. 7.6. К вопросу о поглощении пористым материалом

Рис. 7.7. Частотная зависимость коэффициента поглощения пористого материала:

1 — при расположении его вплотную у стены; 2 — на расстоянии 20 см от стены

как облицовочные и для драпировок, т. е. во всех случаях за ними располагаются (вплотную или на некотором расстоянии от них) ограждающие конструкции из сплошных материалов (стены, потолки, полы и другие перегородки).

При падении звуковых волн на перегородку из пористого материала необходимо учитывать отражение звука как от лицевой поверхности, так (для прошедших в нее волн) и тыльной с учетом поглощения звука в порах. Для материалов, хорошо проницаемых для звука, следует учитывать и возможность возвращения звуковых волн, отраженных от ограждающих конструкций, находящихся за рассматриваемой пористой перегородкой. Например, если за такой перегородкой с сквозными порами (матерчатый занавес, портьера и т. п.) находится твердая стена, то отраженные волны будут вторично проходить через перегородку. Поглощение в этом случае будет определяться только потерями на трение в порах материала перегородки с учетом вязкости материала, потому что звуковые волны не будут

отражаться от нее. Так как потери на трение пропорциональны скорости колебаний, то наименьшее поглощение будет получаться при расположении такой перегородки вплотную к твердой стене, потому что там будет узел скорости колебаний, т. е. скорость колебаний будет минимальной (рис. 7.6). Если перегородку расположить на небольшом расстоянии от твердой стены, то поглощение в общем случае будет больше. Максимальное поглощение получается при расположении перегородки в пучности скорости колебаний, которая будет находиться на расстоянии $1/4$ длины волны (см. рис. 7.6). Поэтому при удалении перегородки от стены коэффициент поглощения увеличивается, но не монотонно (см. рис. 7.7).

Для толстых слоев облицовки из пористого материала коэффициент поглощения получается достаточно большой из-за ряда факторов. Так как акустическое сопротивление таких материалов обычно близко к сопротивлению воздуха, то звуковые волны почти не отражаются от них (7.21). Звуковые волны, входя в поглощающий материал, будут испытывать большие потери энергии из-за вязкости материала, трения в порах, поэтому значительно ослабленными они будут достигать твердой стены, находящейся за ним. Скорость колебаний в узле, т. е. у стены, будет мало отличаться от скорости колебаний в пучности, и потери на этом участке хода звуковых волн будут также велики, как и в пучности. При обратном ходе звуковой волны будет также происходить поглощение энергии звуковых волн. Практически звуковая волна вернется в помещение значительно ослабленной, т. е. коэффициент поглощения будет большим. При этом на определенной частоте поглощение может быть очень большим (см. табл. 7.1).

Разработано много специальных поглощающих материалов с акустическим сопротивлением, близким к сопротивлению воздуха (например, АГШ — акустическая гипсовая штукатурка). Их коэффициенты поглощения на некоторых частотах близки к единице. Применяются слоистые конструкции из пористых материалов. Их слои подбирают так, чтобы получить как можно бóльший коэффициент поглощения.

Мембранные звукопоглощающие конструкции. Для тонкой перегородки из сплошных материалов поглощение определяется интенсивностью ее колебаний как целого (системы с сосредоточенными

постоянными) и как мембран (системы с распределенными постоянными). Первые наблюдаются на низких частотах, вторые — на средних и высоких. В обоих случаях поглощение зависит от частоты. Самый низкочастотный максимум поглощения получается на резонансной частоте, определяющейся массой и гибкостью перегородки (4.2). Выше этой частоты максимумы наблюдаются на всех резонансных частотах перегородки как мембраны. Эти частоты определяются поперечными размерами перегородки и скоростью распространения поперечных колебаний в ней. Поэтому поглощение растет с увеличением частоты немонотонно. Если потери в такой перегородке невелики, то максимумы и минимумы поглощения получаются очень резкими. Если увеличить потери, то частотная зависимость становится более монотонной и средний коэффициент поглощения растет. Для увеличения потерь под такую перегородку (панель) подкладывают демпфирующие материалы, например, войлок. Резонирующие панели, изготовленные из натянутого холста с войлочной подкладкой, называют щитами Бекеша. На рис. 7.8 показано устройство этих щитов. Подобные панели изготавливаются также из тонкой фанеры с поролоновым демпфером. Они бывают не только в виде плоских конструкций, но и в виде колонн и полуколонн. В зависимости от толщины фанеры или натяжения холста можно изменять частоту резонансов и таким образом получать максимумы поглощения в тех диапазонах частот, в которых требуется большее поглощение. Делаются они в основном для поглощения низких частот, хотя и на высоких частотах их коэффициент поглощения довольно высок (см. табл. 7.1).

Резонаторные звукопоглощающие конструкции. Широкое распространение получили конструкции, построенные по принципу резонаторов Гельмгольца (рис. 7.9). Они эффективно поглощают звуковую энергию на частотах вблизи их резонансной частоты.

Эффективность поглощения таких резонаторов определяется потерями в горле резонатора, где скорость колебаний максимальна. Там и должен быть расположен материал, вносящий затухание в колебания, например, имеющий высокое внутреннее трение (вязкость). В практике для подобных резонаторов используют различные ниши, выходные отверстия которых затягивают тканью. Подобные резонансные поглотители выполняют

также в виде больших щитов (во всю стену или потолок) с отверстиями, затянутыми тонкой металлической сеткой. Отверстия иногда делают разных размеров и



Рис. 7.8. Разрез щита Бекеша:

1 — натянутый холст; 2 — толстая фанера; 3 — войлок

на разных расстояниях, в результате чего получаются наборы резонаторов. Заметим, что стенки между резонаторами могут и не ставиться, так как тангенциальные составляющие звуковых волн в них обычно невелики (см. [2], с. 141).

Большие неровности на стенах и большие выступы, различные предметы, находящиеся в помещении, поглощают звуковую энергию с учетом эффекта дифракции. При расчетах эти поглощения обычно включают в пог-

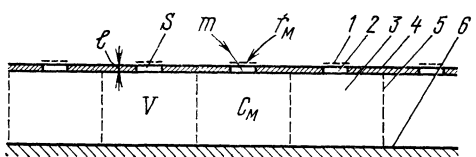


Рис. 7.9. Резонаторный поглотитель:

1 — металлическая сетка для внесения потерь в резонатор; 2 — отверстие резонатора с площадью S и длиной l_0 ; 3 — объем резонатора V с гибкостью C_M ; 4 — металлический лист толщиной l ; 5 — воображаемая граница между резонаторами; 6 — жесткая стена

лощение ближайших к ним ограждающих конструкций. Например, поглощение плотно расположенными слушателями добавляют к поглощению поверхности, на которой они находятся. Коэффициент поглощения слушателей при различной плотности их размещения на поверхности приведен в табл. 7.1. Там же даны коэффициенты поглощения отдельно находящихся людей.

7.5. ЗВУКОИЗОЛЯЦИЯ ПОМЕЩЕНИЙ

Звукоизоляция помещений определяет уровень проникающих извне шумов. Для студий, измерительных камер, сурдокамер и т. п. требуется высокая звукоизоляция от внешних шумов и вибраций, создающих акустические шумы. Звукоизоляция требуется и для концерт-

зных залов, театров, аудиторий, комнат для прослушивания и, наконец, жилых помещений.

Рассмотрим наиболее характерный случай: проникновение шумов из одного помещения в другое через разделяющую их перегородку.

При падении звуковых волн с интенсивностью $I_{\text{пад}}$ на какую-либо перегородку больших размеров по сравнению с длиной звуковой волны интенсивность их с другой стороны перегородки $I_{\text{пр}}$ в отсутствие отражения звука в другом помещении будет определяться только проводимостью перегородки. Эта проводимость характеризуется коэффициентом звукопроводности

$$\alpha_{\text{пр}} = I_{\text{пр}}/I_{\text{пад}} \quad (7.22)$$

или звукоизоляцией перегородки в децибелах:

$$Q_{\text{пер}} = 10 \lg \frac{1}{\alpha_{\text{пр}}} = 10 \lg \frac{I_{\text{пад}}}{I_{\text{пр}}} = L_{\text{пад}} - L_{\text{пр}}, \quad (7.22a)$$

где $L_{\text{пад}}$ и $L_{\text{пр}}$ — уровни интенсивности звуковых волн, падающих на перегородку и прошедших через нее.

Звуковые колебания, проникая в помещение, претерпевают отражения от его внутренних поверхностей, поэтому в нем увеличивается интенсивность звука. Можно считать, что произведение интенсивности звука $I_{\text{пр}}$, прошедшего через какую-либо перегородку, на ее поверхность $S_{\text{пр}}$ будет представлять собой мощность источника звука для прошедших колебаний:

$$P_a = I_{\text{пр}} S_{\text{пр}}.$$

В таком случае плотность энергии в помещении для этих колебаний ¹⁾ (7.3)

$$\epsilon_m = \frac{P_a}{c \alpha_{\text{ср}} S} = \frac{I_{\text{пр}} S_{\text{пр}}}{c \alpha_{\text{ср}} S},$$

где $\alpha_{\text{ср}} S = A$ — общее поглощение ограничивающих поверхностей помещения (7.5). Отсюда находим, что уровень звука в помещении (2.5)

$$L_2 = 10 \lg \frac{\epsilon_m}{\epsilon_0} = 10 \lg \frac{I_{\text{пр}} S_{\text{пр}}}{\epsilon_0 c \alpha_{\text{ср}} S}.$$

¹⁾ При условии большой проводящей поверхности средняя длина свободного пути между двумя отражениями равна V/S вместо (7.1): $l_{\text{ср}} = 4V/S$.

Так как согласно (1.11) $\epsilon_0 c = I_0$ (где $I_0 = 10^{-12}$ Вт/м² — интенсивность, соответствующая нулевому уровню), то $10 \lg(I_{\text{пр}}/I_0) = L_{\text{пр}}$ является уровнем звуковых волн, прошедших через перегородку. Следовательно, уровень интенсивности звука в помещении

$$L_2 = L_{\text{пр}} + 10 \lg(S_{\text{пр}}/\alpha_{\text{ср}}S). \quad (7.23)$$

Из этого выражения следует, что величина $10 \lg(S_{\text{пр}}/\alpha_{\text{ср}}S)$ представляет собой приращение уровня интенсивности в помещении из-за отражений звука от ограничивающих поверхностей помещения.

Разность между уровнями звука с внешней стороны ограждающей конструкции помещения L_1 и внутри помещения L_2 называют звукоизоляцией помещения

$$Q_{\text{из}} = L_1 - L_2 = 10 \lg(I_1/I_2). \quad (7.24)$$

Здесь I_1 и I_2 — интенсивности звука, соответствующие уровням (2.3): $L_1 = 10 \lg(I_1/I_0)$ и $L_2 = 10 \lg(I_2/I_0)$. Так как уровень интенсивности звука с внешней стороны ограждающей конструкции представляет собой уровень звуковых волн, падающих на ее внешнюю поверхность, т. е. $L_1 = L_{\text{пад}}$, то из (7.24) и (7.23) с заменой $L_{\text{пад}} - L_{\text{пр}}$ на $Q_{\text{пер}}$ (7.22а) получаем звукоизоляцию помещения

$$Q_{\text{из}} = Q_{\text{пер}} - 10 \lg(S_{\text{пр}}/\alpha_{\text{ср}}S). \quad (7.25)$$

Таким образом, получили, что звукоизоляция помещения определяется звукопроводностью ограждающих конструкций (7.22а) и поправкой $10 \lg \frac{S_{\text{пр}}}{\alpha_{\text{ср}}S}$ на увеличение уровня интенсивности прошедшего звука из-за отражений от внутренних поверхностей помещения. Эта поправка определяется отношением поверхности звукопроводящей перегородки $S_{\text{пр}}$ к общему поглощению помещения $\alpha_{\text{ср}}S$. В гулком помещении звукоизоляция будет резко снижаться из-за увеличения шума вследствие отражений. В сильно заглушенных помещениях звукоизоляция будет определяться только звукопроводностью перегородки. Заменяем в (7.25) величину $Q_{\text{пер}}$ соответственно (7.22а), тогда для звукоизоляции помещения имеем

$$Q_{\text{из}} = 10 \lg(\alpha_{\text{ср}}S/\alpha_{\text{пр}}S_{\text{пр}}) = 10 \lg(A/A_{\text{пр}}), \quad (7.26)$$

где $A_{\text{пр}} = \alpha_{\text{пр}}S_{\text{пр}}$ — проводимость перегородки; $A = \alpha_{\text{ср}}S$ — общее поглощение помещения. В результате получили, что звукоизоляция помещения определяется

отношением общего поглощения помещения к проводимости перегородки.

Полагая независимым прохождение звуковых волн через сложную перегородку, состоящую из ряда участков с разной их звукопроводностью, можно считать, что общая мощность прошедших звуковых колебаний будет равна сумме потоков энергии через каждый из участков перегородки:

$$P_a = \sum_{(k)} I_{\text{пр.к}} S_{\text{пр.к}},$$

где $I_{\text{пр.к}}$ — поток энергии через единицу k -й поверхности размером $S_{\text{пр.к}}$.

Аналогично предыдущему случаю (7.26) получаем для сложной перегородки, что звукоизоляция помещения

$$Q_{\text{пз}} = 10 \lg \left(\alpha_{\text{ср}} S / \sum_{(k)} \alpha_{\text{пр.к}} S_{\text{пр.к}} \right) = 10 \lg (A/A_{\text{пр}}), \quad (7.27)$$

т. е. определяется отношением общего поглощения помещения к общей проводимости сложной перегородки:

$$A_{\text{пр}} = \sum_{(k)} \alpha_{\text{пр.к}} S_{\text{пр.к}}. \quad (7.28)$$

Пути прохождения звука через ограждающие конструкции следующие: через сквозные поры, щели и т. п. (воздушный перенос), через материал перегородки в виде продольных колебаний его частиц (материальный перенос) и через поперечные колебания перегородок, похожих на колебания мембран (мембранный перенос), которые часто можно приближенно рассматривать как колебания всей перегородки в целом. Резонансная частота такой колебательной системы очень низкая, поэтому в звуковом диапазоне частот перегородку можно рассматривать как инерционное сопротивление, определяемое всей ее массой. Коэффициент звукопроводности обратно пропорционален этой массе. Таким образом, при мембранном переносе хорошо проходят через перегородку звуковые колебания низких частот. С увеличением частоты проводимость перегородки уменьшается пропорционально частоте. При материальном переносе проводимость перегородки определяется отношением удельных акустических сопротивлений воздуха и материала перегородки, которые почти не зависят от частоты, поэтому и проводимость практически не будет

зависеть от частоты. Воздушный перенос определяется размерами пор (щелей и т. п.), их распределением по поверхности перегородки и трением воздуха о стенки пор. Если имеются одна или несколько щелей, удаленных друг от друга на расстояние не меньше длины звуковой волны в воздухе, то из-за дифракции звуковые волны, падающие на соседние с щелью участки перегородки на расстоянии от нее не более половины длины волны, будут частично также уходить в щели. Проводимость перегородки в этом случае будет значительно больше на низких частотах, чем на высоких. С увеличением частоты растут потери на трение в порах. Это также уменьшает проводимость, поэтому интенсивность звуковых колебаний, проникающих через перегородку, с увеличением частоты также падает. Если поры расположены часто, но имеют такую же общую площадь, как и в первом случае, то частотная зависимость проводимости перегородки будет проявляться в меньшей степени и только из-за потерь на трение в порах.

Количественное определение звукопроводности перегородок проводится с учетом всех видов переноса звуковых колебаний. Соответствующие данные приведены в табл. 7.2.

Т а б л и ц а 7.2

Материалы и конструкции перегородок	Толщина, мм	Звукоизоляция, дБ
Плотная кирпичная кладка (1/2 кирпича со штукатуркой)	140	47
То же в два кирпича	520	59
Стекло	6	31
Фанера тройная	7	21
Доска сплошная дубовая	45	27
Войлок	100	19
Деревянная стена с воздушным промежутком 5 см	90	12
Шлаковый блок со штукатуркой	200	56
Окно двойное, плотно закрытое		25
Дверь двойная		27
Двери с тамбуром		30

Для уменьшения воздушного переноса необходимо тщательно следить за устранением различного рода отверстий и щелей в перегородках.

Рассмотрим такой пример. Имеется кирпичная стена толщиной 20 см, ее звукоизоляция составляет 50 дБ, т. е. коэффициент звукопроводности $\alpha_{\text{пр}} = 10^{-5}$. Если поверхность стены $S_{\text{пр}} = 10 \text{ м}^2$, то общая проводимость ее $A_{\text{пр}} = 10 \cdot 10^{-5} = 10^{-4} \text{ м}^2$. Сделаем в этой стене отверстие размером в 1 см^2 (10^{-4} м^2). Его проводимость без учета дифракции будет равна $1 \cdot 10^{-4} = 10^{-4} \text{ м}^2$, т. е. равна проводимости стены. Из-за дифракции поток энергии, падающий на стену вблизи отверстия (в радиусе около $\lambda/2$), будет частично уходить в это отверстие. На низких частотах отверстие как бы будет расширено в десятки раз. Поэтому проводимость такого отверстия на низких частотах будет во много раз больше проводимости самой стены.

Для уменьшения материального переноса необходимо брать слоистые конструкции стен и перегородок из материалов с резко отличающимся удельным акустическим сопротивлением (бетон + поролон и др.). Для уменьшения мембранного переноса необходимо стремиться к увеличению массы перегородки. Для уменьшения шумов от вибрации перегородки применяют различного рода виброизолирующие прокладки. Проникновение шумов через вентиляционные каналы устраняют заглушением, т. е. покрытием стенок каналов поглощающими материалами, а также применением различного рода акустических фильтров (см. [1], § 8.4). Особые требования к звукоизоляции студий и измерительных камер будут рассмотрены далее.

Г л а в а 8

СТУДИИ ЗВУКОВОГО И ТЕЛЕВИЗИОННОГО ВЕЩАНИЯ

8.1. ТИПЫ СТУДИЙ

Радиостудии (студии звукового вещания) делятся на большие концертные, средние, малые концертные, камерные, речевые и литературно-драматические. Последние обычно бывают в виде блока студий. Телестудии (студии телевизионного вещания) делятся на такие же типы. Только в телецентрах вместо литературно-драматического блока есть комплекс постановочных студий. Поскольку требования к радио- и телестудиям, кроме

студий литдрамблока и постановочных студий, одинаковы, рассмотрим требования к концертным, камерным и речевым студиям радиодомов и телецентров вместе. Следует еще указать на то, что в радиодомах и телецентрах есть радио- и телетеатры. Требования к ним также одинаковы.

В соответствии с назначением, студии имеют различные объем и площадь пола. Большие концертные студии имеют объем от 3000 до 6000 м³ с площадью пола от 400 до 500 м², средние студии — от 1500 до 3000 м³ с площадью пола от 250 до 300 м², малые концертные студии — от 750 до 1500 м³ с площадью пола 150—200 м², камерные студии — от 200 до 500 м³ с площадью 50—80 м², речевые — соответственно 50—100 м³ и 15—20 м². Это примерная градация объемов и площадей. Объем радио- и телетеатров не нормирован. Он, как правило, больше самой большой студии, например, в ряде радиодомов достигает 10 000 м³ и более.

Литературно-драматический блок содержит несколько студий разных размеров объемом до 500—800 м³ с обязательным включением в него сильно заглушенной и гулкой студий (объемами 100—150 и 80—100 м³ соответственно), а также студий для воспроизведения различных звуковых эффектов, шума и т. п. Постановочные телестудии имеют большой объем — от 3000 до 6000 м³ при высоте 10—12 м для возможности установки в них нескольких декораций одновременно (для быстрого перехода от одной сцены к другой). Таких студий бывает несколько в зависимости от объема передач. Число студий в радиодомах и телецентрах определяется количеством программ.

Поэтому небольшие радиодома и телецентры имеют меньшее разнообразие типов студий.

8.2. АКУСТИЧЕСКИЕ ХАРАКТЕРИСТИКИ СТУДИЙ

Студии являются связанными помещениями, поэтому их акустические характеристики определяются в зависимости от акустических характеристик помещений, в которых будут прослушивать передачи. Такие помещения очень разнообразны, разнообразны и их акустические свойства. В литературе даются самые разнообразные рекомендации по акустическим свойствам студий, потому что исследователи и разработчики ориентируются

на акустические характеристики конкретных комнат прослушивания радиодомов и залов просмотра телецентров. Например, было установлено, что оптимальное время реверберации в малых концертных студиях не должно быть менее 0,75 с, а в студиях с объемом 3000 м³ оно должно быть независимым от объема и равным 1,7 с. В этих рекомендациях было учтено, что микрофон в студиях находится ближе к исполнителю программы, чем слушатель, находящийся в театрах, концертных залах, аудиториях и лекционных залах, поэтому эквивалентная реверберация, воспринимаемая через микрофон из студии, получается несколько меньше, чем при слушании непосредственно в театре, аудитории и т. п., имеющих тот же объем, как и студия. В результате ряда исследований были получены обобщенные данные, по которым оптимальная реверберация на частоте 500 Гц для концертных студий имеет зависимость от объема студий, приведенную на рис. 8.1. Приближенное значение $T_{\text{опт}}$ для студий, предназначенных для концертных программ, можно найти из формулы ¹⁾ $T_{\text{опт}} = 0,51 \lg V_{\text{м}^3} - 0,15$, где V — объем студии, м³.

В отношении частотной зависимости оптимальной реверберации наиболее близка к истине рекомендация небольшого подъема в сторону низких частот: $T_{\text{опт}} [125 \text{ Гц}] / T_{\text{опт}} [500 \text{ Гц}] = 1,5 \div 1,6$ (рис. 8.2, см. верхнюю границу зоны). Допускается и равномерная характеристика в этом диапазоне частот. Снижение времени реверберации в сторону низких частот не допускается, так как это ухудшает качество звучания. На высоких частотах желательно иметь также небольшой (до 40%) подъем этой характеристики. Для больших студий на частотах выше 2000 Гц трудно выполнить эту рекомендацию из-за уменьшения времени реверберации вследствие затухания звука в воздухе. Поэтому рекомендуется поддерживать время реверберации равномерным (без учета этого затухания) и даже с небольшим спадом к высоким частотам с тем, чтобы фактическое время реверберации было бы не менее 1 с на частотах 8000—10 000 Гц.

¹⁾ Сравнивая эту формулу с ф-лой (7.20), видим, что для концертных студий $T_{\text{опт}}$ получается на 0,15 с больше, чем для концертных залов с тем же объемом в расчете на уменьшение эквивалентной реверберации из-за приближения микрофона к источнику звука.

