

# Акустическая метрология

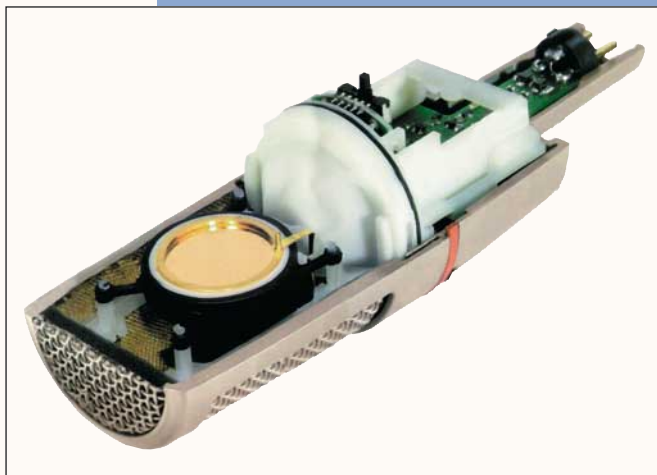
## Часть 5

### Электроакустические параметры микрофонов

**И.А. Алдошина**

В предыдущих статьях по акустической метрологии были рассмотрены методы измерения основных параметров излучателей, однако неотъемлемым элементом всех систем звукоусиления и звукозаписи являются микрофоны. Поскольку сейчас много внимания уделяется развитию современной метрологии микрофонов (в настоящее время рабочая группа в AES разрабатывает вообще новый стандарт под загадочным названием «Психоакустические параметры микрофонов») и в современных каталогах ведущих фирм используется более полутора десятков параметров, в которых иногда достаточно трудно разобраться, так как они берутся из различных международных стандартов, то в данной статье будут рассмотрены основные параметры, используемые в каталогах на микрофоны, что позволит осознанно выбирать их для систем звукоусиления, звукозаписи и других целей.

Рис. 1. Общий вид конденсаторного микрофона C-3000B AKG



Примечание. Начало см. «Install Pro», 2001, №5(13), №6(14), 2002, №1(15), №2(16)

В соответствии с действующими международными рекомендациями IEC 268-4 и отечественным ГОСТ 16123-88 определение микрофона дается следующим образом:

*«Микрофон – устройство, с помощью которого акустические колебания воздушной среды преобразуются в электрические колебания.»*

*Примечание: Микрофон состоит из чувствительного элемента (капсюля) и согласующего устройства. Блок питания, предварительный усилитель и соединительные кабели входят в комплект микрофона, если они являются его неотъемлемой частью и указаны в технической документации на микрофон конкретного типа.»*

Современный микрофон представляет собой сложнейшее устройство. Пример одной из современных конструкций C-3000B фирмы AKG показан на рис.1. Он включает в себя капсюль электростатического типа, предусилитель, защитный экран, систему амортизаторов для крепления капсюля, разъемы, корпус с защитной решеткой и др. В современной конструкции цифрового