Одно из важных требований к студиям — наличие в них поля, по возможности близкого к диффузному. Трудность осуществления этого требования осложняется тем, что время реверберации в студиях невелико, а

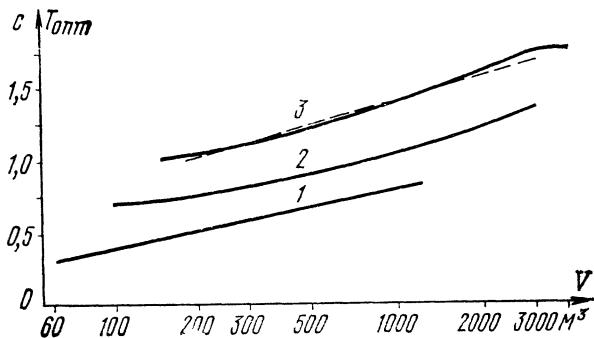


Рис. 8.1. Зависимость оптимальной реверберации от объема студий: 1 — для речевых передач; 2 — для малых музыкальных форм; 3 — для концертных программ. Пунктиром дана приближенная аналитическая зависимость

поэтому средний коэффициент поглощения довольно велик. Как было показано ранее (см. § 7.2), при таком условии энергия в помещении распределяется неравно-

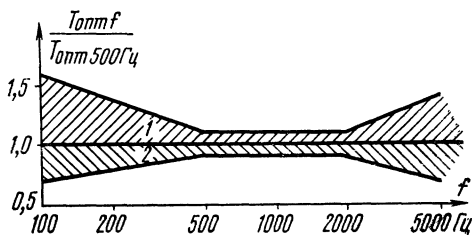


Рис. 8.2. Частотная зависимость оптимальной реверберации:

1 — для музыкальных программ; 2 — для речевых передач

мерно. Это приводит к частотным искажениям, так как в зависимости от частоты распределение энергии по помещению изменяется и при одинаковой излучаемой мощности на разных частотах уровень у микрофона будет разным.

Применением различного рода звукорассеивающих конструкций, равномерного распределения поглощающего материала и т. п. удастся достигнуть хорошего приближения к диффузности.

Для речевых студий оптимальное время реверберации определяется следующим условием: студия как

связанное помещение практически не должна увеличивать время реверберации во вторичном помещении, т. е. в помещениях, где слушают программу, например в жилом помещении, при условии наименьшего времени реверберации в нем. Оптимальное время реверберации для речевых студий примерно равно 0,4—0,5 с. При передаче речи из студий с большим объемом и для создания эффекта звучания речи в большом помещении это время увеличивают до 0,7—0,8 с.

Оптимальная частотная характеристика для речевых студий равномерна во всем диапазоне частот (рис. 8.2, см. верхнюю границу зоны 2): допускается небольшой спад в сторону высоких (не более 30%) и низких частот. Подъем частотной характеристики на низких частотах ни в коем случае не допускается, так как при этом снижается разборчивость речи (см. гл. 10).

В литературно-драматическом блоке основная студия имеет большие размеры, так как для радиопостановок необходимы массовые сцены с большим числом участников. Так как в основном в этих студиях необходимо обеспечить высокую разборчивость речи, то время реверберации следует брать небольшим. Из опыта установлено, что это время должно быть 0,5—0,6 с.

В основной студии литдрамблока время реверберации так же, как и в речевых студиях, не должно зависеть от частоты (допускается небольшое снижение в обе стороны от частоты 500 Гц). Заглушенная студия, входящая в литдрамблок, должна иметь возможно меньшее время реверберации (0,2—0,25 с) для создания эффекта передачи из открытого пространства и условий отсутствия реверберации. Гулкая студия должна имитировать сцены в гулком помещении (вокзал, церковь и т. п.), и поэтому время реверберации в ней должно быть не менее 3—3,5 с в средней полосе частот с увеличением в сторону низких частот и с уменьшением в сторону высоких.

Устройства звуковых эффектов могут располагаться внутри студии или в отдельной студии, или в этих же трех типах студий. Акустические характеристики телевизионных постановочных студий определяются из условий их соответствия передаваемой обстановке с учетом того, что микрофоны приходится располагать сравнительно далеко от исполнителей, чтобы они не попадали в кадр (1—1,5 м для крупных планов и 3—4 м для общих планов). Чтобы акустика студии влияла как

можно меньше, время реверберации берется небольшим (0,7—0,8 с), а затем вводится искусственная реверберация до получения оптимума для заданного исполнения.

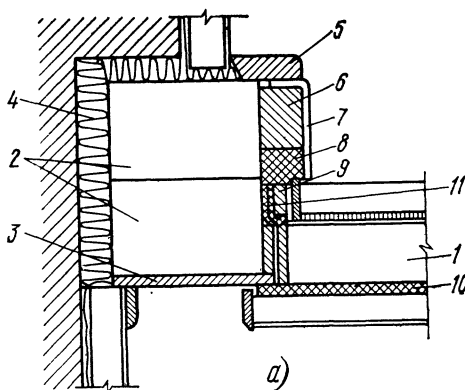
Оптимальное время реверберации для радио- и телеатров берут с небольшим уменьшением по сравнению с обычными театрами и концертными залами (не более 10%): для компенсации его увеличения из-за связанности с жилым помещением и вследствие близости микрофона к исполнителям.

Акустические характеристики комнат и залов для прослушивания, вообще говоря, должны удовлетворять требованиям, соответствующим тем условиям, в которых находятся абоненты радиосети (небольшое помещение с временем реверберации около 0,6—0,7 с).

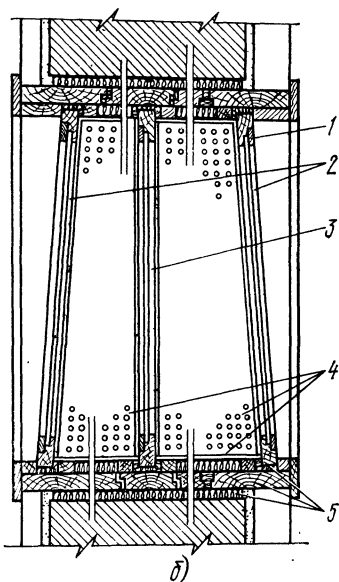
8.3. ЗВУКОИЗОЛЯЦИЯ СТУДИЙ

Звукоизоляция студий определяет максимально допустимый уровень акустических шумов, ограничивающий передаваемый динамический диапазон сигнала снизу. Так как этот уровень мал (не должен превышать 30 дБ), то необходимо принимать меры в отношении тщательной изоляции студий от шума. Радиодомы и телецентры должны располагаться на тихих улицах. Студии должны располагаться в уединенных местах зданий, подальше от проезжей части наиболее тихой улицы. Предпочтительны первый и цокольный этажи. Студии должны быть удалены от шумных помещений. Нельзя располагать студии в смежных помещениях. Должны применяться специальные двойные двери с уплотнителями (рис. 8.3а), «плавающие» полы и подвесные потолки (рис. 8.4). Студии первого и цокольного этажей должны иметь отдельный фундамент, изолированный от основного. Все студии снабжаются тамбурами для прохода в них из коридоров, аппаратные должны быть отделены от студий просмотровым окном из трех рам с непараллельными стеклами во избежание резонанса объема между стеклами (рис. 8.3б).

Так как в студиях отсутствуют окна, то единственным способом очистки воздуха должна быть специальная мощная приточно-вытяжная вентиляция (особенно в телестудиях, в которых обычно в работе участвует большое количество людей и включены мощные светильники). В настоящее время во многих студиях применяется кондиционирование. Устройства кондициони-



а)



б)

рования воздуха и обычная приточно-вытяжная вентиляция создают высокие уровни шумов.

Шумы создаются как самими вентиляторами, так и их двигателями, а также из-за турбулентности потока воздуха вследствие больших скоростей этих двигателей.

Акустические шумы ослабляют с помощью акустических фильтров и путем облицовки стенок вентиляционных каналов поглощающими материалами. Та-

Рис. 8.3. Конструкция студийных дверей и окон:

а) двери (1 — дверное полотно, 2 — бруски коробки, 3 — дубовая облицовка, 4 — минеральный войлок, 5 — наличник, 6 — накладка, 7 — скоба, 8 — накладка, 9, 10 — губчатая резина, 11 — прорезиненная ткань); б) смотровые окна (1 — пористо-губчатая резина, 2 — стекло зеркальное толщиной 8 мм, 3 — то же, 10 мм, 4 — звукопоглощающая конструкция, 5 — минеральный войлок)

кая облицовка снижает интенсивность шумов по длине каналов по экспоненциальному закону, т. е. линейному, в логарифмическом масштабе (затухание составляет от 0,16 до 0,8 дБ/м в зависимости от вида облицовки каналов). Акустическими фильтрами (см. табл. 4.4г и д, а также [1], § 8.4) не всегда удается снизить уровни вентиляционных шумов до приемлемых значений. Приме-

няют дополнительные устройства снижения шума. Из-за громоздкости всех этих сооружений трудно добиться достаточного снижения уровня шумов.

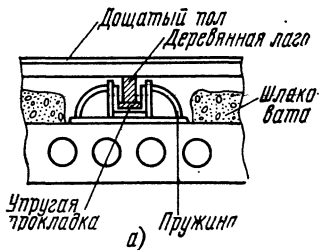
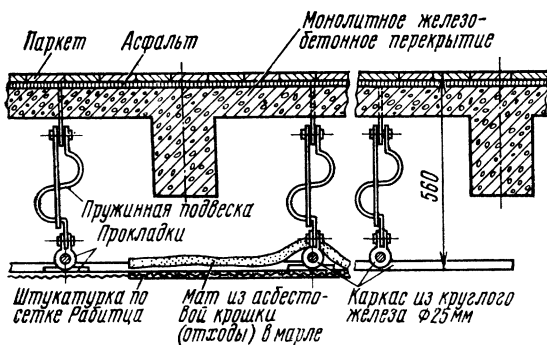


Рис. 8.4. Конструкция:
а) плавающих полов; б) подвесных потолков



б)

Для снижения уровня шумов от вибраций двигателя приходится принимать специальные меры по виброизоляции. В основном эти шумы ослабляют с помощью виброизоляционных прокладок под двигателями.

8.4. ЭЛЕКТРОАКУСТИЧЕСКОЕ ОБОРУДОВАНИЕ СТУДИЙ И КОМНАТ ПРОСЛУШИВАНИЯ

Электроакустическая аппаратура. Это оборудование состоит из микрофонов, громкоговорящих систем в аппаратной (аналогичных системам в комнатах прослушивания) и устройств регулировки времени реверберации в студиях.

Число микрофонов для каждой программы определяет звукорежиссер. Необходимо иметь комплект микрофонов с разными характеристиками направленности и с разными частотными характеристиками (речевых и концертных). В больших студиях их число доходит до 15—20 штук. Акустические громкоговорящие системы должны удовлетворять требованиям высшего или первого класса качества. Для прослушивания речевых пере-

дач целесообразно использовать также бытовые громкоговорители высшего или первого класса. Так как ряд передач идет в стереофоническом варианте, то в студиях должно быть предусмотрено наличие стереомикрофонов, а в аппаратных должны быть установлены системы для стереоозвучания. В речевых студиях у диктора должен быть резервный микрофон.

Комнаты прослушивания и аппаратные оборудуют как высококачественными акустическими системами, так и типовыми громкоговорителями для вещания. Комнаты прослушивания вещательных передач должны по акустике соответствовать жилому помещению.

Устройства для регулирования времени реверберации. Регулирование времени реверберации осуществляют изменением количества поглощающих материалов, а также величиной их коэффициентов поглощения. На практике это достигается сменой поглощающих материалов, применением различных поворотных устройств, закрыванием отражающих стенок из поглощающих материалов и т. п. Но эти методы очень громоздки, требуют сложной механизации и много времени для их регулировки. Теперь широко применяют устройства искусственной реверберации. К ним относятся: эхо-комнаты, магнитные и листовые ревербераторы и амбиофонические устройства.

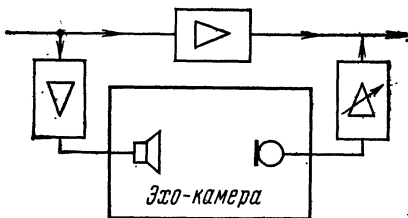


Рис. 8.5. Схема подмешивания реверберирующего сигнала в основной сигнал

Сигнал, подаваемый на вход устройства искусственной реверберации, подвергают обработке в результате которой получается сигнал, в той или иной степени похожий на получаемый в помещении с определенным, как правило, большим временем реверберации. Полученный сигнал подмешивают к основному, идущему по параллельному каналу (см. рис. 8.5). Эффект соответствующего времени реверберации создается или путем изменения соотношения между основным и подмешиваемым сигналами или путем изменения времени реверберации в самом устройстве. Рассмотрим отдельно устройства искусственной реверберации.

Эхо-камера. На рис. 8.5 дана схема включения эхо-камеры. Время реверберации эхо-камеры обычно постоянно, поэтому эффект гулкости можно вводить в передачу только путем изменения соотношения между основным и подмешиваемым сигналами.

Иногда в эхо-камерах можно создавать два значения времени реверберации, наибольшее из которых не менее 7 с. Камеры имеют объем около 80—100 м³. Для получения диффузного поля звука стены должны быть непараллельны друг другу. В больших радиодомах бывает до 2—3 эхо-камер. Способ получения искусственной реверберации с помощью эхо-камер считается дорогим и громоздким.

Магнитный ревербератор. Магнитный ревербератор (рис. 8.6) представляет собой магнитофон с одной записывающей головкой, несколькими воспроизводящими,

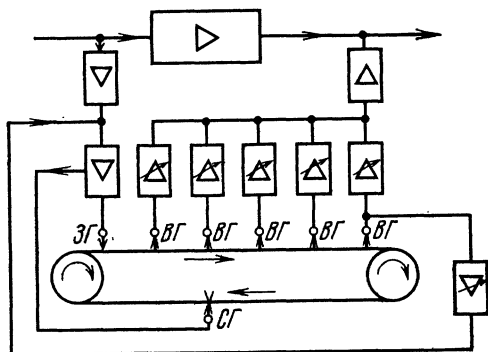


Рис. 8.6. Магнитный ревербератор:

ЗГ — записывающая головка; ВГ — звуковоспроизводящая головка; СГ — стирающая головка

смещенными относительно записывающей головки на разные интервалы, и стирающей головки. Передача непрерывно записывается на кольцо из магнитной ленты. Эта запись считывается воспроизводящими головками с разной задержкой во времени и затем после считывания стирается. На схеме показаны пять воспроизводящих головок, каждая из которых воспроизводит записанный сигнал, запаздывающий по отношению к основному на время, соответствующее сдвигу головки по длине ленты. Сигнал с пятой головки, кроме того, подается через цепь обратной связи на вход и записывается снова с соответствующей задержкой во времени и с уменьшением уровня записи по сравнению с уровнем первичной записи. Затем весь процесс повторяется. Таким образом, ревербератор создает многократно повто-

ряющиеся сигналы с запаздыванием по отношению к основному сигналу. Эти сигналы с соответствующим соотношением их уровней вводятся в основной канал передачи. Недостатком магнитного ревербератора является наличие тональной окраски отзвуков, обусловленных регулярной повторяемостью запаздывающих сигналов. Магнитный ревербератор дает возможность изменять время реверберации от 0,5 до 5 с. Более высокие значения времени реверберации могут приводить к появлению генерации из-за обратной связи.

Магнитный ревербератор применяют только для речевых передач и в случаях создания эффекта от действия шумов в гулком помещении.

Листовой ревербератор. Для листового ревербератора (рис. 8.7) используют стальной лист толщиной 0,4—0,5 мм размерами 1×2 м. Лист подвешен вертикально и закреплен в углах рамы. Сигнал подают к

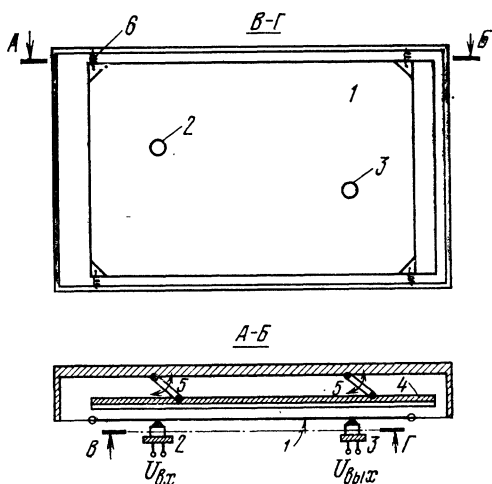


Рис. 8.7. Листовой ревербератор:

1 — тонкий стальной лист; 2 — двигатель (головка громкоговорителя); 3 — приемник (звукосниматель); 4 — панель с звукопоглощающим материалом; 5 — поворотное устройство для изменения расстояния панели от листа; 6 — подвеска листа

электродинамическому возбудителю (он похож на электродинамический громкоговоритель, у которого вместо диффузора к звуковой катушке приварен металлический лист). Колебания от точки крепления возбудителя расходятся к краям листа, отражаются от них, в результате чего образуется сложная картина поперечных колебаний, аналогичных колебаниям мембраны. В одной из точек, удаленных от возбудителя (для уменьшения действия прямого звука), к листу прикреплен звуко-

сниматель, аналогичный звукоснимателям 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) с тыльной стороны листа расположен демпфирующий материал (поглотитель). В зависимости от расстояния между листом и материалом изменяется затухание, вносимое в колебания листа. Время реверберации меняется от 0,6—0,7 до 5,5—6 с в области средних частот. При большом расстоянии листа от поглотителя время реверберации увеличивается до 16 с на низких частотах, на высоких же 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. Зато по качеству звучания он приближается к звучанию в помещении. Имеющиеся отклонения от звучания в помещении можно объяснить тем, что в листовом ревербераторе имеем дело с двухмерным распределением собственных частот, а не с трехмерным, как это требуется для помещения. Листовой ревербератор используют при передаче и некоторых художественных программ (например, литературно - драматических).

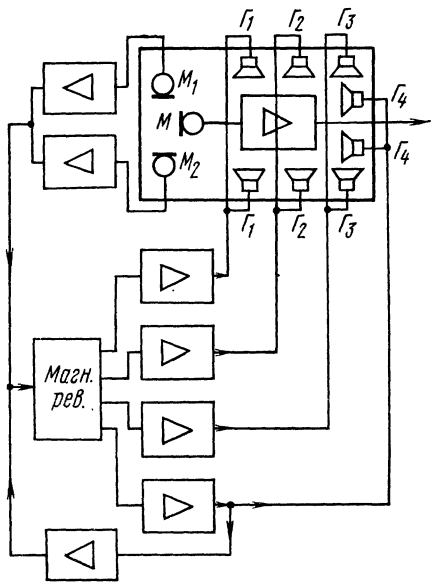


Рис. 8.8. Схема амбиофонической системы с магнитным ревербератором и обратной акустической связью

Амбиофонические системы. В этих системах используют акустическую обратную связь, возникающую в том же помещении, откуда ведется передача, поэтому ее действие ощущают и сами исполнители.

В амбиофонической системе (рис. 8.8), кроме основных микрофонов, в студии устанавливают не менее двух дополнительных M_1 , M_2 , удаленных от исполнительей. Сигнал от них подают в отдельные каналы звуковоспроизведения с громкоговорителями, находящимися в той же студии в различных ее точках. Излучение громкоговорителей имитирует отраженные лучи. Эти отраженные лучи воспринимаются дополнительными микрофонами и вновь подаются на громкоговорители. Многократное повторение отзвуков создает увеличение времени реверберации помещения по отношению к собственному. Если студия была сильно заглушена, то амбиофоническая система дает возможность увеличить время реверберации до 5—7 с. Получение большего времени реверберации (более 3—4 с) может приводить к неустойчивому режиму и даже к генерации. К тому же даже для создания эффекта гулкого помещения, в котором воспроизводится музыка (например, органная зала), большего времени реверберации и не требуется. Для уменьшения возможности возникновения такой генерации применяют отдельное амбиофоническое устройство для разных участков частотного диапазона. Устройство получается громоздким. Иногда для уменьшения числа громкоговорителей применяют, например, комбинацию акустической системы с магнитным ревербератором (с подачей обратной связи через помещение). Аналогичные системы применяют для регулирования времени реверберации в залах. В СССР такая амбиофоническая система применена во Дворце съездов и на ряде студий.

Г л а в а 9

ОЗВУЧЕНИЕ И ЗВУКОУСИЛЕНИЕ¹⁾

9.1. ОСНОВНЫЕ ПОКАЗАТЕЛИ СИСТЕМ ОЗВУЧЕНИЯ

Озвучением называют громкоговорящее воспроизведение акустических сигналов (вещания, звукозаписи, различной информации, в том числе сигналов оповещения гражданской обороны, и др.) в заданных местах

¹⁾ Подробно эти вопросы рассмотрены в [7] для открытого пространства и в [9] для помещений.

расположения слушателей в помещении или на открытом воздухе.

Максимальный и минимальный уровни поля — это максимальный и минимальный уровни звука $L_{\text{макс}}$ и $L_{\text{мин}}$, создаваемые системой озвучения в точках озвучиваемой поверхности, при подведении номинальной мощности к системе озвучения. Обычно эти уровни определяют только для прямого звука, т. е. без учета отраженных волн, так как последние в основном являются помехами. *Озвучиваемой поверхностью* называется поверхность, проходящая на уровне голов слушателей. Для сидящих слушателей считают, что эта поверхность проходит на высоте 1 м от пола, а для стоящих — на 1,5 м.

Максимальный и минимальный уровни звука зависят от назначения системы озвучения. Например, для создания полного эффекта звучания симфонического оркестра необходимо воспроизводить уровни, близкие к уровням, создаваемым оркестром, конечно, с учетом технических и экономических возможностей. Такие уровни можно получить, если система озвучения (при подведении к громкоговорителям номинальной мощности) будет создавать минимальный уровень поля в пределах озвучиваемой поверхности не ниже 90 дБ по прямому звуку (см. табл. 2.1). Назначение музыки, звучащей в аллеях парка, — создавать музыкальный фон. В этом случае максимальный уровень поля не должен быть выше 55—60 дБ. С учетом возможности передачи информации обычно берут запас по уровню на 10 дБ.

Необходимые уровни для речевых передач определяются понятностью речи, поэтому их не нормируют.

Понятность речи определяется только для информационных передач в точках с минимальным уровнем поля и максимальным уровнем акустических шумов (подробно см. гл. 10).

Неравномерность озвучения — разность между максимальным и минимальным уровнями поля для прямого звука $\Delta L = L_{\text{макс}} - L_{\text{мин}}$. Эта величина в общем случае делится на две части: основную и интерференционную. Первая часть определяется распределением уровней поля прямого звука по озвучиваемой поверхности, вторая — обусловлена интерференцией звуковых волн, приходящих от разных излучателей, в результате которой уровень поля изменяется от точки к точке, то повышаясь, то понижаясь, даже в пределах небольших

расстояний (до 1—2 м). Причем эти изменения резко зависят от частоты. Обычно стремятся к тому, чтобы минимальный уровень поля, создаваемый системой озвучения, был по возможности близким к уровню, создаваемому первичным источником звука, а максимальный уровень заметно не превосходил его. Для музыкальных передач отклонение от желательного уровня не должно превосходить по прямому звуку ± 2 дБ, т. е. основная неравномерность озвучения должна быть не более 4 дБ, поскольку возможна дополнительная неравномерность в 2—4 дБ из-за интерференции (таким образом, общая неравномерность получается 6—8 дБ). Для речевых передач расчеты понятности речи ведут для минимального уровня поля прямого звука, без учета неравномерности поля. Желательно ее иметь небольшой, так как она определяет максимальный уровень поля и, следовательно, мощность системы и может, кроме того, приводить к перегрузке слуха. Поэтому можно допускать неравномерность озвучения не более 8 дБ.

Неравномерность частотной характеристики системы озвучения определяется неравномерностью частотной характеристики аппаратуры и характеристиками направленности излучателей. Для систем озвучения концертных залов она допускается по первому классу качества, а для открытых пространств в случае передачи музыкальных программ — по второму классу (см. табл. 3.1). Для речевых информационных передач соответственно ориентируются на хорошую и удовлетворительную градации качества (см. табл. 3.2).

Акустические шумы — это шумы в пределах озвучиваемой поверхности, создаваемые публикой, различными агрегатами и т. п., и шумы, попадающие извне, например от транспорта. Уровни и спектры этих шумов обычно или бывают заданы, или должны быть измерены в реальных условиях. Стремятся к их уменьшению, но в ряде случаев это невозможно. Большинство из них имеет огибающую спектра с максимумом на низких частотах, но некоторые, например, шумы демонстраций имеют довольно значительный уровень и в диапазоне частот выше 1000 Гц. Влияние шумов учитывают только при расчетах понятности речи. Для музыкальных передач следует иметь в виду лишь некоторую маскировку слуха.

Локализация источника звука — слуховое ощущение местонахождения виртуального (кажу-

щегося) источника звука. Человек на слух довольно точно определяет местонахождение источника звука, причем наилучшее восприятие получается при совпадении зрительного образа со слуховым. При слушании музыкальных программ это совпадение обязательно.

Слитность звучания — отсутствие заметного или мешающего эха. Для музыкальных передач эхо не должно быть заметно, поэтому стремятся к тому, чтобы уровень запаздывающего сигнала удовлетворял соотношениям, приведенным на рис. 2.9 (кривая 1). Для речевых передач эхо может быть заметным, но оно не должно снижать понятность речи. Уровни запаздывающих звуков при этом должны удовлетворять соотношениям, приведенным на рис. 2.9 (кривая 2).

Системы озвучения делятся на сосредоточенные (централизованные), зональные (децентрализованные) и распределенные. К сосредоточенным относятся системы расположения громкоговорителей, имеющие размеры (расстояние между крайними громкоговорителями) в несколько раз меньше, чем расстояние от них до ближайших слушателей. При этом если расстояние между соседними громкоговорителями больше наиболее длинной звуковой волны в передаваемом диапазоне частот, то интенсивности звука, создаваемые каждым из громкоговорителей, складываются арифметически. При более близком расположении громкоговорителей друг к другу получается увеличение излучения на низких частотах из-за взаимодействия излучателей и вследствие того, что при малых разностях хода излучаемых волн суммируются звуковые давления, а не интенсивности.

К зональным системам относятся системы озвучения, представляющие собой ряд сосредоточенных систем, каждая из которых обслуживает свою зону. Эти зоны, как правило, стыкуют между собой, но уровни поля в каждой из них определяются только своей системой озвучения (кроме стыков зон, в которых суммируются интенсивности, создаваемые ближайшими громкоговорителями).

К распределенным относятся системы озвучения, в которых громкоговорители распределены по всему озвучиваемому пространству или помещению и для которых уровни поля в каждой из точек озвучиваемой поверхности определяются суммарным действием всех или большинства громкоговорителей.

9.2. ОСОБЕННОСТИ ОЗВУЧЕНИЯ ОТКРЫТЫХ ПРОСТРАНСТВ

Строго говоря, открытых пространств, в которых звуковые волны распространяются беспрепятственно во всех направлениях, в практике нет. Во всех случаях так называемого открытого пространства имеют дело с отражениями, например, от наземной поверхности, от стен близлежащих зданий и т. п. С некоторой степенью точности можно в первом приближении пренебрегать этими отражениями и учитывать их только при расчете эха, тем более что в ряде случаев от них получается только по одному отражению, которое можно легко учесть. Отражениями от пола (или от земли), занятого слушателями, обычно пренебрегают из-за высокого коэффициента поглощения.

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. 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. Из-за ветра, дождя и снега оно может достигать 8—10 дБ на каждые 100 м. Ветер и неравномерный нагрев поверхности земли вообще могут нарушить передачу звука, так как звуковые лучи из-за искривления траектории могут уходить круто вверх или вниз. 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 — *локализация звукового поля* — степень

уменьшения уровней поля при удалении от зоны озвучения. Дело в том, что всякая система озвучения открытых пространств излучает определенное количество энергии и за пределы озвучиваемой зоны. Если за пределами этой зоны или близко от нее есть другие объекты с людьми, то для них может оказаться помехой любая передача. Поэтому стремятся снизить уровень поля за пределами озвучиваемой зоны так, чтобы в зоне других объектов с людьми он 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 для них применяют в редких случаях, когда требуется озвучить небольшую площадку с достаточно высоким качеством звучания. Применение распределенных систем для озвучения больших площадей неэкономично, так как для этого требуется очень много громкоговорителей.

9.3. СОСРЕДОТОЧЕННЫЕ СИСТЕМЫ ОЗВУЧЕНИЯ

Рупорные системы. Рассмотрим озвучение одним рупорным громкоговорителем с круглым выходным отверстием рупора. Расположим громкоговоритель на высоте h_r над озвучиваемой поверхностью и направим его рабочую ось в удаленную точку плоской озвучиваемой поверхности (рис. 9.1), находящуюся на расстоянии a от рабочего центра громкоговорителя. Согласно установившейся методике будем считать, что характеристика направленности рупорного громкоговорителя с достаточной точностью аппроксимируется эллипсоидом вращения, вершина которого находится в рабочем центре излучателя, т. е. в центре выходного отверстия рупора. При таком условии диаграмма направленности в вертикальной плоскости будет пересекать плоскость озвучивания в точ-

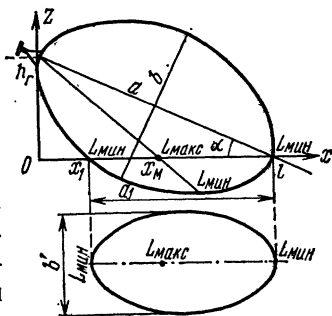


Рис. 9.1. К расчету озвучения плоской поверхности рупорным громкоговорителем

ках x_1 и l , а продольная ось эллипса a будет наклонена к озвучиваемой плоскости под углом α , где $\operatorname{tg} \alpha = h_r/l$. Линия пересечения эллипсоида с озвучиваемой плоскостью имеет вид эллипса (см. рис. 9.1) и называется эллипсом озвучивания. Согласно тому, что диаграмма направленности излучателей сферической волны совпадает с изобарой [и изоклиной — см. ф-лу (6.2a)], звуковое давление и уровень звука в точках x_1 и l , а также на всей кривой эллипса озвучивания будут одни и те же, т. е. везде будет уровень $L_{\text{мин}}$. Внутри же эллипса уровень будет выше, так как точки, лежащие на озвучиваемой плоскости между x_1 и l , находятся ближе к источнику звука, чем точки, находящиеся на диаграмме направленности между x_1 и l . Максимальный уровень будет в точке с координатой x_m . Заметим, что эта точка не лежит на середине между x_1 и l . Разность уровней в этой точке и в удаленной равна неравномерности озвучения в пределах всего эллипса озвучения. Если принять, что зона озвучения вписана в этот эллипс, то эта разность и будет являться неравномерностью озвучения на озвучиваемой плоскости.

Вне зоны эллипса озвучения, в том числе и на участках, лежащих между эллипсом и проекцией точки подвеса громкоговорителя, уровень будет меньше, чем в удаленной точке, т. е. это будет необслуживаемая зона. При необходимости эту зону озвучивают дополнительными громкоговорителями.

Из рис. 9.2 (кривые 1 и 2) следует, что чем ниже подвешен громкоговоритель, тем больше неравномерность озвучения, но меньше необслуживаемая зона

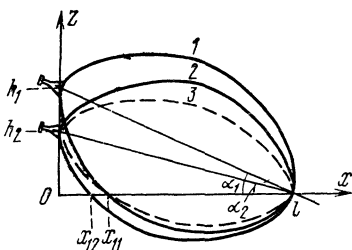


Рис. 9.2. Влияние высоты подвеса и направленности рупорного громкоговорителя на величины неравномерности озвучения и необслуживаемой поверхности:

1 и 2 — влияние высоты подвеса при одинаковой направленности; 2 и 3 — влияние направленности при одинаковой высоте подвеса

вблизи подвеса громкоговорителя. Если уменьшить высоту подвеса, но одновременно повысить его направленность в вертикальной плоскости (рис. 9.2, кривая 3), то

можно сохранить величину обслуживаемой зоны и уменьшить неравномерность озвучения.

Для озвучения широких площадей часто применяют рупорные громкоговорители с прямоугольным сечением рупора, ставя их на узкую базу, так как при такой установке ширина обслуживаемой зоны будет наибольшей, а излучение вверх — наименьшим (диаграмма направленности излучателя с прямоугольным сечением в плоскости, проходящей через рабочую ось рупора и поперечную ось излучающего отверстия, имеет больший угол излучения (см. § 6.5), чем диаграмма в плоскости, проходящей через рабочую ось рупора и продольную ось излучающего отверстия). При таком условии неравномерность озвучения будет определяться диаграммой направленности в вертикальной плоскости, а размеры эллипса озвучения определяются направленностью как в вертикальной, так и в перпендикулярной к ней поперечной плоскостях (часто ее неправильно называют горизонтальной, так как в действительности она наклонена к горизонту под углом α).

Если поверхность озвучения имеет сложную форму, то ось громкоговорителя также направляют в удален-

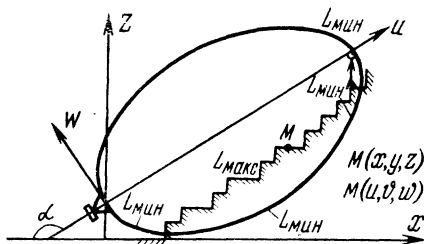


Рис. 9.3. Озвучение сложной поверхности

ную точку на границе озвучиваемой зоны (рис. 9.3), а неравномерность озвучения определяют *методом координат*, который сводится к следующему.

Выберем координаты так, что вершина эллипсоида будет находиться в центре координат, ось u будет совпадать с большой осью эллипсоида, ось w — с продольной осью выходного отверстия рупора, ось v — с его поперечной осью (рис. 9.4). При таких условиях в точке M с координатами u , v и w (согласно сов-

падению изобары с характеристикой направленности, т. е. с эллипсоидом) звуковое давление

$$p = p_1 \frac{u}{u^2 + \frac{v^2}{1 - e_G^2} + \frac{w^2}{1 - e_B^2}} = \frac{p_1}{\frac{\sqrt{u^2 + v^2}}{R_G(\theta_G)} + \frac{\sqrt{u^2 + w^2}}{R_B(\theta_B)} - u},$$

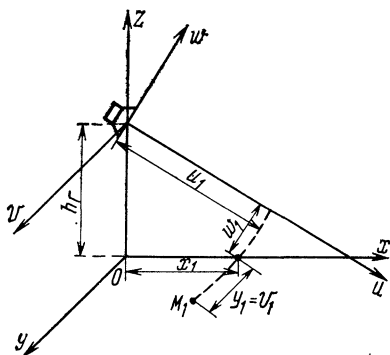


Рис. 9.4. Преобразование системы координат при расчете звуковых полей

где p_1 — звуковое давление на расстоянии 1 м от центра координат (от рабочего центра излучателя); e_B , e_G — эксцентриситеты диаграмм направленности в продольной и поперечной плоскостях $R_B(\theta_B)$, $R_G(\theta_G)$, проходящих через рабочую ось излучателя. Значения этих эксцентриситетов приводятся в справочниках.

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, см. рис. 9.4). Для перехода к координатам u , v и w используют следующие формулы:

$$\left. \begin{aligned} u &= x \cos \alpha + (h_G - z) \sin \alpha; \\ v &= y; \\ w &= x \sin \alpha - (h_G - z) \cos \alpha. \end{aligned} \right\} \quad (9.1)$$

Напомним, что озвучиваемая поверхность проходит выше пола или иной поверхности, на которой находятся слушатели.

Если применяют несколько рупорных громкоговорителей, расположенных на небольших расстояниях друг от друга ¹⁾, то звуковое давление для каждого из них определяют методом координат и затем суммируют их по квадратичному закону

$$p_{\Sigma} = \sqrt{p_a^2 + p_b^2 + p_c^2 + \dots}, \quad (9.2)$$

где p_a , p_b , p_c и т. д. — звуковые давления, развиваемые

¹⁾ Не менее λ_{\max} , т. е. больше 2—3 м для данного случая.

каждым из громкоговорителей. В этом случае неравномерность озвучения можно определить только путем постепенного поиска, т. е. путем определения уровней в ряде точек, в которых наиболее возможны максимальные и минимальные уровни.

Из-за низких качественных показателей рупорные громкоговорители применяют в основном только для передачи речевой информации. Правда, их еще 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 он создает давление около 0,2 Па, что соответствует уровню звукового давления 80 дБ, равному уровню очень громкой речи оратора на расстоянии 1 м от него.)

Если два рупорных громкоговорителя поставить друг на друга, то звуковое давление на оси удвоится, а диаграмма направленности в вертикальной плоскости сожмется почти вдвое по ширине (эксцентриситет изменится соответственно в $\sqrt{(1-0,25e^2_{\text{в}})/(1-e^2_{\text{в}})}$ раз). В таком случае уменьшится неравномерность озвучения и возрастет дальность, но не вдвое, так как с увеличением расстояния от громкоговорителей быстро нарастает затухание в воздухе. Озвучение рупорными громкоговорителями дает плохую локализацию звукового поля, в чем легко убедиться, вычислив уровни за пределами озвучиваемой поверхности.

Рупорные громкоговорители имеют хорошую осевую концентрацию излучения, и поэтому их излучение в тыльную полусферу мало, что дает возможность хорошо локализовать поле 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 зонах, находящихся под большими углами к рабочей оси. Это обусловлено резким уменьшением направленности на частотах ниже 300 Гц, вследствие чего уровни звукового давления, создаваемые под громкоговорителем, оказываются значительно выше на этих частотах, чем в остальном диапазоне частот.

Звуковые колонки. Рассмотрим озвучение с помощью звуковой колонки. Расположим ее на высоте h_k над озвучаемой горизонтальной плоскостью, акустическую (рабочую) ось ее направим в удаленную точку с наклоном $\alpha = \text{arctg}(h_k/l)$ l — расстояние проек-

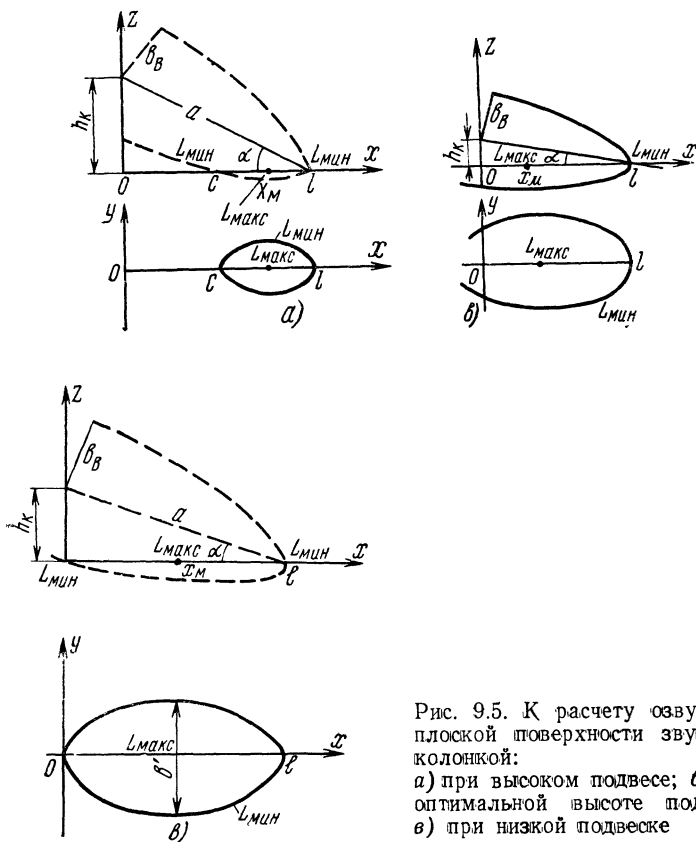


Рис. 9.5. К расчету озвучения плоской поверхности звуковой колонкой:

а) при высоком подвесе; б) при оптимальной высоте подвеса; в) при низкой подвеске

ции точки подвеса колонки на горизонтальную плоскость до удаленной точки. Согласно установившейся методике характеристика направленности звуковой колонки во фронтальной полусфере аппроксимируется полуэллипсоидом, центр которого совпадает с рабочим центром излучателя, т. е. колонки (рис. 9.5), а оси образующих его эллипсов направлены следующим образом: большая — по рабочей оси колонки, а малые — по продоль-

ной и поперечной осей выходного отверстия. Значения эксцентриситетов этих эллипсов для колонок даются в справочниках, аппроксимация дана на рис. 6.3.

Звуковую колонку можно расположить так, что уровень звука под колонкой будет меньше, чем в удаленной точке (рис. 9.5а), равный ему (рис. 9.5б) и больше его (см. рис. 9.5в). Первый вариант применяют при звукоусилении (см. § 9.8), когда под излучателем находится первичный источник звука, второй — преимуществен-

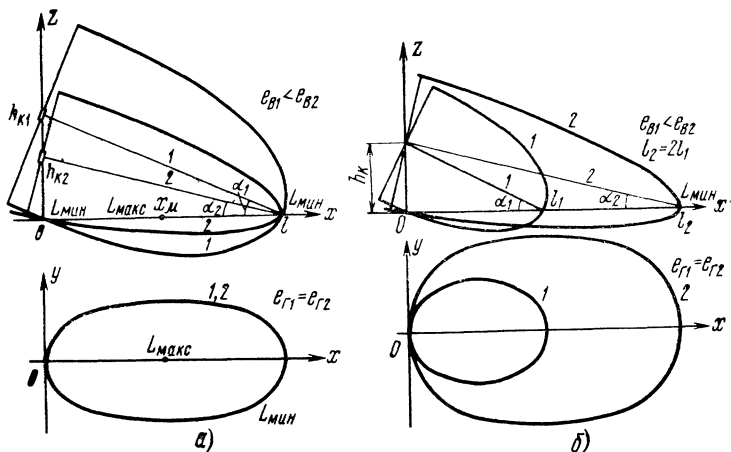


Рис. 9.6. Сравнение неравномерности озвучения при использовании одной колонки (кривая 1) и сдвоенной (кривая 2):

а) при одинаковой подводимой мощности и оптимальной высоте подвеса; б) при полной подводимой мощности

но используется в системах озвучения. Третий вариант применяют, если нет возможности применить второй (например, когда ограничена или задана высота подвеса громкоговорителя).

Рассмотрим второй вариант ($l = a \cos \alpha$). В этом случае (см. рис. 9.5б) высота подвеса $h_k \approx l \sqrt{1 - e^2}$. Так как по определению $e = \sqrt{1 - b^2/a^2}$, то для ряда колонок, у которых $e \approx 0,97$, $h_k \approx 0,25l$. Ясно, что во всех точках, находящихся внутри эллипса озвучения, уровень будет выше, чем в удаленной точке. Расчет показывает, что точка с максимальным уровнем находится в середине эллипса озвучения. При этом неравномерность уровней $\Delta L = 10 \lg(2e^2)$, т. е. не превышает 3 дБ.

Если колонка имеет большую направленность, то ее

следует подвешивать ниже (соответственно второму варианту). При этом неравномерность озвучения получается меньшей (рис. 9.6а). Применяя сдвоенные колонки (поставленные друг на друга), можно увеличить направленность (диаграмма направленности в вертикальной плоскости сжимается вдвое) и повысить звуковое давление на оси почти вдвое. В результате можно увеличить длину озвучиваемой зоны при уменьшении неравномерности озвучения. При этом ширина озвучиваемой зоны также увеличивается почти вдвое (рис. 9.6б).

Если озвучиваемая поверхность имеет сложную форму, то расчет уровней на ней и определение неравномерности озвучения могут быть сделаны методом координат. Аналогично случаю рупорных громкоговорителей (см. рис. 9.4) расположим оси координат по осям эллипсоида, аппроксимирующего характеристику направленности. При этом условия звуковое давление в точке с координатами u , v и w будет определяться выражением

$$p^2 = \frac{p_1^2}{u^2 + \frac{v^2}{1 - e_r^2} + \frac{w^2}{1 - e_b^2}} = \frac{p_1^2}{\frac{u^2 + v^2}{R_r^2(\theta_r)} + \frac{u^2 + w^2}{R_b^2(\theta_b)} - u^2}, \quad (9.3)$$

где p_1 , $R_r(\theta_r)$, $R_b(\theta_b)$, e_r и e_b имеют те же значения, как и в случае рупорного громкоговорителя.

Для удобства, как и в предыдущем случае, точки на озвучиваемой поверхности задают в системе координат x , y и z и переходят от них к координатам u , v и w с помощью ф-л (9.1).

Точно также для нескольких звуковых колонок, стоящих не рядом, а на расстояниях, значительно больше максимальной длины волны, звуковое давление определяют по методу координат с последующим суммированием по ф-ле (9.2). Формула (9.3) дает возможность определить уровень во фронтальной полусфере излучения. Излучение в тыльную полусферу у звуковых колонок составляет около 20% от излучения во фронтальную, поэтому локализация звукового поля в тыльную полусферу для них хуже, чем для рупорных громкоговорителей. 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 20 Па, т. е. меньше рупорного в 2,4 раза). По-

этому для озвучения больших площадей требуется большее число колонок, чем рупорных громкоговорителей, т. е. озвучение стоит дороже.

Диффузорные и радиальные громкоговорители чрезвычайно редко используются для сосредоточенных систем, так как их дальность действия невелика из-за низкого номинального звукового давления, развиваемого ими.

Звуковое поле для сосредоточенных систем отличается низкой локализацией и чем больше дальность действия системы, тем дальше находится граница зоны, в которой уровень будет выходить за пределы санитарных норм. 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).

9.4. ЗОНАЛЬНЫЕ СИСТЕМЫ

Зональные системы бывают линейные и пространственные. Первые служат для озвучения длинных, но узких площадей (например, улиц), вторые — для озвучения больших площадей, когда их нельзя озвучить сосредоточенной системой.

Наиболее удобными для зонального озвучения широких площадей являются радиальные громкоговорители или веерные групповые системы громкоговорителей (несколько звуковых колонок или рупорных громкоговорителей, расположенных около центральных точек частных зон озвучения). При таком расположении громкоговорителей (рис. 9.7) уровень поля на стыке границ соседних частных зон озвучения, по отношению к уровню от действия громкоговорителей 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). В остальных точках и внутри каждой зоны уровень может быть определен по характеристике направленности, но можно сказать, что приблизительно 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 получается уменьшение на 5—7 дБ вниз по вертикали по отношению к углу 50° от нее), так как радиальный громкоговоритель излучает вниз несколько слабее, чем в сторону (см. рис. 6.126). В зональных системах

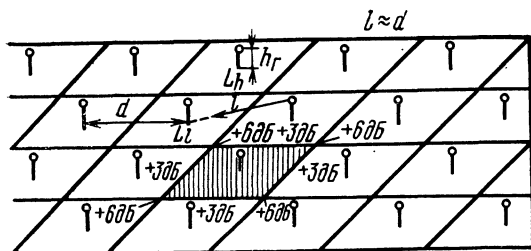


Рис. 9.7. К расчету озвучения большой площади зональной системой

появляется опасность возникновения эха из-за большого расстояния между соседними громкоговорителями. В первую очередь эхо прослушивается под громкоговорителем, так как разность хода в этой точке получается максимальной ($\Delta r \approx d - h_r$, где h_r — высота подвеса

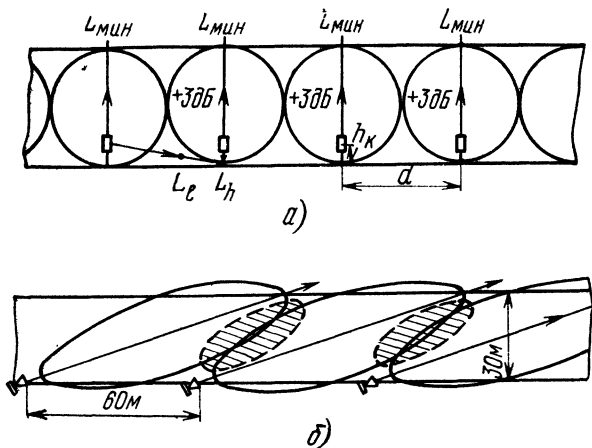


Рис. 9.8. Зональное озвучение улицы:
а) звуковыми колонками; б) рупорными громкоговорителями

громкоговорителя; d — расстояние между громкоговорителями). Разность уровней определяется отношением расстояний и разностью в направленности (5—7 дБ), т. е. $L_l - L_h = \Delta L = 20 \lg (h_r/l) - 6$ дБ, так как $l \approx d$.

Практически для радиальных громкоговорителей эхо не прослушивается или не является мешающим (см. рис. 2.9, кривая 2), а для других громкоговорителей оно возможно и поэтому подлежит проверке (рис. 9.8а). Особенно это проявляется при одинаковой ориентации рабочих осей рупорных громкоговорителей: разность хода волн получается очень большая, а уровни от громкоговорителей уменьшаются с расстоянием очень медленно. На рис. 9.8б показано такое расположение громкоговорителей и указаны зоны эха, которые получаются очень большими. В таких случаях идут на расстыковку зон озвучения, т. е. заранее планируют необслуживаемые зоны. По существу, в этом случае имеют место несколько зон озвучения централизованными системами.

Преимуществом рупорных громкоговорителей в зональных системах является их меньшая общая стоимость перед другими громкоговорителями. Зональные системы по сравнению с сосредоточенными имеют лучшую локализацию звукового поля, так как размеры частных зон невелики, а за их пределами уровень быстро падает.

9.5. ОСОБЕННОСТИ ОЗВУЧЕНИЯ ПОМЕЩЕНИЙ

В помещении, в отличие от открытых пространств, обязательно присутствуют реверберационные помехи и помехи от диффузного звука, имеющего уровень, как правило, выше уровня прямого звука. Кроме того, помещение имеет ряд специфических черт, которые следует учитывать при их озвучении. К этим особенностям относятся: наличие отражений от ограничивающих поверхностей с небольшим запаздыванием по отношению к прямому звуку, что повышает эффективность систем озвучения; ограничение высоты подвеса из-за потолка; как правило, меньшие размеры озвучиваемых площадей по сравнению с открытым пространством.

Для озвучения помещений используют сосредоточенные и распределенные системы. Зональные системы в них применяются редко, если не считать, что использование отдельной системы для озвучения балконов и лоджий представляет собой зональную систему. В больших помещениях типа выставочных иногда применяют и зональную систему.

9.6. СОСРЕДОТОЧЕННЫЕ СИСТЕМЫ ДЛЯ ПОМЕЩЕНИЙ

Для озвучения помещений почти не используют рупорные громкоговорители¹⁾, 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 кафедры, а также в центре зала и так, чтобы удовлетворялось условие локализации первичного источника звука, необходимое для музыкальных передач. Как показывают опыты и расчеты, чтобы обеспечить равномерное озвучение зала шириной не более 12 м, достаточно иметь одну звуковую колонку. Иногда приходится устанавливать две звуковые колонки по бокам сцены, например, из-за невозможности установки одной колонки в ее середине. Две колонки обеспечивают озвучение помещения шириной не менее 20 м. Широкие залы озвучивают тремя-четырьмя колонками, расположенными на передней стене.

Расчеты сосредоточенных систем ведут, 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 будет в 1,6 раза больше интенсивности прямого звука, а это соответствует прибавке 2 дБ к уровню прямого звука. В результате такого повышения уровня высоту подвеса громкоговорителя по сравнению с открытым пространством берут меньше в 1,6 раза. Тогда уровни интенсивности под громкоговорителем и в удаленной точке будут одинаковыми. Для типовых звуковых колонок высота подвеса примерно равна $0,7l\sqrt{1-e^2_{\text{в}}}$, где l — расстояние от колонки до удаленной точки. В углах помещения уровень звука повышается из-за отражений от боковых стен, вследствие этого 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 лучи уже будут становиться помехами. Поэтому уровень звука в середине помещения расчи-

¹⁾ Исключение составляют рупорные громкоговорители, входящие в акустические системы.

тывают без учета отражений от стен. Неравномерность озвучения при этом становится меньше, чем в открытом пространстве. Если же стены сильно заглушены, этого уменьшения не будет.

Сосредоточенные системы в виде звуковых люстр (несколько диффузорных громкоговорителей или мало-мощных звуковых колонок, располагаемых веером) применяют для озвучения помещений, где слушатели расположены вокруг его центра (например, залы «круглого стола»). Такие люстры не имеют направленности по горизонтали и представляют собой как бы радиальный громкоговоритель. Вследствие низкой направленности диффузорных громкоговорителей уровень звука в каждой точке помещения будет определяться совместным действием всех громкоговорителей, входящих в люстру. Излучение звуковых колонок, имеющих угол излучения не более 60° , можно считать независимым, и только на стыках зон следует добавлять по 3 дБ.

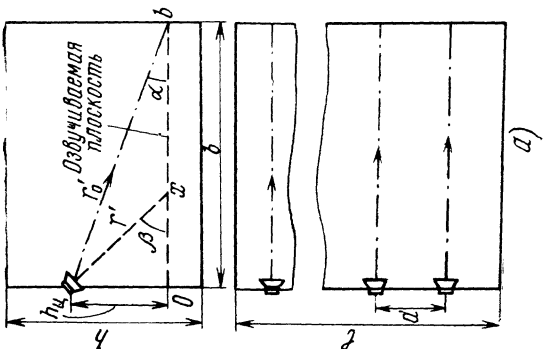
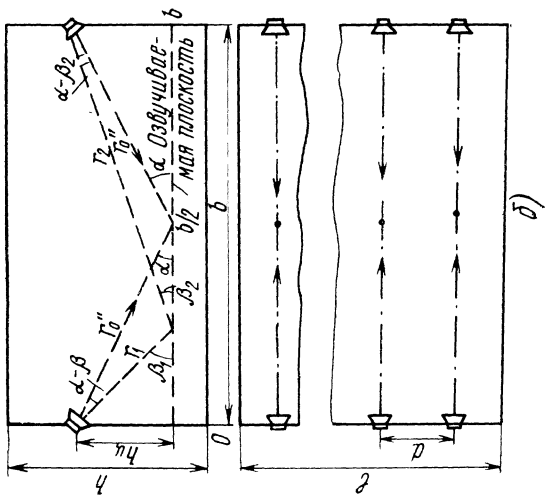
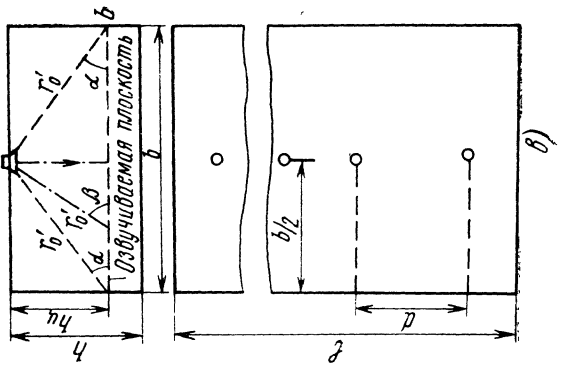
9.7. РАСПРЕДЕЛЕННЫЕ СИСТЕМЫ¹⁾

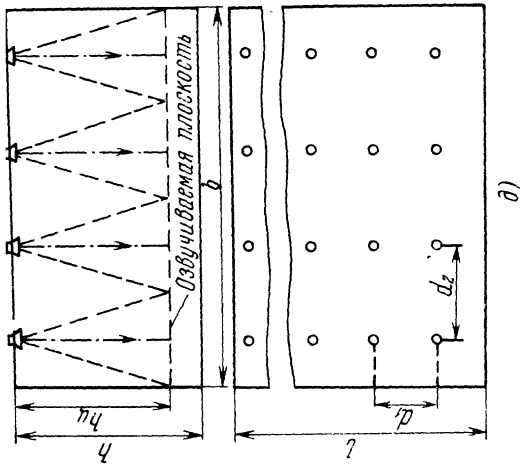
Распределенные системы делятся на линейные и поверхностные. Линейное расположение громкоговорителей называют цепочкой, а поверхностное — решеткой. Для помещений используют распределенные системы в виде настенных (рис. 9.9а и б) или потолочных цепочек (рис. 9.9в и г) громкоговорителей, а также в виде потолочных решеток из них (рис. 9.9д). Кроме того, применяют кресельные системы из громкоговорителей или телефонов. Обычно распределенные системы применяют, когда нет необходимости в локализации первичного источника звука, т. е. когда его нет в этом помещении, или, например, для информационных передач, так как в этом случае локализация источника звука необязательна.

В распределенных системах используют диффузорные громкоговорители или звуковые колонки, так как применение рупорных громкоговорителей в этих системах даже для озвучения открытых пространств нерационально, а для помещений тем более (из-за их большой мощности).

Рассмотрим бесконечную прямолинейную цепочку диффузорных громкоговорителей с шагом ее d и **высо-**

¹⁾ Подробные выводы см. в [9] и [7].





а) звуковая картина в комнате

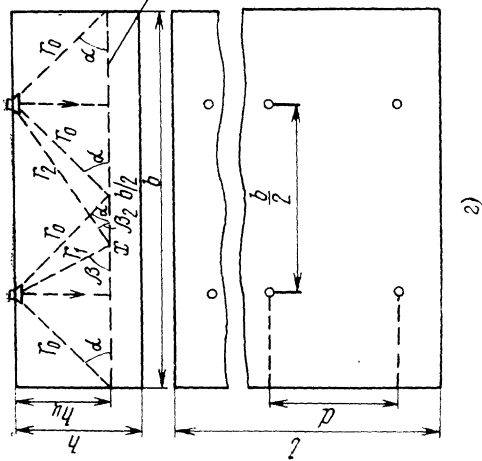


Рис. 9.9. Озвучение помещений распределенными системами:
 а) одна настенная цепочка; б) две настенных цепочки; в) одна потолочная цепочка; г) две потолочных цепочки; д) потолочная решетка

той подвеса $h_{\text{ц}}$, расположенную над озвучиваемой плоскостью (см. рис. 9.9а). Будем считать, что громкоговоритель не имеет направленности (это верно только для частот ниже 1000 Гц). Оказывается, что уже на расстояниях $r > 0,6d$ от цепочки фронт волны становится практически цилиндрическим, т. е. интенсивность звука убывает обратно пропорционально расстоянию от цепочки.

Определим эту зависимость. Хотя каждый из громкоговорителей бесконечной цепочки излучает во все стороны, правомерно считать, что излучение каждого из них распространяется только в зоне, ограниченной плоскостями, перпендикулярными оси цепочки и находящимися по обе стороны каждого источника звука на расстоянии $0,5d$. Излучаемая ненаправленным громкоговорителем мощность P_a [см. (1.15) и (1.15а)], равная $4\pi I_1$, где I_1 — интенсивность звука на расстоянии 1 м от рабочего центра громкоговорителя, проходит через боковую поверхность цилиндра высотой d и радиусом r . Поэтому создаваемая цепочкой на расстоянии r от нее интенсивность звука $I_r = 4\pi I_1 / 2\pi r d = 2I_1 / r d$.

Так как [см. (1.12)] $I_r / I_1 = p_r^2 / p_1^2$, то $p_r^2 = 2p_1^2 / r d$.

Неравномерность озвучения в пределах озвучиваемой плоскости по ее ширине определится из соотношения между высотой подвеса цепочки $h_{\text{ц}}$ и расстоянием от цепочки до удаленной точки $r_{\text{макс}} = \sqrt{h_{\text{ц}}^2 + b^2}$. При этом следует учитывать отражение от противоположной боковой стены. Если коэффициент отражения не менее 0,75 и расстояние от противоположной стены до цепочки не более 8 м, то можно считать, что в помещении есть две цепочки, почти одинаковые по мощности. Кроме того, уровень интенсивности повышается, если стена, около которой находится цепочка, имеет небольшое поглощение. Цепочки, расположенные по всей длине боковой стены, могут вполне считаться бесконечными, так как излучения от них, отражаясь в задней стене, будут создавать как бы ее продолжение.

Для двух цепочек, расположенных параллельно друг другу на расстоянии b (см. рис. 9.9б), суммарное звуковое поле получается простым суммированием интенсивности от каждой цепочки с учетом того, что для второй из них координата вместо x должна быть $b - x$.

В этом случае максимальный уровень на озвучиваемой плоскости (в зависимости от высоты подвеса) мо-

жет быть под цепочками или смещен к средней линии между ними. Для получения неравномерности меньше 1 дБ высота подвеса выбирается не менее $0,3b$, а шаг цепочки не более $2h_{ц}$.

При использовании двух цепочек, расположенных на противоположных стенах, уровень прямого звука из-за отражений повышается почти на 3 дБ.

Для цепочки из звуковых колонок звуковое давление определяется аналогично случаю ненаправленных громкоговорителей, но с введением поправки на эксцентриситеты характеристики направленности в продольной и поперечной плоскостях e_B и e_T :

$$p^2 = [2p_1^2 \sqrt{1 - e_T^2}] / \left[d \sqrt{u^2 + \frac{\omega^2}{1 - e_B^2}} \right],$$

здесь u и ω — координаты точки на озвучиваемой поверхности для системы координат, привязанной к характеристике направленности звуковой колонки. Для перехода к ним от системы координат x и z пользуются ф-лами (9.1), при этом координата y не принимается во внимание, так как волна рассматривается цилиндрической формы. Для получения неравномерности менее 3 дБ высоту подвеса колонок берут примерно $h_{ц} \approx b \sqrt{1 - e_B^2}$, а шаг цепочки — $d < 2h_{ц} \sqrt{1 - e_B^2}$.

Для двух цепочек из звуковых колонок звуковое давление определяется методом координат, т. е. суммированием интенсивностей, получаемых от каждой из цепочек, аналогично случаю ненаправленных громкоговорителей.

Потолочные решетки создают плоскую волну, поэтому звуковое давление, создаваемое ими на озвучиваемой поверхности, определяют как для независимого излучения каждого громкоговорителя только в свою зону, ограниченную размерами d_1 , d_2 (см. рис. 9.9д), т. е. $p^2 = 4\pi p_1^2 / S_1 = 4\pi p_1^2 / d_1 d_2$, где p_1 — звуковое давление, создаваемое громкоговорителем на расстоянии 1 м от него; S_1 — озвучиваемая поверхность площадки, обслуживаемая одним громкоговорителем $S_1 = S_{с.л} / n$; n — число громкоговорителей; $S_{с.л}$ — площадь озвучиваемой поверхности.

Одну настенную цепочку диффузорных громкоговорителей применяют, если ширина помещения не превосходит 4—8 м. При ширине помещения от 6 до 16 м применяют две таких цепочки. Одну настенную цепоч-

ку из звуковых колонок применяют в помещениях с шириной 10—15 м. При ширине 12—30 м — две таких цепочки. При низком потолке предпочтение оказывают потолочным цепочкам (см. рис. 9.9в и г), при очень большой ширине потолка применяют потолочную решетку или кресельную систему. Одна потолочная решетка равноценна двум настенным, подвешенным под потолком.

При выборе распределенной системы громкоговорителей для помещения исходят из возможно меньшего акустического отношения с возможно меньшей неравномерностью озвучения, а также с точки зрения архитектуры. Так, например, в широких помещениях (шириной от 20 до 30 м) для получения небольшого акустического отношения целесообразно применять звуковые колонки, расположенные вдоль сцены.

Из предыдущего анализа следует, что распределенные системы применительно к открытому пространству дают наилучшую локализацию звукового поля, но у них совершенно отсутствует локализация первичного источника звука, так как звук к слушателю приходит с разных направлений.

9.8. ЗВУКОУСИЛЕНИЕ

Назначение систем звукоусиления — усилить звук первичного источника (голоса оратора, лектора, солиста, звуки музыкального ансамбля и т. п.) в тех случаях,

когда из-за размеров озвучиваемой поверхности или из-за недостаточной мощности первичного источника звука уровень звукового поля на местах слушателей получается ниже требуемого значения. Усиление необходимо даже при большой мощности первичного источника звука,

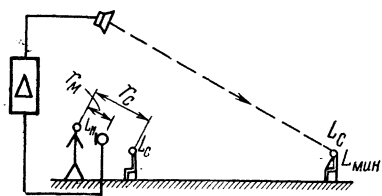


Рис. 9.10. Иллюстрация системы звукоусиления

если объем помещения более 2000 м³ или расстояние от удаленного слушателя до первичного источника более 25 м. В идеальном случае звукоусилительная система должна создавать на всех местах слушателей такой уровень поля, который получается у слушателя, находящегося на оптимальном расстоянии

от первичного источника звука (рис. 9.10). Музыкальные передачи лучше прослушивать на расстоянии, равном 10—12 м, а так как микрофон в этом случае находится на расстоянии 2—3 м от оркестра, уровень звука около микрофона будет больше, чем у слушателя, на

$$\Delta L = L_M - L_c = 20 \lg \frac{10 \div 12}{3 \div 2} = (12 \div 16) \text{ дБ}$$

Отсюда следует, что громкоговорящая система должна создавать минимальный уровень поля $L_{\text{мин}}$ не ниже, чем уровень у микрофона L_M , уменьшенный на 12—16 дБ, т. е. $-(12 \div 16)$ дБ, или $L_{\text{мин}} = L_M - (12 \div 16)$ дБ.

Разность минимального уровня поля и уровня у микрофона называют *индексом передачи тракта* (или просто индексом тракта), т. е. $Q_{\text{м.с}} = L_{\text{мин}} - L_M$. Следовательно, оптимальный индекс тракта для музыкальных передач $Q_{\text{м.с}} = -12 \div 16$ дБ.

При определении индексов тракта для речевых передач исходят из получения полной понятности речи в точках с минимальным уровнем поля с учетом уровней шумов в этих точках. При низких уровнях шумов индекс тракта определяют так же, как и для музыкальных передач, но для оптимального расстояния, равного 1 ÷ 1,5 м (при расстоянии лектора или оратора от микрофона около 0,3 м). В этом случае разность уровней $L_{\text{мин}} - L_M = 20 \lg \frac{1 \div 1,5}{0,3} = 10 \div 14$ дБ, откуда $Q_{\text{м.с}} = -10 \div -14$ дБ. Заметим, что эта величина индекса сугубо ориентировочная.

При звукоусилении сольных программ необходимый индекс передачи следует выбирать исходя из норм, приведенных для речевых передач, хотя некоторые солисты подносят микрофон к самому рту, из-за чего требуемый индекс получается даже меньше, чем для музыкальных программ.

При звукоусилении, как правило, нет необходимости в создании уровней поля вблизи первичного источника звука (оратора, солиста, оркестра и т. п.) таких же, как для удаленных участков озвучиваемой поверхности, поэтому при расчете звуковых полей эти участки обычно исключают из рассмотрения. Можно считать, что озвучивать надо только ту зону, в которой эти источники не могут обеспечить достаточный уровень звука¹⁾.

¹⁾ В таких случаях говорят о подусилении звука.

Когда же приходится рассчитывать звукоусиление слабых голосов ораторов и солистов, надо ориентироваться на озвучение всей зоны расположения слушателей.

Система звукоусиления включает в себя систему озвучения, однако в системе звукоусиления первичный источник звука находится в пределах озвучиваемого пространства или рядом с ним, и поэтому микрофоны оказываются в поле действия громкоговорителей. Это приводит к появлению акустической обратной связи по цепи: громкоговоритель — помещение (или открытое пространство) — микрофон — усилитель-громкоговоритель. В системе озвучения такой обратной связи нет, так как в этом случае микрофон находится в другом месте или воспроизводятся магнитофонная и ей подобные записи. Поэтому все требования, предъявляемые к системам озвучения, имеют силу и для систем звукоусиления, но с учетом обратной связи.

Вследствие обратной связи возможно появление самовозбуждения всей системы звукоусиления. Условием самовозбуждения служит равенство единице модуля коэффициента передачи $|K|$ для всей замкнутой цепи (петле). Фазовые соотношения для возникновения самовозбуждения не имеют значения, так как фаза коэффициента передачи в данном случае бывает самой разнообразной и быстро изменяющейся с изменением частоты. Поэтому вероятность того, что эта фаза будет нулевой на какой-либо из частот передаваемого диапазона (для которой $|K|=1$), близка к единице¹⁾. Вследствие большой неравномерности частотной характеристики тракта передачи самовозбуждение возможно при довольно малом среднем значении коэффициента передачи, так как самовозбуждение может возникнуть на одном из пиков этой характеристики. Перед началом самовозбуждения прослушивается позванивание на одной из частот, для которой условие самовозбуждения близко к выполнению, так как из-за больших временных задержек, обусловленных относительно длительным вре-

¹⁾ Покажем это на примере. Положим, что микрофон находится на расстоянии $r_{г.м}$ от громкоговорителя. В этом промежутке на определенных частотах будет укладываться целое число звуковых волн ($r_{г.м} = n\lambda_n$). Соответствующие частоты будут $f_n = c/\lambda_n = 340n/r_{г.м}$. Если $r_{г.м} = 10$ м, то $f_n = 34n$, Гц. Следовательно, в каждом частотном интервале шириной 34 Гц будут иметь место сдвиги фаз между излучаемой и принимаемой звуковой волной в пределах от $2\pi(n-1)$ до $2\pi n$, т. е. в пределах 0— 2π .

менем прохождения звуковых волн от громкоговорителей до микрофона, затухание звука от каждого звукового импульса происходит медленно (появляется так называемая регенеративная реверберация). Как известно, в таких условиях частотная характеристика тракта становится еще более неравномерной¹⁾.

Для помещений обратная связь образуется и по прямому звуку, и по диффузному, в открытом пространстве — только по прямому, поскольку в открытом пространстве отраженные звуки имеют меньшую интенсивность, чем прямой звук.

При обратной связи по прямому звуку (рис. 9.11) самовозбуждение возникает при условии, что уровень $L_{Г.М.}$, создаваемый системой громкоговорителей в точке нахождения микрофона с учетом направленности последнего, будет равен или больше уровня L_M , создаваемого первичным источником звука у микрофона $L_{Г.М.} - q_{\theta_M} \geq L_M$, где $q_{\theta_M} = 20 \lg \frac{1}{R_M(\theta_M)}$ учитывает, что прямой звук от громкоговорителя приходит под углом θ_M к оси микрофона.

Так как $L_M = L_{\min} - Q_{М.с.}$, то условие самовозбуждения будет выполнено, если индекс тракта $Q_{М.с.} = L_{\min} - L_M$ или $Q_{М.с.} = q_{\theta_M} + \Delta L_{с.м.}$, где $\Delta L_{с.м.} = L_{\min} - L_{Г.М.}$ — разность уровней, создаваемых громкоговорителями в точке минимального уровня поля и у микрофона.

Для создания устойчивой работы системы звукоусиления берут запас около 12 дБ, из них 6 дБ — запас на неравномерность звукового поля, так как при таком запасе уже начинает прослушиваться регенеративная реверберация. Поэтому предельный индекс тракта

$$Q_{М.с.пр} = q_{\theta_M} + \Delta L_{с.м.} - 12 \text{ или } Q_{М.с.пр} = q_{\theta_M} + L_{\min} - L_{Г.М.} - 12.$$

Уровень, создаваемый одиночным громкоговорителем в точке расположения микрофона, $L_{Г.М.} = L_1 - 20 \lg r_{Г.М.} + 20 \lg R_r(\theta_r)$, где L_1 — уровень, развиваемый громкоговорителем по оси на расстоянии 1 м от него; $R_r(\theta_r)$ —

¹⁾ На частоте, для которой условие самовозбуждения близко к выполнению, усиление тракта (из-за положительной обратной связи) увеличивается. Соответствующие составляющие звука оказываются подчеркнутыми в звучании. Так как время пробега звуковой волны от громкоговорителя до микрофона достаточно велико, процесс затухания составляющих звука на этих частотах оказывается заметным на слух. Его называют регенеративной реверберацией.

коэффициент направленности громкоговорителя и $r_{Г.М}$ — расстояние между громкоговорителем и микрофоном.

Для получения возможно большего предельного индекса тракта $Q_{пр}$ необходимо уменьшать уровень, развиваемый громкоговорителем у микрофона $L_{Г.М}$. Это можно сделать удалением микрофона от громкоговорителя и такой ориентировкой последнего, чтобы в сторо-

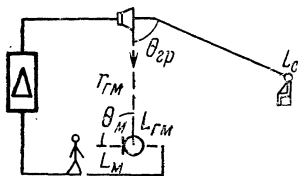


Рис. 9.11. Иллюстрация обратной акустической связи по прямому звуку

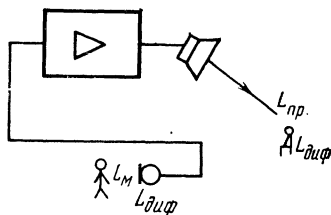


Рис. 9.12. Иллюстрация обратной акустической связи по диффузному звуку

ну микрофона излучение было по возможности меньшим. В частности, целесообразно применять более направленные громкоговорители. Кроме того, необходимо применять направленные микрофоны и ориентировать их по возможности так, чтобы в сторону громкоговорителя чувствительность была бы минимальная.

При расположении микрофона в диффузном поле (рис. 9.12), для которого диффузная составляющая $L_{диф}$ примерно одинакова во всех точках озвучиваемой поверхности помещения, эффективный уровень интенсивности от диффузного звука на оси микрофона $L_{М} = L_{диф} - q_{М}$, где $q_{М}$ — индекс направленности микрофона для диффузного звука, а минимальный уровень поля прямого звука $L_{мин} = L_{М} + Q_{М.с.}$. Откуда для условия самовозбуждения имеем $Q_{М.с.} = L_{мин} - L_{диф} + q_{М}$. Если взять запас устойчивости, равный 12 дБ, то получим предельный индекс тракта по диффузному полю $Q_{М.с.пр} = q_{М} + L_{мин} - L_{диф} - 12$ или $Q_{М.с.пр} = q_{М} - \Delta L_{РМ} - 12$, где $\Delta L_{РМ} = L_{диф} - L_{пр.мин} = 10 \lg R_{макс}$; $R_{макс}$ — максимальное значение акустического отношения.

Из формулы следует, что необходимо стремиться к увеличению направленности микрофона (его следует выбирать с возможно наибольшим индексом¹⁾ направ-

¹⁾ В этих случаях целесообразно применять группы микрофонов.

ленности) и к уменьшению максимальной величины акустического отношения, т. е. к уменьшению диффузной составляющей звукового поля и к увеличению уровня прямого звука.

При оптимальной величине поглощения диффузную составляющую можно уменьшить только применением более направленных громкоговорителей, а увеличить уровень интенсивности прямого звука можно путем приближения громкоговорителя к слушателю.

В тех случаях, когда предельный индекс тракта по диффузному звуку недостаточен для получения требуемого уровня звука, прибегают к увеличению поглощения поверхностей, расположенных около микрофона, с тем, чтобы понизить уровень диффузного звука около него. Этот уровень удается снизить на 6—12 дБ.

Предельный индекс тракта зависит от частоты, поэтому он определяется для всего передаваемого диапазона. Фактический индекс тракта не должен превышать его.

Заметим, что для помещений, как правило, предельный индекс тракта по диффузному звуку меньше, чем по прямому, так как диффузная составляющая, как правило, больше составляющей прямого звука.

Акустическое отношение¹⁾ зависит от вида системы озвучения и от направленности громкоговорителей. Так, для одиночного громкоговорителя максимальное акустическое отношение на оси

$$R_{\text{макс}} \approx \frac{16\pi l^2 (1 - \alpha_{\text{ср}})}{\alpha_{\text{ср}} S \Omega},$$

где $\alpha_{\text{ср}} S$ — общее поглощение помещения²⁾; Ω — коэффициент осевой концентрации; l — расстояние от громкоговорителя до удаленного слушателя.

Для распределенных систем из ненаправленных громкоговорителей

$$R_{\text{макс}} \approx \frac{8lb (1 - \alpha_{\text{ср}})}{\alpha_{\text{ср}} S},$$

где l и b — длина и ширина помещения.

Для распределенной системы из звуковых колонок

$$R_{\text{макс}} \approx \frac{12,8lb (1 - \alpha_{\text{ср}}) \sqrt{1 - e_{\text{в}}^2}}{\alpha_{\text{ср}} S},$$

¹⁾ Подробные выводы см. в [9, § 3].

²⁾ Предполагается, что оно определено условием получения оптимальной реверберации.

где e_v — эксцентриситет характеристик направленности в вертикальной плоскости. И для кресельной системы

$$R_{\text{макс}} \approx \frac{4S_{\text{сл}}(1 - \alpha_{\text{ср}})}{\alpha_{\text{ср}} S},$$

где $S_{\text{сл}}$ — поверхность, занятая слушателями.

Сравнивая максимальные акустические отношения для разных систем, видим, что наименьшее получается для кресельной, наибольшее — для сосредоточенной системы. Поэтому, когда нет необходимости в совмещении зрительного образа со слуховым, используют распределенную систему озвучения.

При звукоусилении с помощью индивидуальных телефонов (что практикуется при слушании в залах с повышенным уровнем акустического шума, а также при переводах речи оратора на другие языки) уровень интенсивности звука у слушателя определяется исходя из необходимости перекрытия уровня шумов в зале. При этом можно считать, что телефоны не создают помех для слушателей, сидящих рядом.

Заметим, что в системах звукоусиления целесообразно применять ограничители уровня, что дает возможность использовать менее мощные громкоговорители.

9.9. ГРОМКОГОВОРЯЩАЯ СВЯЗЬ

Рассмотрим системы радиотелефонной громкоговорящей связи и диспетчерские системы дуплексного типа. Обратная связь в таких системах возникает преимущественно по прямому звуку, так как уровень отраженного звука невелик. При большом удалении громкоговорителя от абонента и при применении ненаправленного микрофона может возникнуть обратная связь и по диффузному звуку. С возникновением генерации борются аналогично рассмотренному ранее, в частности широко применяют микрофоны типа ДЭМШ. Кроме того, используют различного рода мостиковые схемы, а также устройства переключения микрофонов, действующие от голоса, когда нельзя использовать микрофон типа ДЭМШ.

В качестве переключателей используют автоматические регуляторы уровня с малой постоянной времени на срабатывание (5—10 мс) и большим временем удержания (до 0,5 с). Такие устройства приходится настраивать на срабатывание от громких звуков речи, так как отраженные звуки в помещении не дают возможности установить срабатывающие устройства на уровень слабых звуков речи. Это приводит к пропаданию слабых звуков речи, произносимых в начале фраз.

К устройствам громкоговорящей связи одностороннего типа относятся электромегафоны. Это переносные устройства для усиления речи. Электромегафон состоит из шумостойкого микрофона типа ДЭШМ, усилителя и рупорного громкоговорителя мощностью в несколько ватт. Микрофон укрепляется на тыльной части кожуха громкоговорителя и располагается так, чтобы ось громкоговорителя находилась в плоскости, в которой микрофон имеет наименьшую чувствительность. Электро-

мегафон держат за ручку так, чтобы его микрофон находился около угла рта. При более близком расположении микрофона к рабочей оси рта будут наблюдаться сильные нелинейные искажения на взрывных звуках речи. Рупор громкоговорителя свернут в три колена (см. рис. 6.14в) для уменьшения габаритов. Усилитель выполнен на транзисторах. Питание производится от аккумуляторов или батареи от карманного фонаря, находящегося в футляре вместе с усилителем и носимых на плечевом ремне. Дальность действия электромегафона доходит до 400 м. Его используют в помещениях, а также в экскурсионных автобусах. Микрофон может быть отнесен от громкоговорителя на расстояние до 8 м с помощью удлинительного кабеля.

Г л а в а 10

ПОНЯТНОСТЬ И РАЗБОРЧИВОСТЬ РЕЧИ¹⁾

10.1. ВВЕДЕНИЕ

Понятность речи — определяющая характеристика тракта передачи речи, так как если тракт не обеспечивает полной понятности ее, то никакие другие преимущества его не имеют значения — он не пригоден к эксплуатации.

Для непосредственного определения этой качественной характеристики 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 элементов речи из общего числа переданных по тракту. Элементы речи — это 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. Для измерений разборчивости разработаны специальные таблицы слогов, звукооче-

¹⁾ Подробное изложение см. в [5], § 5.2 и [6].

таний и слов с учетом их встречаемости в русской речи (аналогичные таблицы есть и для других языков). Звуковых таблиц нет, так как звуки, кроме гласных, отдельно не произносятся, а для измерений звуковой разборчивости пользуются слоговыми таблицами или таблицами звукосочетаний. Все эти таблицы называют артикуляционными.

Измеряют разборчивость с помощью группы тренированных слушателей и дикторов, называемой артикуляционной бригадой, поэтому метод измерений называют *артикуляционным*. Тренировка бригады необходима, так как иначе результаты измерений некоторое время будут расти при неизменных условиях, по мере натренированности артикулянтов. Тренировку проводят до тех пор, пока артикулянты не будут давать стабильные результаты при заданных условиях измерений. Дольше всего артикулянты тренируются на слоговых таблицах. Бригаду составляют из молодых людей без нарушений слуха и речи.

Артикулянты дают наибольшие возможные значения разборчивости речи в заданных условиях работы тракта. Поэтому для определения связи между разборчивостью, измеренной артикулянтами, и понятностью речи для обычных абонентов в тех же условиях были проведены массовые испытания. В этих испытаниях участвовали самые разнообразные люди из числа потенциальных абонентов общим числом более 2000 человек. Были взяты самые разнообразные тракты с различными условиями их работы. Разговор велся по специальным разговорникам в обе стороны, как при телефонных переговорах. При этом контролировалось понимание абонентами друг друга. Оценка ставилась по пятибалльной системе: отлично, если понятность была полная, без каких-либо переспросов; хорошо, если были отдельные переспросы редко встречающихся слов или неизвестных названий, фамилий и т. п., о которых нельзя догадаться по смыслу; удовлетворительно, если требовались частые переспросы и слушатели сообщали, что трудно разговаривать; предельно допустимо, если требовались неоднократные переспросы одного и того же материала с передачей отдельных слов по буквам с полным напряжением слуха; срыв связи, если абоненты не могли понять друг друга и отказывались от разговора. Одновременно для каждого из условий испытаний и каждого тракта были измерены величины

Понятность	Разборчивость, %	
	слоговая	словесная
Предельно допустимая	25—40	75—87
Удовлетворительная	40—50	87—93
Хорошая	50—80	93—98
Отличная	80 и выше	98 и выше

разборчивости речи с помощью тренированной бригады. В табл. 10.1 приведены градации понятности речи и соответствующие им величины разборчивости. Одновременно с указанными испытаниями были измерены статистические зависимости между слоговой, словесной, звуковой и смысловой разборчивостью для русской речи.

Кроме этого, был разработан ускоренный метод измерения разборчивости речи — *метод выбора*. Он основан на следующем. Каждая таблица составлена из нескольких групп слов. В каждой группе подобраны слова, по звучанию сходные между собой. Диктор передает из каждой группы только одно слово. Слушатели имеют перед собой таблицу и должны отметить то слово, которое, по их мнению, было передано. Чередование слов изменяется в случайном порядке. Определяется процент правильно принятых слов. Между количеством принятых слов по этому и артикуляционному методам установлена статистическая связь. Этот метод не требует длительной тренировки слушателей, но точность его ниже артикуляционного.

Зависимость между понятностью речи и ее разборчивостью, приведенная в табл. 10.1, справедлива, когда идет прием самой разнообразной информации. В тех же случаях, когда идет обмен информацией с гораздо меньшим объемом (т. е. при ограниченном словаре), понятность речи будет выше, чем в общем случае при той же разборчивости речи. Например, для диспетчерской связи полная понятность речи получается при слоговой разборчивости речи около 40%, что соответствует удовлетворительной понятности в общем случае. Поэтому при расчете устройств, подобных диспетчерской связи, ориентируются на меньшие величины разборчивости речи, чем при расчетах систем широкого

применения. Но в каждом случае необходимо предварительно знать величину разборчивости, при которой будет полная понятность передаваемой информации.

10.2. ФОРМАНТНЫЙ МЕТОД ОПРЕДЕЛЕНИЯ РАЗБОРЧИВОСТИ РЕЧИ

Был предпринят ряд попыток для нахождения непосредственной связи между разборчивостью речи, с одной стороны, характеристиками трактов передачи речи и условиями ее приема и передачи, с другой, но не было получено приемлемых результатов. Только при посредстве формантной теории, разработанной Флетчером и Коллардом, удалось установить эту связь.

Форманты звуков речи заполняют весь частотный диапазон от 150 до 7000 Гц. Средняя вероятность появления формант в том или ином участке диапазона для каждого языка вполне определена. Условились делить весь частотный диапазон на 20 таких полос, чтобы в каждой из них вероятность появления формант была одинаковой. Соответствующие полосы назвали *полосами равной разборчивости*. Они определены для ряда языков, в том числе и для русского. Оказалось, что при достаточно большом количестве передаваемого материала вероятности появления формант подчиняются правилу аддитивности. Вследствие этого вероятность появления формант в каждой полосе равной разборчивости равна 0,05.

Если слушать речь в условиях шумов и помех, то ее разборчивость получается меньшей, чем в их отсутствие. Дело в том, что форманты имеют различные уровни интенсивности: у громких звуков выше, чем у глухих. Поэтому при увеличении уровня шумов сначала маскируются форманты с низкими уровнями, а затем с более и более высокими. Вследствие этого по мере увеличения уровня шумов и помех вероятность восприятия формант постепенно уменьшается. Коэффициент, определяющий это уменьшение, называют коэффициентом восприятия или *коэффициентом разборчивости* w . Таким образом, в каждой полосе равной разборчивости вероятность приема формант будет $\Delta A = 0,05 w$.

Так как в основном вся энергия звуков речи сосредоточена в формантах, то уровни формант практически совпадают с уровнями звуков речи. На рис. 10.1 пока-

зано распределение уровней речи, т. е. интегральная вероятность появления уровня не менее заданного в зависимости от разности между средним уровнем речи, определенным за длительный интервал времени, и заданным уровнем. Эта вероятность практически совпадает с вероятностью распределения формант. Заметим, что это распределение почти не зависит от частоты.

Порог слышимости в шумах (см. § 2.7) определяется спектральными уровнями шумов. Для флуктуационных шумов величина порога слышимости почти не зависит от времени. Вследствие этого разность между средним спектральным уровнем речи и спектральным уровнем шумов будет определять вероятность появления формант выше уровня шумов¹⁾. Но разность между уровнем сигнала и уровнем порога слышимости называют уровнем ощущения. Следовательно, коэффициент разборчивости ω определяется уровнем ощущения формант

$$E = B_p - B_{ш}, \quad (10.1)$$

где B_p — средний спектральный уровень речи; $B_{ш}$ — спектральный уровень шумов.

Коэффициент разборчивости может быть определен с помощью графика рис. 10.1. Для примера на этом рисунке показаны уровень ощущения E и соответствующий ему коэффициент разборчивости ω .

Для уровней ощущения, лежащих в пределах 0—18 дБ, коэффициент разборчивости может быть определен по приближенной формуле $\omega = (E + 6)/30$. Для каждой полосы равной разборчивости коэффициент разборчивости в общем случае будет разный (ω_n). Поэтому суммарная вероятность приема формант, называемая *разборчивостью формант*,

$$A_{\phi} = \sum_{n=1}^{20} 0,05\omega_n = \frac{1}{20} \sum_{n=1}^{20} \omega_n. \quad (10.1a)$$

Между формантной и другими видами разборчивости экспериментально были найдены зависимости. Для слоговой разборчивости такая зависимость приведена на рис. 10.2. Интересно отметить, что при формантной разборчивости, равной 0,5 (принимается только половина всех формант), слоговая разборчивость равна

¹⁾ Для импульсных шумов вводят соответствующие поправки.

80%, т. е. получается почти полная понятность речи. Это характеризует избыточность речи и комбинационную способность человеческого мозга.

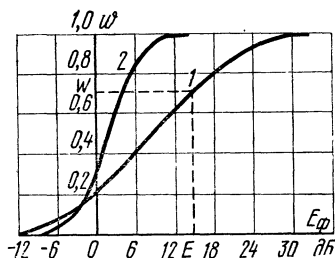


Рис. 10.1. Интегральное распределение уровней речи:
1 — для непреобразованного сигнала; 2 — для предельно-ограниченного по амплитуде

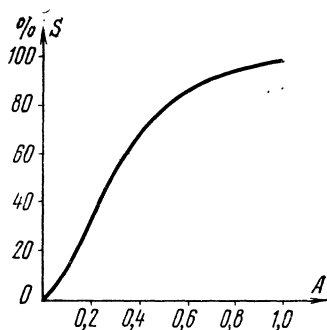


Рис. 10.2. Зависимость слоговой разборчивости от формантной

10.3. ОПРЕДЕЛЕНИЕ РАЗБОРЧИВОСТИ РЕЧИ ДЛЯ ТРАКТОВ СВЯЗИ И ВЕЩАНИЯ

При озвучении помещений и расчете для них звукоусиления разборчивость речи находят, прежде всего, для точек озвучиваемой поверхности с минимальным уровнем поля прямого звука и максимальным уровнем акустических шумов.

У слушателя, находящегося в этой точке, спектральный уровень речи

$$B_{p.c} = B_{p.m} + Q_{m.c}, \quad (10.2)$$

где $Q_{m.c}$ — индекс тракта; $B_{p.m}$ — спектральный уровень речи у микрофона:

$$B_{p.m} = B'_p - 20 \lg r_m,$$

где r_m — расстояние микрофона от оратора, лектора и т. п., м; B'_p — спектральный уровень речи на расстоянии 1 м (определяется из справочных таблиц).

Эти данные определяют для каждой полосы равной разборчивости. Для этих же полос находят спектральные уровни шумов и помех в месте слушания:

$$B_{ш} = 10 \lg (10^{0.1B_a} + 10^{0.1B_n}) = B_a(+) B_n, \quad (10.3)$$

где знак (+) означает суммирование по интенсивности (для сложения уровней по интенсивности можно пользоваться следующей методикой: если надо сложить два уровня, то к большему следует добавить поправку, зависящую от разности уровней. Если эта разность равна нулю, то поправка равна 3 дБ, если разность равна 6 дБ, то поправка равна 1 дБ, при разности 10 дБ поправка равна 0,4 дБ); B_a — спектральный уровень заданных акустических шумов (берется из справочных таблиц);

$$B_{\Pi} = B_{p.c} - 21 + \Delta L_{RM} + \Delta L_T + \Delta L_{\Gamma} \quad (10.4)$$

— спектральный уровень помех от речи (самомаскировка речи); ΔL_{RM} — поправка на помехи от диффузного звука ($\Delta L_{RM} = 10 \lg R_{\max}$); ΔL_T — поправка на реверберационные помехи ($\Delta L_T = \frac{50}{3} \lg T$); ΔL_{Γ} — дифракционная поправка (берется из справочных таблиц); R_{\max} — акустическое отношение в расчетной точке (максимальное); T — время реверберации.

Если известны акустические шумы, время реверберации, акустическое отношение и индекс тракта, то можно рассчитать уровни речи и уровни шумов и помех, а по ним найти уровень ощущения E для каждой полосы равной разборчивости (10.1), а затем найти коэффициенты разборчивости ψ и формантную разборчивость A и по графикам — слоговую разборчивость и понятность речи. Поскольку уровень акустических шумов не зависит от индекса тракта, а уровень помех от речи растет с увеличением индекса тракта [(10.2), (10.4)], то, пока этот уровень меньше уровня акустических шумов B_a , целесообразно увеличивать индекс тракта, так как от этого уровень ощущения повышается. Когда будет выполнено условие

$$B_{\Pi} = B_a + 6, \quad (10.5)$$

дальнейшее увеличение индекса тракта становится нерациональным, так как уровень ощущения только в пределе может повыситься еще на 1 дБ. Из (10.4), (10.2) и (10.5) следует, что это условие дает индекс тракта

$$Q_{m.c.пaц} = B_a - B_{p.m} - (\Delta L_{RM} + \Delta L_T + \Delta L_{\Gamma}) + 27.$$

Такой индекс тракта называют рациональным.

В зависимости от формы спектра акустических шумов и частотной зависимости спектра речи и поправок

ΔL_{RM} , ΔL_T и ΔL_T рациональный индекс тракта на разных частотах получается разным. Для открытых пространств справедливы те же соотношения, но с исключением поправок на диффузный звук и реверберацию. В системах звукоусиления значение фактического индекса тракта по возможности должно быть близко к рациональному в каждой полосе равной разборчивости, но ни в коем случае не должно превышать предельный индекс на любой из частот передаваемого диапазона.

Поскольку в системах озвучения акустическая обратная связь отсутствует, то фактический индекс тракта целесообразно реализовать близким к рациональному.

Для случая радиотелефонной связи спектральный уровень речи у слушателя определяется, как и в предыдущем случае, но индекс тракта равен разности уровней, развиваемых телефоном на искусственном ухе и входным уровнем у микрофона в каждой из полос равной разборчивости $Q_{мс} = B_{вых} - B_{вх}$.

Уровень помех на выходе тракта определяется по сумме интенсивностей

$$B_{ш} = 10 \lg [10^{0,1B_{a1}} + 10^{0,1B_{a2}} + 10^{0,1B_{п}}] = B_{a1} (+) B_{a2} (+) B_{п},$$

где $B_{a1} = B'_a - \gamma_m$ — спектральный уровень акустических шумов в месте передачи B'_a , приведенный к выходу тракта; γ_m — шумостойкость микрофона, дБ; $B_{a2} = B''_a - \gamma_3$ — спектральный уровень акустических шумов в месте приема B''_a , приведенный к выходу тракта; γ_3 — шумозащитенность телефонных заглушек, дБ; $B_{п}$ — уровень электрических помех, приведенный к выходу тракта $B_{п} = B_э + Q_{пр}$; $Q_{пр}$ — индекс приемной НЧ части тракта (коэффициент усиления в децибелах); $B_э$ — спектральный уровень электрических помех на входе приемника.

Аналогично предыдущему случаю находят уровень ощущения, коэффициент разборчивости и формантную разборчивость.

Акустические шумы в месте передачи, приведенные к выходу тракта, как правило, значительно меньше электрических помех там же, поэтому обычно имеем две составляющие помех и шумов. Усиление приемника рационально увеличивать до тех пор, пока уровень электрических помех не будет удовлетворять условию $B_{п} = B_{a2} + 6$, откуда индекс усиления приемной части тракта рационально иметь следующим: $Q_{пр} = B_{a2} + 6 - B_э = B''_a - \gamma_3 + 6 - B_э$.

Его частотная зависимость определяется формой спектра акустических шумов в месте приема и частотной зависимостью шумозаглушения заглушек, так как спектр электрических помех практически равномерен.

Для получения одинаковой глубины модуляции для всех звуков речи (что обеспечивает наибольшую разборчивость речи, так как дает одинаковое превышение спектральных уровней речи над спектральными уровнями электрических помех) необходимо, чтобы низкочастотный тракт от входа микрофона до входа модулятора передатчика имел частотную характеристику с тенденцией подъема к высоким частотам около 6 дБ/окт, т. е. должно быть выполнено

условие $V_{рм} + Q_{пер} = \text{const}$. Если положить, что ВЧ тракт не вносит значительной неравномерности в частотную характеристику тракта, то суммарная частотная характеристика тракта определится как $Q_{мс} = V''_a - V_{рм} - \gamma z + C$, где C — некоторая постоянная величина.

На основе этой теории разработан тональный метод измерения разборчивости речи, сводящийся к измерению порога слышимости в реальных рабочих условиях, т. е. в шумах с уровнем не менее 50 дБ. В этих условиях индивидуальные пороги слышимости нивелируются, и расчетный порог слышимости целиком определяется спектральными уровнями шумов. Задавая на передающем конце уровни тональных сигналов, равные уровням звуков речи в соответствующих полосках речи, вводят затухание до пропадания слышимости тональных сигналов. Введенное затухание a и будет равно превышению уровня речи над уровнем шумов, т. е. уровню ощущения. Зная его для всех полос равной разборчивости, можно вычислить формантную разборчивость и по ней слоговую и т. д.

10.4. МЕТОДЫ ПОВЫШЕНИЯ РАЗБОРЧИВОСТИ РЕЧИ

Введение. Одним из методов повышения разборчивости речи является снижение уровней шумов и помех. Но в большинстве случаев они бывают заданными и не зависят от нас, хотя иногда можно снизить помехи от диффузного звука (путем уменьшения акустического отношения), от шумов, проникающих под заглушки, и т. п. Остается возможность манипулирования уровнями речи у слушателя по прямому звуку. Это возможно следующим образом: повышением уровня голоса говорящего, приближением микрофона ко рту и уменьшением неравномерности озвучения (путем приближения минимального уровня прямого звука к максимальному), увеличением индекса тракта. Последний способ возможен только при условии, что в системах звукоусиления не достигнут предельный индекс тракта, а в других системах — рациональный. И, наконец, есть еще способ повышения разборчивости речи — способ такой *компрессии динамического диапазона* речевого сигнала, при которой происходит повышение уровней слабых звуков речи при сохранении уровней громких звуков речи. Для систем с обратной акустической связью этот метод непригоден, так как возникает са-

мовозбуждение системы. А в остальных системах слабые уровни речи повышаются на величину компрессии динамического диапазона.

Из компрессоров наиболее применимы ограничители уровня, действие которых сводится к выравниванию пиковых уровней громких звуков, при этом не изменяются соотношения между уровнями слабых звуков. Подробно об этом будет сказано в курсе «Радиовещание».

Амплитудное ограничение. Рассмотрим предельный случай компрессии речи — предельное *амплитудное ограничение*, при котором речевой сигнал превращается в последовательность прямоугольных импульсов постоянной амплитуды, но с меняющимися интервалами между нулевыми переходами. При модуляции сигнала передатчика таким речевым сигналом получается телеграфный режим работы. А это означает, что все звуки речи будут иметь одинаковый и притом максимальный уровень на приеме. Если при передаче неограниченной речи слабые звуки маскировались помехами, то при таком способе передачи они окажутся выше уровней помех и разборчивость будет выше, чем при приеме неограниченной речи. Правда, качество звучания и разборчивость речи в отсутствие помех будут ниже, чем для неограниченной речи, но остаются еще в допустимых пределах. Оказывается, что предельно ограниченный речевой сигнал для слуха будет иметь распределение по частоте и по уровням, не очень сильно отличающееся от распределений неограниченной речи. На рис. 10.1 приведено среднее распределение уровней для предельного ограничения речи (кривая 2) и без него (кривая 1), крутизна кривой изменяется только вдвое, а на рис. 10.3 приведены спектральные огибающие звуков речи также для обоих условий (получаются несколько сглаженные форманты). Это объясняется тем, что слух имеет «комплект» узкополосных фильтров и, когда в одном или нескольких фильтрах уровень в данный момент повышается, то в других он уменьшается и наоборот, в результате чего в каждом из них процесс происходит с переменным уровнем.

В случае непредельного ограничения или компрессии результат получается промежуточный между предельным ограничением и передачей неограниченной, некомпрессированной речи.

Вокодерная связь. Вокодер представляет собой устройство, в передающей части которого из рече-

вого сигнала выделяются параметры, определяющие информативность речи. К этим параметрам относятся спектральные огибающие звуков речи и параметры основного тона речи, т. е. признаки звуков речи, медленно изменяющиеся во времени. Параметр основного то-

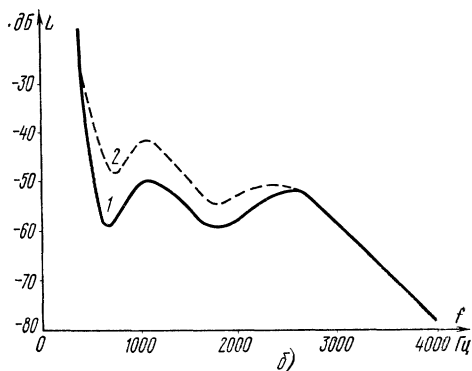
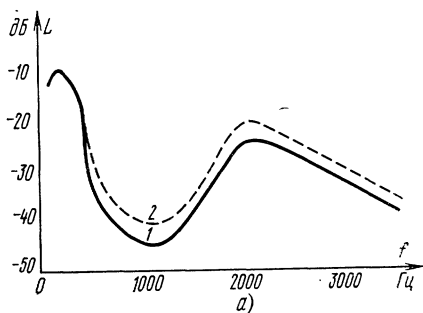


Рис. 10.3. Спектральные огибающие звуков речи до ограничения (сплошные кривые) и после (пунктирные): а) звука «э»; б) звука «м»

на управляет частотой генератора основного тона, находящегося в приемной части вокодера. Напряжение от этого генератора, создающего импульсы, сходные с импульсами гортани, подается на сложный фильтр, имитирующий акустическую систему речевого тракта для звонких звуков речи. При синтезе глухих звуков речи генератор создает шумовое напряжение, подаваемое на фильтры, имитирующие систему для глухих звуков речи. Параметрами этих фильтров и уровнем звуков речи управляют параметры, выделенные на передающем конце, в результате чего восстанавливается спектральная огибающая речевого сигнала. Качество и разборчивость восстановленного сигнала получаются достаточно высокими.

В зависимости от типа выделяемых параметров речевого сигнала есть вокодеры полосные, гармонические, формантные и фонемные. В полосных выделяется комплекс ординат спектра в узких полосках, в гармонических — коэффициенты Фурье от разложения спектральной огибающей в сумму гармоник, в формантных — частоты и амплитуды формант, в фонемных — какой звук произнесен. Так как эти параметры изменяются во времени со скоростью произнесения звуков речи (8—10 звуков в секунду), то частотный диапазон каждого параметра не превышает 20—25 Гц. Кроме того, в каждом из перечисленных типов вокодеров выделяется параметр (частота) основного тона голоса.

В полосных вокодерах берут 12—18 полос. Динамический диапазон каждого параметра не превышает 25 дБ, поэтому при переводе параметров в импульсную форму достаточен четырехзначный код (16 значений по 1,5 дБ), а во времени достаточно 50 отсчетов в секунду. Необходимая пропускная способность для спектральных параметров требуется $18 \times 4 \times 50 = 3600$ имп/с и на передачу основного тона еще 1200 имп/с, а всего 4800 имп/с. В настоящее время уже достигнуто высокое значение разборчивости речи и качества ее при скорости в 2400 имп/с. В гармоническом вокодере требуемая скорость передачи несколько меньшая.

В наиболее распространенном типе формантного вокодера выделяются четыре формантных частоты и четыре формантных уровня. Динамический диапазон этих параметров — не более 20 дБ, поэтому достаточны трехзначный код (8 значений по 2,5 дБ) и 40 отсчетов в секунду. Всего получается $8 \times 3 \times 40 = 960$ имп/с и 240 имп/с отводится на передачу мелодии основного тона. Требуемая скорость передачи параметров получается равной 1200 имп/с.

Для фонемного вокодера требуемая скорость передачи пока еще не ниже 300 имп/с, при этом теряется информация об индивидуальности говорящего.

Применение вокодеров дает повышение разборчивости речи в условиях радиопомех, так как сигналы передаются в телеграфном режиме со специальным помехоустойчивым кодированием. Речь, передаваемая с помощью вокодерной связи, идет с высоким уровнем и хорошей разборчивостью даже при наличии сильных помех и замираний. Хорошая помехоустойчивая радио-

связь получается при формантном кодировании. Ее применяют на линиях КВ связи.

Импульсная форма сигнала дает возможность кодирования речи [5] аналогично кодированию телеграфной передачи. Такую закодированную речь невозможно подслушать современными методами. Кроме того, вокодерная связь дает возможность значительного увеличения числа каналов в импульсных системах связи. Для обычного речевого сигнала требуется пропускная способность около 50 000 имп/с. В этом канале можно разместить около десяти передач при использовании полосного вокодера и около 40 при использовании формантного. В будущем, при разработке фонемного вокодера, эти возможности еще более увеличатся.

Вокодерную связь в США применяют с 1959 г. (в военной авиации для КВ связи). В настоящее время в США выпускается такая аппаратура для коммерческих радиостанций с засекречиванием. Габариты и масса подобной аппаратуры уже находятся в приемлемых пределах. Разрабатываются вокодеры на новых интегральных элементах с цифровыми методами анализа и синтеза речевого сигнала. Это значительно упрощает производство подобных устройств и удешевляет их.

Г л а в а 11

АКУСТИЧЕСКИЕ ИЗМЕРЕНИЯ

11.1. ВВЕДЕНИЕ

Акустические измерения имеют ряд специфических особенностей. Так, измерение характеристик электрсакустической аппаратуры необходимо проводить в условиях свободного поля, т. е. когда можно пренебречь влиянием отраженных волн. В обычных помещениях это условие невыполнимо, а проводить измерения на открытом воздухе сложно и не всегда возможно. Во-первых, на открытом воздухе трудно избежать отражений от ряда поверхностей, например, от земли. Во-вторых, проведение измерений в этом случае зависит от атмосферных условий и может приводить к большим погрешностям, не говоря уже о ряде других неудобств. В-третьих, на открытом воздухе трудно избежать влия-

ния шумов. Поэтому для измерений в свободном поле пользуются специальными звукозаглушенными камерами, в которых отраженные волны практически отсутствуют.

Для ряда измерений (например, для измерения мощности громкоговорителя, измерения коэффициентов поглощения и т. д.) требуется диффузное поле. В обычных помещениях звуковое поле далеко от состояния диффузности. Поэтому строят специальные помещения, в которых можно создать диффузное поле. Соответствующие помещения называют реверберационными (или гулками) камерами. Звукозаглушенную и реверберационную камеры называют звукомерными.

Электроакустическая аппаратура, как правило, имеет неравномерные частотные характеристики с резкими пиками и провалами. Для правильной оценки слухового восприятия эти характеристики следует сглаживать. Далее, при измерениях в помещениях и даже в реверберационной камере вносится погрешность в результаты, вызываемая неравномерностью распределения плотности энергии в помещении и зависимостью плотности энергии от частоты. Во избежание этого при акустических измерениях применяют специальные сигналы, например, воющий тон и шумовой сигнал. Воющий тон представляет собой частотномодулированный сигнал. Обычные его параметры: девиация — 50 Гц, частота изменений — 5—10 раз в секунду. Шумовой сигнал применяют только флуктуационного вида с различной формой спектра. Применяют белый шум (одинаковая плотность спектра во всем диапазоне измерений), розовый шум (плотность спектра уменьшается к высоким частотам с крутизной 3 дБ/окт) и речевой шум (плотность спектра в зависимости от частоты изменяется соответственно форме среднего спектра речи) (см. рис. 3.2). Для измерений с шумом пользуются или всем спектром или выделяют из него полосы, когда надо проводить измерения частотных зависимостей. Полосы берут шириной в треть октавы, полкоктавы или октавные в зависимости от необходимой точности измерений.

Для ряда измерений необходимо, чтобы практически отсутствовали акустические шумы, поэтому измерительные помещения должны быть хорошо звукоизолированы.

11.2. ЗВУКОМЕРНЫЕ КАМЕРЫ

Оказывается, не так просто оборудовать заглушенную камеру (рис. 11.1). Прежде всего трудно получить большое поглощение звука. Если, например, коэффициент поглощения материала, располагаемого на ограничивающих поверхностях камеры, будет равен 0,99, то при этом интенсивность отраженной волны будет составлять 0,01 от интенсивности волны, падающей на эти поверхности: $I_{\text{отр}} = \alpha_{\text{отр}} I_{\text{пад}} = 0,01 I_{\text{пад}}$. А по давлению это отношение будет составлять 0,1, так как $I_{\text{отр}}/I_{\text{пад}} = p_{\text{отр}}^2/p_{\text{пад}}^2$. Давление в пучности будет равно $1,1 p_{\text{пад}}$, а в узле — $0,9 p_{\text{пад}}$. Неравномерность по давлению составит

$1,1/0,9 = 1,2$. Следова-

тельно, ошибка измерения может достигать 20%. Если же задаться ошибкой не более 5%, то коэффициент поглощения ограничивающих поверхностей должен быть не менее 0,9994. На средних и высоких частотах удастся получить такой высокий коэффициент поглощения. Но на низких частотах почти невозможно. Даже в лучших камерах ошибка измерения получается больше 5% на частотах ниже 100 Гц. Но и для получения таких коэффициентов поглощения толщина материалов доходит до 1,5—2 м и более. Для увеличения поглощающей способности материала его изготавливают в виде узких пирамид или клиньев 3 (см. рис. 11.1) высотой до 1,5 м, с основанием 15×15 или 15×30 см, укрепленных основаниями на листовом поглощающем материале 4. В качестве поглощающих материалов используют стекловолокно и другие негорючие волокнистообразные материалы (стекловата опасна в эксплуатации, но она самая дешевая из поглощающих материалов). Между стенами и этим поглощающим материалом с некоторым зазором располагают дополнительный поглощающий листовой мате-

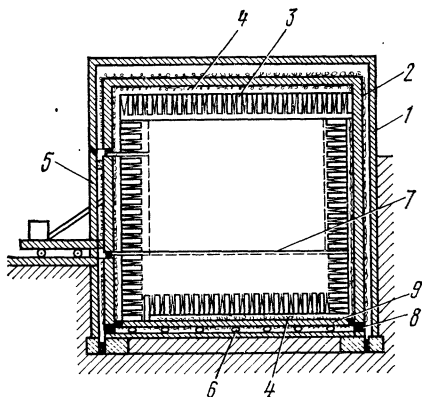


Рис. 11.1. Разрез звукомерной заглушенной камеры

ка измерения получается больше 5% на частотах ниже 100 Гц. Но и для получения таких коэффициентов поглощения толщина материалов доходит до 1,5—2 м и более. Для увеличения поглощающей способности материала его изготавливают в виде узких пирамид или клиньев 3 (см. рис. 11.1) высотой до 1,5 м, с основанием 15×15 или 15×30 см, укрепленных основаниями на листовом поглощающем материале 4. В качестве поглощающих материалов используют стекловолокно и другие негорючие волокнистообразные материалы (стекловата опасна в эксплуатации, но она самая дешевая из поглощающих материалов). Между стенами и этим поглощающим материалом с некоторым зазором располагают дополнительный поглощающий листовой мате-

риал. В камере не должно быть каких-либо предметов, могущих отражать звуковые волны. Поэтому всякие приспособления для установки аппаратуры и сама аппаратура должны иметь очень малые размеры по сравнению с длинами звуковых волн. Микрофоны и громкоговорители подвешивают на растяжках или блоках, вращающие устройства скрывают под поглощающим материалом и только их оси могут выходить наружу. Для подхода к аппаратуре применяют убирающийся трап 7.

После постройки и ремонта камеру проверяют на неравномерность поля и определяют возможную ошибку измерения во всем диапазоне частот. Высокие требования предъявляют и к звукоизоляции камеры. Дело в том, что в камерах иногда приходится измерять уровни собственных шумов микрофона (0—20) дБ и пороги слышимости людей (0—10) дБ. Поэтому уровень шумов в критических полосках слуха должен быть ниже порога слышимости. Это требование трудно выполнить, так как для этого необходимо, чтобы общий уровень проникающих шумов с типовыми спектрами был не более 15 дБ на средних частотах. В лучших камерах все же реализуют это требование. Но для этого камера имеет двойные стены 1, 2, причем внутренние стены устанавливаются на изолированном фундаменте с плавающим полом 9, 6 и подвесным потолком. Между стенами, полом и потолком ставят виброизолирующие прокладки 8. Внешние стены также имеют свой фундамент, изолированный от общего фундамента здания. Камеры строят вдали от проездов с выходом в тихие места. Двери из аппаратной в камеру делают двойные 5 с теми же поглощающими материалами. Они входят в проем на «конус» и имеют уплотнители, зажимаемые специальными затворами.

Для получения полезного объема камеры $4 \times 4 \times 4$ м внешние размеры камеры получаются примерно $10 \times 10 \times 12$ м (высота получается несколько больше из-за установки разных приспособлений).

Реверберационная камера должна иметь очень хорошо отражающие поверхности, и все предметы в ней также должны хорошо отражать звуковые волны. Удается получить средний коэффициент поглощения около 0,015, что обеспечивает время реверберации в камере с объемом 90 м^3 не менее 7—9 с. При таком поглощении диффузность поля получается достаточно высокой и обеспечивает точность измерений не ниже 2—3%.

На низких частотах из-за резонансов камеры диффузность поля получается хуже, чем на высоких, поэтому измерения на частотах ниже 100 Гц дают повышенную ошибку измерений. У этого типа камеры звукоизоляция ниже, чем у заглушенной камеры, примерно на 25 дБ [см. (7.25)], но для измерений в диффузном поле этого достаточно, так как проникающие шумы не превышают 40 дБ. В звукомерных камерах размещают только измерительный микрофон и по мере необходимости испытуемый микрофон и измерительный громкоговоритель или испытуемый громкоговоритель. Всю остальную измерительную аппаратуру располагают в аппаратной, изолированной от камеры. Измерительные громкоговорители работают от соответствующих генераторов. Так как практически самый лучший громкоговоритель имеет неравномерность частотной характеристики не менее 6 дБ, то обычно применяют автоматическое регулирование чувствительности громкоговорителя с тем, чтобы развиваемое им звуковое давление во всем измерительном диапазоне частот не отклонялось от заданного более чем на 2—3%. Схема авторегулятора показана на рис. 11.2. Для регулировки применяют измерительный микрофон с усилителем, подключаемый к авторегулятору. При изменении звукового давления, создаваемого громкоговорителем, авторегулятор изменяет напряжение на громкоговорителе так, чтобы звуковое давление осталось прежним. Тот же измерительный микрофон входит в состав измерителя звукового давления, дающего возможность отсчета звукового давления непосредственно в паскалях или децибелах.

Измерительный громкоговоритель чаще всего делают в виде агрегата, причем каждый элемент агрегата работает только в своем диапазоне. Однако есть и широкодиапазонные измерительные громкоговорители, стоящие очень дорого, так как они требуют специальной подгонки их характеристик. Для высокочастотных элементов агрегата используют конденсаторные громкоговорители или малые рупорные электродинамические. Для низкочастотного и среднечастотного элементов используют диффузорные громкоговорители.

Измерительные микрофоны, как правило, конденсаторные, так как они имеют равномерную частотную характеристику в широком диапазоне частот (от 20 Гц до 40 кГц) и малые размеры. В СССР выпускают из-

мерительный микрофон типа МК-6, диаметр его равен 15 мм.

Заглушенную камеру снабжают поворотными устройствами для съемки характеристик направленности. Поворотные устройства приводятся в движение

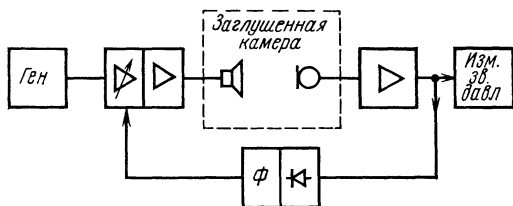


Рис. 11.2. Схема автоматического поддержания уровня звука в измерительной камере

синхронным мотором с тем, чтобы согласовать их углы поворота с углами поворота столика, на котором закрепляется бланк характеристики направленности. Столик находится в аппаратной комнате около измерителя звукового давления.

11.3. ИЗМЕРИТЕЛЬНАЯ АППАРАТУРА И АКУСТИЧЕСКОЕ 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, быстродействующие регистраторы уровня, реверберометры, искусственный рот, измерительный телефон, искусственное ухо, вибрационный столик, измерительные трубы, спектральные анализаторы, анализаторы амплитудных распределений, пистонифоны и дополнительные электроды и др.

Измерители звукового давления состоят из измерительного микрофона и соединенного с ним электронного вольтметра, градуированного в паскалях или в децибелах относительно 10^{-12} Вт/м².

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 — специальный измеритель звукового давления. От обычного он отличается приспособлением для измерений звукового давления в небольшом замкнутом объеме, например в ушной раковине при работе телефона или непосредственно у поверхности какого-нибудь тела, когда размеры обычного измерительного микрофона недостаточно малы. Зонд имеет тонкую трубку длиной от 10 до 50 см, к внутреннему концу которой примыкает лабиринт с поглощающим материалом, чтобы не было отражений звуковых волн от конца трубки. Сбоку у этого конца трубки расположен измерительный микрофон, мембрана которого открыта в полость объема, находящегося между концом трубки и лабиринтом.

Шумомеры отличаются от измерителей звукового давления только наличием шкал *A*, *B* и *C* для измерения уровня громкости. Первая соответствует уровню громкости 40 фон, вторая — 70 фон, третья — 85 фон и выше. Кроме того, у шумомера может быть и четвертая характеристика — равномерная в широком диапазоне частот. Шумомеры обычно снабжают полосовыми третьоктавными или октавными фильтрами с компенсацией их затухания. В шумомерах у измерителя есть две-три постоянных 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 дБ). Запись ведется чернилами или резцом на красной бумаге, покрытой тальком. Скорость записи, диапазон и постоянная времени могут изменяться скачками в некоторых пределах. Регистраторы уровня обычно подключают к измерителям звукового давления и поэтому можно автоматически записывать частотные характеристики аппаратуры, характеристики направленности и др.

Реверберометр дает возможность измерять время реверберации в помещении. Большинство из них имеет устройство временной задержки до нескольких секунд и индикатор уровня, регистрирующий уровень перед выключением источника звука и через определенное время после его включения.

Искусственный рот представляет собой громкоговоритель, имеющий выходное отверстие, соответ-

вующее среднему отверстию рта человека при разговоре. При этом объем камеры между диафрагмой громкоговорителя и выходным отверстием равен среднему объему рта человека. В качестве громкоговорителя обычно используют головку рупорного узкогорлого громкоговорителя. Искусственный голос предназначен для измерений характеристик микрофонов ближнего действия (например, ДЭМШ, микрофоны для телефонной связи и т. п.).

Искусственное ухо (рис. 10.3) представляет устройство, состоящее из небольшой камеры, на дне которой находится измерительный конденсаторный микрофон, причем мембрана микрофона находится на уровне поверхности дна камеры. Объем камеры или 6 см^3 , или 2 см^3 в зависимости от того, какой тип телефона должен испытываться: обычный или втулочный (вставляемый в слуховой канал). К входному отверстию камеры прижимают испытуемый телефон.

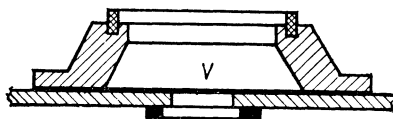


Рис. 11.3. Разрез искусственного уха (V — объем камеры)

Вибрационный столик служит для снятия характеристик ларингофонов. Он представляет собой поставленную вертикально головку динамического громкоговорителя, к звуковой катушке которого прочно прикреплена круглая металлическая массивная пластинка. На пластинке, расположенной горизонтально, укрепляют ларингофон. Столик градуируют по скорости колебаний пластинки. Напряжение, развиваемое ларингофоном, измеряют электронным вольтметром.

Измерительные телефоны обычно используют или для измерений порога слышимости, или для градуировки микрофонов по давлению в трубе.

Для абсолютной градуировки микрофонов по давлению пользуются *методом взаимности*. Наиболее легко реализовать этот метод с помощью труб и обратимых преобразователей (см. § 11.4). Поэтому лаборатории обычно 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 (длина ее должна быть не менее $\lambda_{\text{макс}}$). Трубы оборудуют миниатюрным измерительным микрофоном с электронным вольтметром. Микрофон можно свободно перемещать по длине трубы. Диаметр трубы берут не менее 10 см, что определяет верхнюю границу частотного диапазона измерений (во избежание поперечного резонанса трубы, получающегося при $\lambda = d$. Для $d = 10$ см эта граница составляет 3500 Гц). Поглощающим материалом закрывают одно отверстие трубы, а в другом помещают громкоговоритель.

Для анализа речи, музыки и шумов часто используют спектральные анализаторы с параллельным или с последовательным анализом. В этих случаях в анализатор входит комплект полосовых фильтров (чаще всего третьоктавных) с переключением их автоматически или ручным способом. В спектральный акустический анализатор входит измеритель звукового давления с включенными фильтрами между микрофонным усилителем и собственно измерителем.

При последовательном анализе берут один или два полосовых фильтра: широкий с полосой 300 Гц или узкий с полосой 50 Гц. Исследуемый сигнал обычно смещают по спектру в область около 20—40 кГц и во время измерений дополнительно смещают по частоте в пределах ширины 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.

Пистонофон используют для абсолютной градуировки микрофонов. Он представляет собой поршень, приводимый в движение головкой громкоговорителя и создающий в замкнутом объеме переменное давление. Од-

на сторона этого объема является диафрагмой микрофона. Боковые стенки, заключающие объем, делаются массивными. Амплитуду колебаний поршня измеряют оптическим микрометром.

Для тех же целей используют дополнительный электрод. Он устанавливается параллельно мембране конденсаторного микрофона на небольшом расстоянии от него. Между электродом и мембраной подается поляризирующее и переменное напряжения. Зная расстояние между электродом и мембраной, а также величины напряжений, можно легко вычислить чувствительность микрофона. Дополнительный электрод делают перфорированным, чтобы не создавать дополнительной упругости для мембраны микрофона.

Наконец, следует сказать о комплекте универсальной измерительной акустической аппаратуры. В нее входят почти все перечисленные выше приборы с рядом вспомогательных приспособлений. 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.

11.4. МЕТОДЫ ИЗМЕРЕНИЙ ОСНОВНЫХ ХАРАКТЕРИСТИК АППАРАТУРЫ И ПОМЕЩЕНИЙ¹⁾

Измерение характеристик микрофона в заглушенной камере. Для измерения чувствительности микрофона в свободном поле следовало бы сначала измерить звуковое давление в точке, куда будет помещен испытуемый микрофон, а потом уже помещать его в эту точку. Но так как в камере отсутствует интерференция и расстояние от громкоговорителя берут равным нескольким метрам при диаметре излучателя не более 25 см, то измерительный микрофон допускается располагать поблизости от испытуемого микрофона, хотя на высоких частотах он уже может вносить ошибку в измерения. Устанавливая по измерителю необходимую величину звукового давления, измеряют напряжение, развиваемое испытуемым микрофоном. При автоматической регулировке давления можно снимать частотную характеристику микрофона путем изменения

¹⁾ Более подробно о методах акустических измерений см. в [8].

частоты генератора. При вращении испытуемого микрофона таким же способом снимают характеристику направленности. Уровень собственных шумов микрофона измеряют при выключенном громкоговорителе.

Измерение характеристик микрофона в реверберационной камере. В этой камере измеряют только индексы направленности микрофона. Размещая измерительный микрофон в зоне чисто диффузного поля, поблизости от испытуемого микрофона, измеряют развиваемое им напряжение. Отношение осевой чувствительности микрофона, измеренной в заглушенной камере, к чувствительности, измеренной в реверберационной, дает диффузный индекс направленности (5.7)

$$Q_{\text{диф}} = 20 \lg (E_{\text{ос}}/E_{\text{диф}}) = N_{\text{м.о}} - N_{\text{диф}},$$

где $N_{\text{м.о}}$ и $N_{\text{диф}}$ — стандартные уровни осевой и диффузной чувствительности микрофона (5.3).

Градуировка микрофонов методом взаимности. Из теоремы взаимности (4.9) и (4.9а и б) для обратимых преобразователей следует один важный вывод: если обратимый преобразователь использовать, например, сначала как электромеханический преобразователь, а затем как механоэлектрический, то можно написать, что

$$\left. \frac{U}{v} \right|_{i=0} = \left. \frac{F}{i} \right|_{v=0} \quad \text{или} \quad U_{\text{ХХ}} i_{\text{ХХ}} = p_{\text{ХХ}} S_{\text{тр}} \frac{p_{\text{ХХ}}}{Z_{\text{тр}}} = \frac{p_{\text{ХХ}}^2 S_{\text{тр}}}{Z_{\text{тр}}},$$

где $Z_{\text{тр}}$ и $S_{\text{тр}}$ — волновое сопротивление и поперечное сечение трубы; $U_{\text{ХХ}}$ — напряжение, развиваемое механоэлектрическим преобразователем на холостом ходу; $i_{\text{ХХ}}$ — ток на входе электромеханического преобразователя на холостом ходу (т. е. при заторможенном выходе); $p_{\text{ХХ}}$ — звуковое давление, развиваемое излучателем, подбираемое равным звуковому давлению, действующему на микрофон.

Градуировка микрофона в резонансной трубе. Градулируемый микрофон (обычно это измерительный конденсаторный микрофон) располагают в вырезе трубы, сделанном на ее середине 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 (поверхность их амбушуров должна быть по возможности хорошо отражающей). Трубу возбуждают на резонансных частотах ($f = n 340/l$, где $l = n\lambda$ — длина трубы), тогда в середине трубы и у поверхности преобразователей будут слущности давлений $p_{\text{макс}}$ с одинаковыми амплитудами. При первом измерении один преобразователь работает излучателем, а второй — приемником. Этот приемник на выходе развивает ЭДС $U_{\text{п}}$. Во втором измерении второй преобразователь работает излучателем, а первый служит только отражателем. Регистрируют ток $i_{\text{п}}$, проходящий через излучатель. В обоих измерениях ЭДС

U_m , развиваемая градуируемым микрофоном, устанавливается одинаковой, что свидетельствует об одинаковом звуковом давлении в пучностях звуковых волн как в середине трубы, так и у ее концов.

Для заторможенного преобразователя-излучателя (4.96) коэффициент электромеханической связи $K_1 = F/i_{\Pi} = pS/i_{\Pi}$, где F — усилие, развиваемое излучателем; S — сечение трубы (оно равно площади излучателя); p — звуковое давление около излучателя.

Заторможенность получается вследствие того, что излучатель имеет хорошую отражающую поверхность и около него имеет место узел скорости колебаний $v_{\text{мин}}$. Коэффициент электромеханической связи приемника (4.9а) $K_2 = U_{\Pi}/v$. На основании теоремы взаимности (4.9) имеем $|K_1| = |K_2| = K_{\text{св}}$, т. е. в общем случае $pS/i_{\Pi} = U_{\Pi}/v$, а в данном — $p_{\text{макс}}S/i_{\Pi} = U_{\Pi}/v_{\text{мин}}$, откуда $p_{\text{макс}} = U_{\Pi}i_{\Pi}/v_{\text{мин}}S$. Так как удельное волновое сопротивление трубы $Z_{1в} = p_{\text{макс}}/v_{\text{макс}} = p_{\text{мин}}/v_{\text{мин}} = \rho c$, то $p_{\text{макс}} = U_{\Pi}i_{\Pi}\rho c/Sp_{\text{мин}} = U_{\Pi}i_{\Pi}\delta/Sp_{\text{макс}}$, где $\delta = p_{\text{макс}}/p_{\text{мин}}$ — отношение звуковых давлений в пучности и узле. Поэтому в пучности звуковое давление $p_{\text{макс}} = \sqrt{\rho c} U_{\Pi}i_{\Pi}\delta/S$. Следовательно, чувствительность градуируемого микрофона будет $E_d = U_m/p_{\text{макс}}$.

Градуировка микрофона в антирезонансной трубе. Для градуировки так же, как и в предыдущем случае, пользуются одинаковыми обратимыми преобразователями (например, динамическими телефонами), вставляемыми в концы трубы. Трубу возбуждают на антирезонансных частотах $f_{\text{а.ч}} =$

$$= (2n+1)340/4l, \text{ т. е. } l = (2n+1) \frac{\lambda}{4}. \text{ В первом измерении один пре-}$$

образователь служит излучателем, второй — приемником звука. Регистрируют ЭДС U_{Π} , развиваемую последним. Заменяя его на градуируемый микрофон, записывают ЭДС U_m , развиваемую им. Заменяя излучатель другим обратимым преобразователем, 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 волновое акустическое сопротивление трубы при этом равно акустическому сопротивлению плоской волны в неограниченном пространстве, то звуковое давление у микрофона получается равным

$$p = \sqrt{U_{\Pi}i_{\Pi} \frac{\rho c}{S}}, \text{ откуда имеем для чувствительности микрофона}$$

$E_d = U_m/p$. Заметим, что в данном случае утечка не играет роли, так как звуковое давление вследствие антирезонанса невелико и утечка энергии в щели между преобразователями и трубой не играет заметной роли.

В обоих случаях измерений (с трубами) получают чувствительность микрофона по давлению. Если размеры микрофона невелики в сравнении с длиной волны, то эта чувствительность будет равна чувствительности по полю.

Измерение характеристик громкоговорителей в заглушенной камере. Для снятия характеристик громкоговорителя с размерами излучающего отверстия в пределах 0,25—0,5 м устанавливают измерительный микрофон на расстоянии 1 м от рабочего центра громкоговорителя, для громкоговорителей с большими или меньшими размерами излучаю-

щего отверстия микрофон устанавливают соответственно дальше или ближе 1 м [8а].

Измерителем звукового давления регистрируют звуковое давление, развиваемое громкоговорителем, в зависимости от частоты, на которой возбуждают громкоговоритель (при снятии частотной характеристики, при измерении стандартного звукового давления и т. п.), или в зависимости от угла поворота громкоговорителя (при снятии характеристики направленности).

Напряжение, подводимое к громкоговорителю, устанавливают соответственно 0,1 от номинальной мощности при $P_{\text{ном}} \geq 0,5$ Вт. Для громкоговорителей, имеющих разные размеры излучателей в продольной и поперечной осях, снимают соответственно две диаграммы направленности— продольную и поперечную. Диаграммы направленности снимают или на ряде 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.

Измерение характеристик громкоговорителя в реверберационной камере. В этой камере измеряют излучаемую мощность громкоговорителя, исходя из ф-л (7.3), (1.11), (1.20) и (7.15):

$$P_a = \epsilon c \alpha_{\text{ср}} S/4 = p^2 \alpha_{\text{ср}} S/4\rho c, \text{ откуда } P_a = 0,161Vp^2/4 \cdot 412T = 100p^2V/T,$$

где T — время реверберации в камере; p — звуковое давление диффузного поля; V — объем камеры, м³; $\rho c = 412$ кг/м²·с.

Правда, эта мощность несколько меньше той, которую развивает громкоговоритель в открытом пространстве, так как вследствие реакции диффузного поля на излучатель уменьшается скорость колебаний излучателя, поэтому в некоторых случаях следует вносить поправку в результаты измерений.

Зная излучаемую мощность и звуковое давление, развиваемое громкоговорителем в заглушенной камере

на расстоянии 1 м от его центра, можно найти коэффициент осевой концентрации из (6.5) для $r=1$ м:

$$\Omega = 4\pi p_1^2 / \rho c P_a.$$

Методика этих измерений изложена в [8а].

Измерение коэффициента нелинейных искажений ведут при подведении к громкоговорителю номинального напряжения, а к измерительному микрофону при этом подключают измеритель нелинейных искажений или анализатор гармоник.

Измерение входного сопротивления громкоговорителей и микрофонов проводят, как и в случае измерения любого комплексного сопротивления. Например, путем изменения нагрузочного активного сопротивления измеряют собственное сопротивление микрофона.

Измерение характеристик микрофонов ближнего действия проводят с помощью искусственного рта. Искусственный рот предварительно градуируют эталонным измерителем звукового давления. Микрофон устанавливают на расстоянии 1,5—2,5 см от отверстия рта и измеряют развиваемое им напряжение при звуковом давлении (в точке микрофона), равном 1 Па. Измерения частотной характеристики рекомендуют проводить в заглушенном ящике или вдали от отражающих поверхностей. Характеристику направленности микрофона ближнего действия 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, определяет его шумостойкость.

Измерение характеристик телефона. Эти характеристики снимают при расположении телефона на искусственном ухе. Измеряют частотные характеристики чувствительности и отдачи телефона. В последнем случае 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 коэффициента поглощения звука в реверберационной камере. В такой камере измеряют диффузный коэффициент поглощения, обычно используемый при расчетах времени ре-

верберации. Для этого измеряют время реверберации камеры T_1 до внесения образцов поглощающего материала с площадью S_x и T_2 — после внесения их. Соответственно (7.15) коэффициент поглощения

$$\alpha_x = 0,161 \frac{V}{S_x} (1/T_2 - 1/T_1),$$

где V — объем камеры, м^3 .

Образцы поглощающего материала при измерениях должны быть расположены так, как они будут использоваться на практике (т. е. вместе с тем материалом, который будет находиться за ним). Размеры образцов должны быть близки к натуральным или во всяком случае должны быть больше самой длинной волны.

Измерение коэффициентов поглощения в трубе. Эти измерения основаны на соотношении между звуковыми давлениями в пучности и в узле колебаний. Если в прямой волне звуковое давление $p_{\text{пр}}$, а в отраженной $p_{\text{отр}}$, то в пучности оно будет равно $p_{\text{пр}} + p_{\text{отр}} = p_{\text{макс}}$, а в узле $p_{\text{пр}} - p_{\text{отр}} = p_{\text{мин}}$, где $p_{\text{отр}} = \beta_{\text{отр}} p_{\text{пр}}$; $\beta_{\text{отр}}$ — коэффициент отражения по давлению, т. е.

$$\beta_{\text{отр}} = (p_{\text{макс}} - p_{\text{мин}}) / (p_{\text{макс}} + p_{\text{мин}}).$$

Коэффициент отражения по интенсивности

$$\alpha_{\text{отр}} = |p_{\text{отр}}^2 / p_{\text{пр}}^2| = |(p_{\text{макс}} - p_{\text{мин}}) / (p_{\text{макс}} + p_{\text{мин}})|^2,$$

а коэффициент поглощения

$$\alpha = 1 - \alpha_{\text{отр}} = 1 - |(p_{\text{макс}} - p_{\text{мин}}) / (p_{\text{макс}} + p_{\text{мин}})|^2 = 2p_{\text{макс}}p_{\text{мин}} / (p_{\text{макс}} + p_{\text{мин}})^2$$

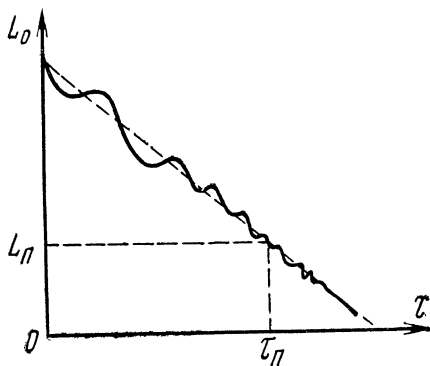
Расстояние между соседними пучностями или узлами дает возможность проконтролировать частоту колебаний, так как $\Delta l = 2c/\lambda$.

Измерение времени реверберации в обычных помещениях. Для этой цели используют ту же аппаратуру, что и в реверберационной камере. Но так как в обычных помещениях нельзя гарантировать диффузности поля, то используют воющий тон или шумовые сигналы (см. § 11.1) и измеряют время реверберации в ряде точек. Иногда для этого используют качающийся микрофон.

Если бы поле в помещении было диффузным, то с помощью реверберометра достаточно найти временную задержку, при которой уровень в помещении снизится

на 60 дБ. Это значение задержки 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 обычных помещениях, то приходится измерять пере-

Рис. 11.4. Измерение времени реверберации интегральным методом



пад 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. В практике применяются и реверберометры интегрального типа. В них происходит интегрирование уровней во времени с момента выключения источника звука L_0 до достижения заданного порогового уровня L_p . Если начальный уровень L_0 задан, то время реверберации (рис. 11.4) $T=120\beta/(L_0-L_p)^2$, где β — интегральное значение показаний прибора ($\beta = \int_0^{\tau_p} L dt$).

Измерение звукоизоляции перегородок сводится к измерениям уровней звукового давления перед перегородкой L_1 и после нее — L_2 . Измерения проводят в реверберационной камере. Перегородку плотно вставляют в толстую стену (без щелей) с виброизоляцией от других стен. Перегородки берут по возможности с размерами в натуральную величину. С учетом увеличения уровня в реверберационной камере [см. (7.24) и (7.25)] звукоизоляция перегородки

$$Q_{\text{пер}} = L_1 - L_2 + 10 \lg (S_{\text{пер}}/A),$$

где $S_{\text{пер}}$ — площадь перегородки; A — общее поглощение в реверберационной камере (определяется по времени реверберации в ней).

Измерение звукоизоляции помещений. В этом случае достаточно измерить уровень шума вне помещения и внутри него в нескольких точках. Величина звукоизоляции $Q_{\text{из}} = L_1 - L_2$.

Измерение акустических шумов, сигналов и их анализ. С помощью шумомера измеряют ориентировочное значение уровня громкости шума при использовании наиболее вероятной шкалы. После этого устанавливают переключатель на шкалу, соответствующую полученному уровню, и вновь измеряют уровень громкости. При необходимости включают полосовые фильтры и измеряют уровень интенсивности в каждой из полос (шкала С). Измерения проводят для той постоянной времени, которая задана по условиям.

Для определения соответствия шумов санитарным нормам по уровню звука его измеряют шумомером. Данные отсчитывают в децибелах по шкале А (дБА). Соответствие по спектру определяют путем измерения уровней звукового давления в децибелах по шкале С в октавных полосах со средними геометрическими частотами: 63, 125, 250, 500, 1000, 2000, 4000, 8000 Гц. Постоянная времени шумомера должна быть в положении «Быстро».

Для спектрального анализа различных сигналов применяют треть октавные фильтры со средними геометрическими частотами, определяемыми следующей последовательностью чисел: 1; 1,25; 1,60; 2,00; 2,50; 3,15; 4,00; 5,00; 6,30; 8,00 и 10,0, умножаемой соответственно на 10, 100, 1000, 10 000.

Амплитудные распределения уровней сигналов определяют с помощью 12 пороговых устройств, равномерно распределенных по динамическим диапазонам 25, 50 или 75 дБ. Постоянная времени берется равной 200 мс для субъективных оценок или 20 мс для аппаратурных целей.

Измерение разборчивости речи. Как уже указывалось, для измерений разборчивости речи пользуются методом артикуляции или методом выбора. Для артикуляционных измерений пользуются таблицами [8д]. Диктор читает слова или звукосочетания (слоги), а слушатели записывают их и после прочтения всех таблиц сверяют их с прочтенными таблицами. При чтении должны строго соблюдаться интервалы (например, 3с на один слог). Чтение должно быть четким, но

без подчеркивания. Число передаваемых таблиц определяют согласно требуемой точности (см. [8д]). После проверки подсчитывают процент правильно принятых элементов и определяют среднее значение разборчивости. Артикуляционная бригада должна быть составлена из молодых людей без дефектов речи и слуха. Она должна быть натренирована так, чтобы получать на эталонном тракте устойчивые результаты.

Обычный артикуляционный метод очень трудоемок: требует много операторов (в бригаду входят 4—5 человек слушателей и 1—2 диктора); много времени уходит на тренировку (для сильных искажений требуется несколько дней), на обработку результатов; результаты измерений частот зависят от настроения операторов и т. п. Метод выбора менее трудоемок, но его точность не настолько достаточна, чтобы им можно было пользоваться для различных приемо-сдаточных испытаний. Обычно им пользуются только для сравнительных испытаний. В 1957 г. был введен ГОСТ [8ж] на тональный метод измерения разборчивости речи, свободный от ряда недостатков артикуляционных методов. Метод был распространен на тракт проводной и радиосвязи и допущен к применению наравне с артикуляционным методом.

Тональный метод измерения разборчивости речи основан на том, что человек достаточно точно может определить уровень звука, при котором он достигает порога слышимости. При этом методе речь заменяют определенным числом отдельных тонов, последовательно воспроизводимых устройством, которое создает определенный уровень звукового давления перед микрофоном измеряемого тракта, а на выходе тракта при этом определяют уровень ощущения для каждого из этих тонов путем прослушивания их оператором через телефон или через громкоговоритель (для громкоговорящей связи). Уровень ощущения тона равен величине затухания, вводимого в цепь звуковоспроизводящего устройства до тех пор, пока не исчезнет слышимость каждого тона. По измеренным уровням ощущения тона при помощи таблиц и графиков, применяемых при расчете разборчивости речи, определяют величину формантной разборчивости речи, а по ней — слоговую, словесную разборчивость и понятность речи.

Для тонального измерения и определения разборчивости речи применяют следующие измерительные приборы и оборудование: искусственный рот; генератор звуковой частоты; электронный вольтметр, магазин затуха-

ний; генератор шума с звуковоспроизводящим устройством; два звукоизолированных друг от друга помещения. Допускается измерение в одном и том же помещении, если будет исключена возможность слышимости измеряемого сигнала по воздуху непосредственно (для громкоговорящей связи обязательно должны быть звукоизолированные помещения). Помещения должны быть защищены от воздействия посторонних звуков, сотрясений и шумов, кроме тех, которые задаются условиями испытаний. Измерения должны проводиться на трактах со всеми элементами, входящими в них, и в рабочих режимах с соблюдением технических условий для данных трактов и методов их испытаний.

Искусственный рот на расстоянии 2 см от центра выходного отверстия по оси в зависимости от средней частоты полос равной разборчивости должен создавать следующие уровни звукового давления:

частота, Гц	265	400	535	680	825	980	1145
уровень, дБ	77,5	76,5	74,0	72,0	69,5	67,5	66,0
частота, Гц	1320	1505	1700	1910	2140	4395	2685
уровень, дБ	64,0	63,0	62,0	61,0	60,5	59,5	58,5
частота, Гц	3020	3415	3890	4370	5215	6320	
уровень, дБ	58,0	57,5	57,0	56,5	56,0	54,5	

Измерение этих уровней при градуировке искусственного рта должно проводиться в отсутствие испытуемого микрофона. Допускается измерение и при наличии испытуемого микрофона, если этот микрофон имеет малые размеры и не искажает звукового поля вблизи искусственного рта. Уровень звукового давления измеряют любым измерителем, обеспечивающим точность измерений не менее 0,5 дБ. Обычно применяют или специальный измеритель уровня звукового давления, или шумомер с включением шкалы С (а если в нем есть дополнительная шкала с равномерной частотной характеристикой, то пользуются ею). Расположение искусственного рта в помещении должно быть таким, чтобы отражения от стен и других предметов не влияли на звуковое поле у микрофона. Спектральный состав и уровень акустического шума в помещениях, в которых находятся микрофон и слушатель, должны быть заданы техническими условиями на испытания. Если особо не оговорено, то шум должен быть диффузным, а спектр шума — речевой, с уровнем 65 дБ. Микрофон должен располагаться относительно искусственного рта так, как он располагается около рта человека. Если расстояние от рта человека не задано, то располагают микрофон на расстоянии 2 см от центра

рта по его оси, а для микрофонов типа ДЭМШ — сбоку от отверстия рта (на расстоянии 2 см от его оси). Магазин затуханий включают между генератором звуковой частоты и искусственным ртом, а располагают его около слушателя, чтобы слушатель мог сам регулировать затухание. После подготовки аппаратуры к испытаниям устанавливают напряжение на зажимах искусственного рта, соответствующее требуемому уровню звукового давления на первой частоте измерения (265 Гц). На приемном конце слушатель плавно вводит затухание до исчезновения слышимости тона (чтобы тон был лучше слышен, его делают прерывистым), затем затухание убавляют до момента появления слышимости звука. Среднее значение вводимого затухания этих двух измерений и является уровнем ощущения данной частотной составляющей. Затем измерения проводят для следующей частоты и т. д. При определении уровня ощущения тона в случае слушания на телефон микротелефонной трубки последний должен быть плотно прижат к уху слушателя, а при слушании на телефоны с оголовьем степень прижатия должна соответствовать условиям эксплуатации.

Измеренные уровни ощущения получаются для пикового уровня речи в соответствующей полосе равной разборчивости. Вычитая из них величину пик-фактора речи (12 дБ), получают средние значения уровней ощущения формант E_k (рис. 10.1). Пользуясь кривой 1 этого рисунка, по этим уровням находят коэффициенты разборчивости w_k для каждой полосы равной разборчивости. Суммируя эти значения [см. ф-лу (10.1а)] и деля на 20 (число полос), получают величину формантной разборчивости, а по ней можно найти слоговую разборчивость (см. рис. 10.2).

Измерение разборчивости речи объективным методом. Такой метод применяют, чтобы исключить влияние фактора субъективности слушателя. Как указывалось (§ 2.7), порог слышимости в шумах с уровнем выше 40 дБ равен уровню шума в критической полоске слуха. Это обстоятельство используют для измерения уровня ощущения речи. В этом случае вместо слушателя применяют искусственное ухо (см. рис. 11.3), на котором располагают телефон (для громкоговорящего приема его помещают в том месте, где размещается ухо слушателя). В искусственном ухе есть микрофон, напряжение от которого подается на измеритель уровня звукового давления. Между микрофоном и измерителем поочередно включают полосные фильтры с шириной по-

лосы, равной ширине критических полосок слуха. Изменяя уровень звукового давления, создаваемый шумами (в отсутствие сигнала), получают уровень порога слышимости, соответствующий действию этих шумов на слух человека. Затем генератор шума выключают и через испытуемый тракт подают тональный сигнал, как и в случае тонального метода, с уровнем, соответствующим данной полосе равной разборчивости. Вводят затухание между генератором и искусственным ртом до тех пор, пока на измерителе уровня (искусственного уха) не будет тот же уровень, что и для шумов в полосе равной разборчивости. Величина введенного затухания получается равной уровню ощущения речи.

Этот метод более стабилен, чем тональный, однако ему присущ такой недостаток: в шумах со спектром, сильно отличающимся от равномерного, он дает ошибку, обусловленную взаимной маскировкой составляющих шума. Оба метода дают ошибку измерений в импульсных шумах.

Измерение качества звучания художественных передач. Для этих измерений пользуются методом субъективных экспертиз. Сущность метода заключается в том, что проводят сравнение звучания через испытуемый тракт и эталонный. При этом для получения достаточной точности оценки приходится прибегать к большой группе экспертов (в их числе могут быть как профессионалы, так и обычные слушатели). Если надо оценить массовую аппаратуру, то приходится комплектовать группу из обычных слушателей, а если надо оценить профессиональную аппаратуру, то лучше прибегать к помощи профессионалов. Для оценки по классам точности необходимо иметь эталонные тракты с соответствующими максимальными значениями искажений для данного класса точности. Эксперты последовательно прослушивают одну и ту же передачу через испытуемый и эталонный тракты и оценивают, к какому из них ближе испытуемый.

Эталонные тракты градуируют по первичным эталонам. Такие эталоны (они должны быть у ведущих организаций) предварительно с помощью экспертиз обрабатываются и хранятся в дальнейшем для сравнения с рабочими эталонами.

Метод субъективных экспертиз трудоемок и не всегда обеспечивает достаточную точность оценки, особенно при различных специфических искажениях. Поэтому был предложен объективный метод оценки трактов передачи

различных сигналов, в том числе и сигналов художественных передач. Он основан на том, что вторичный сигнал должен возможно точно воспроизводить первичный (кроме фазовых соотношений) и с учетом точности слуха при определении уровней передачи. В этом методе используют корреляцию между уровнями первичного и вторичного сигналов. Для этого на вход коррелятора подают первичный и вторичный сигналы, нормированные по средним значениям и с компенсацией фазовых сдвигов между этими сигналами. Коэффициент взаимной корреляции этих сигналов показывает, насколько они одинаковы по амплитудным соотношениям. Оказывается, что такой коэффициент довольно хорошо согласуется с оценками экспертов. Трудность данного метода заключается в том, что не всегда легко компенсировать фазовые сдвиги, особенно при передаче через большое число звеньев тракта.

1. **Фурдуев В. В.** Акустические основы вещания. М., Связьиздат, 1960. 320 с.
2. **Дрейзен И. Г.** Электроакустика и звуковое вещание. М., Связьиздат, 1961. 544 с.
3. **Иофе В. К., Янпольский А. А.** Расчетные графики и таблицы по электроакустике. М.—Л., Госэнергоиздат, 1954. 524 с.
4. **Ржевкин С. Н.** Слух и речь в свете современных физических исследований. М., ОНТИ НКТП, 1935. 312 с.
5. **Сапожков М. А.** Речевой сигнал в кибернетике и связи. М., Связьиздат, 1963. 452 с.
6. **Покровский Н. Б.** Расчет и измерение разборчивости речи. М., Связьиздат, 1962. 392 с.
7. **Папернов Л. З.** Озвучение открытых пространств. М., Связьиздат, 1963. 104 с.
8. ГОСТ:
 - а) Акустические единицы. ГОСТ 8849—58. Введ. 1/1 1958. М., 1957. 4 с.;
 - б) Микрофоны. Методы электроакустических испытаний. ГОСТ 16123—70. Введ. 1/1 1971. М., 1968. 53 с.;
 - в) Громкоговорители. Методы электроакустических испытаний. ГОСТ 16122—70. Введ. 1/1 1971. М., 1969. 45 с.;
 - г) Звукоизоляция. Методы измерений. Показатель звукоизоляции. ГОСТ 15116—69. Введ. 1/1 1971. М., 1969. 18 с.;
 - д) Передача речи по трактам и радиотелефонной связи. Требования к разборчивости речи и методы артикуляционных измерений. ГОСТ 16600—72. Введ. 27/IX 1972. М., 1972. 90 с.;
 - е) Аппараты телефонные общего применения. Методы испытаний. ГОСТ 7153—68. Введ. 1/1 1968. М., 1967. 34 с.;
 - ж) Тональный метод измерения разборчивости речи. ГОСТ 8031—56. Введ. 1/1 1957. М., 1956. 10 с.
9. **Сапожков М. А.** Проектирование систем звукоусиления и озвучения для речевых передач в помещениях. М., ВЗЭИС, 1973. 90 с.
10. **Бабуркин В. Н., Гензель Г. С., Павлов Н. Н.** Электроакустика и звуковое вещание. М., «Связь», 1967. 312 с.
11. **Скучик Е.** Основы акустики. Пер. с англ. Под ред. Л. М. Лямшева. М., «Мир», 1976 (2 тома). 520 с., 542 с.
12. **Ржевкин С. Н.** Курс лекций по теории звука. М., Изд-во МГУ, 1960. 336 с.
13. **Харкевич А. А.** Теория электроакустических аппаратов. М., Связьиздат, 1940. 364 с.
14. **Цвикер З., Фельдкеллер Р.** Ухо как приемник информации. Пер. с немецк. Под ред. Б. Г. Белкина. М., «Связь», 1971. 256 с.
15. **Харкевич А. А.** Теория преобразователей. М.—Л., Госэнергоиздат, 1948. 191 с.
16. **Харкевич А. А.** Спектры и анализ. М., Госиздат технико-теоретической литературы, 1953. 216 с.
17. **Сапожков М. А.** Защита трактов радио и проводной телефонной связи от помех и шумов. М., Связьиздат, 1959. 254 с.
18. **Вокодерная телефония.** Под ред. А. А. Пирогова. М., «Связь», 1974. 536 с.
19. **Маньковский В. С.** Акустика студий и залов для звуковоспроизведения. М., «Искусство», 1966. 376 с.
20. **Чертов А. Г.** Международная система единиц измерений. М., Росвиздат, 1963. 168 с.

ПРЕДМЕТНЫЙ УКАЗАТЕЛЬ

- Акустическая (рабочая) ось 74
— перспектива 117
Акустический трансформатор 66
— (рабочий) центр 117
Акустическое отношение 172
— сопротивление 10
— — удельное 10
Амбиофоническая система 203
Амплитудное ограничение 242
Аналоги электромеханические 64
— электроакустические 68
Антиформанты 44
Бар 6
Виртуальный источник звука 39
Высота звука 21
Добротность системы 65
Закон Вебера—Фехнера 25
Звуки речи 47
— — глухие 48
— — звонкие 47
Звуковое давление 6, 117
— — номинальное 117
— — среднее 117
— — стандартное 117
Звуковое поле 5
— — диффузное 74, 165, 246
— — свободное 73
Звукоизоляция перегородки 188, 260
— помещения 189, 260
Индекс направленности 76
— тракта 227, 238
— — предельный 229
— — рациональный 240
— — фактический 239
Интенсивность звука 10
Интонация 47
Искусственный рот 251
Искусственное ухо 252
Компрессия речи 241
Коэффициент звукопроводности 188
— направленности 75
— осевой концентрации 119
— отражения 164, 181
— поглощения 181
— — — реверберационный 175
— полезного действия 121
— разборчивости 236
— электромеханической связи 71, 72
Кривые равной громкости 27
Критическая частота рупора 148
Линейная группа микрофонов 88
Локализация звукового поля 208
— источника звука 206
Маскировка 30
Мел 22
Метод артикуляционный 234
— выбора 235
— координат 211
Мощность колебаний 10
— номинальная 116
— паспортная 116
Направленности диаграмма 75, 118
— характеристика 74, 118
Неравномерность озвучения 205
— частотной характеристики 74, 118
Обратная связь по диффузному звуку 230
— — — прямому звуку 229
Озвучение 204
Озвучиваемая поверхность 205
Основной тон голоса 47
Паскаль 6
Период колебаний 5
Пик-фактор 43
Плотность энергии 12
Полоса равной разборчивости 236
Помехи 53
Понятность речи 205, 235
Порог болевой (осозания) 24
— изменения 24
— различия интенсивности 24
Поршневая диафрагма 122, 125
Приемник градиента давления 79, 97, 110
— — — асимметричный 96
— групповой 88
— давления 78, 92, 103
— комбинированный 101, 106
Прямой звук 172
Радиус гулкости 174
Разборчивость речи 233
— — словесная 235
— — слоговая 235
— — формантная 237
Ревербератор листовой 202
— магнитный 201

- Реверберация 170
- в связанном помещении 170
- оптимальная 178
- стандартная 174
- эквивалентная 177
- Реверберации четкость 174
- Резонансная частота 65
- Резонатор Гельмгольца 67
- Скорость звука 5, 9
- колебаний 7
- — — объемная 67
- Слитность звучания 180, 207
- Слуха критические полосы 20
- постоянная времени 34
- частотные группы 20
- Спротивление вносимое 70, 71, 72
- входное 69, 131
- громкоговорителя 118
- механическое 65
- микрофона (внутреннее) 73
- собственное четырехполосника 70
- — — — внутреннее 70
- Спектральная модуляция 50
- плотность 44
- Субъективные гармоника 36
- Тембр звука 44
- Тенденция спектра 46
- Угол излучения 118
- Узел сопротивлений 65
- Уравнение волновое 9
- движения 8
- неразрывности 8
- состояния среды 9
- Уровень звукового давления 26
- интенсивности 25
- квазимаксимальный 41
- октавный 45
- ощущения 27
- плотности энергии 25
- собственного шума 77
- спектральный 44
- стандартной чувствительности 74
- суммарный 45
- электрический 43
- Уровнеграмма 41
- Фон 27
- Фонема 47
- Форманта 48, 49
- Фронт волны 5
- Фронт/тыл 76
- Цепочка громкоговорителей 221
- сопротивлений 66
- Частота колебаний 5, 6
- Чистый тон 24
- Чувствительность громкоговорителя 117
- диффузная 73
- микрофона 73
- осевая 75, 121
- характеристическая 117
- Шум белый 46
- равномерновоздействующий 34
- речевой 46
- розовый 46
- Шумозащищенность микрофона 84
- Эхо 35
- Эхо-камера 200

	Стр.
Предисловие	3
Введение	4
Глава 1	
Звуковое поле в неограниченном пространстве	5
1.1. Определения	5
1.2. Линейные характеристики	6
1.3. Энергетические характеристики	10
1.4. Плоская волна	12
1.5. Сферическая волна	13
1.6. Цилиндрическая волна	16
Глава 2	
Основные свойства слуха	17
2.1. Строение уха	17
2.2. Восприятие по частоте	20
2.3. Порог слышимости	22
2.4. Восприятие по амплитуде	24
2.5. Уровни	25
2.6. Громкость и уровень громкости звука	26
2.7. Эффект маскировки	30
2.8. Громкость сложных звуков	33
2.9. Временные характеристики слухового восприятия	34
2.10. Нелинейные свойства слуха	36
2.11. Бинауральный эффект	38
Глава 3	
Акустические сигналы	39
3.1. Определения	39
3.2. Динамический диапазон	40
3.3. Средний уровень	42
3.4. Частотный диапазон и спектры	44
3.5. Временные характеристики акустического сигнала	46
3.6. Первичный речевой сигнал	46
3.7. Вторичный сигнал	51
3.8. Шумы и помехи	53
3.9. Линейные искажения	54
3.10. Нелинейные искажения	55
3.11. Переходные искажения	57
3.12. Допустимые величины искажений	57
Глава 4	
Электромеханоакустические системы и их элементы	59
4.1. Введение	59
4.2. Метод электромеханических аналогий	60
4.3. Механические системы	64

	Стр.
4.4. Акустические системы	66
4.5. Электромеханические преобразователи	69
Глава 5	
Микрофоны	72
5.1. Определения	72
5.2. Акустические характеристики микрофонов	78
5.3. Динамические (катушечные) микрофоны	92
5.4. Ленточные микрофоны	97
5.5. Конденсаторные и электретные микрофоны	102
5.6. Пьезомикрофоны	107
5.7. Электромагнитные микрофоны	108
5.8. Угольные микрофоны	113
5.9. Ларингофоны	114
Глава 6	
Громкоговорители и телефоны	116
6.1. Определения	116
6.2. Диффузорные излучатели	122
6.3. Диффузорные динамические громкоговорители	129
6.4. Групповые излучатели и громкоговорители	142
6.5. Рупорные излучатели	147
6.6. Рупорные электродинамические громкоговорители	152
6.7. Электростатические громкоговорители	156
6.8. Громкоговорящие акустические системы	158
6.9. Пневматический громкоговоритель	160
6.10. Телефоны	161
Глава 7	
Акустика помещений	164
7.1. Распространение звука в ограниченном пространстве	164
7.2. Акустические процессы в помещениях	165
7.3. Характеристики помещения	172
7.4. Звукопоглощающие материалы и конструкции	181
7.5. Звукоизоляция помещений	187
Глава 8	
Студии звукового и телевизионного вещания	192
8.1. Типы студий	192
8.2. Акустические характеристики студий	193
8.3. Звукоизоляция студий	197
8.4. Электроакустическое оборудование студий и комнат прослушивания	199
Глава 9	
Озвучение и звукоусиление	204
9.1. Основные показатели систем озвучения	204
9.2. Особенности озвучения открытых пространств	208
9.3. Сосредоточенные системы озвучения	209
9.4. Зональные системы	217
9.5. Особенности озвучения помещений	219
9.6. Сосредоточенные системы для помещений	220
9.7. Распределение системы	221
	271

9.8. Звукоусиление	Стр. 226
9.9. Громкоговорящая связь	232
Глава 10	
Понятность и разборчивость речи	233
10.1. Введение	233
10.2. Формантный метод определения разборчивости речи	236
10.3. Определение разборчивости речи для трактов связи и вещания	238
10.4. Методы повышения разборчивости речи	241
Глава 11	
Акустические измерения	245
11.1. Введение	245
11.2. Звукомерные камеры	247
11.3. Измерительная аппаратура и акустическое оборудование	250
11.4. Методы измерений основных характеристик аппаратуры и помещений	254
Список литературы	267
Предметный указатель	268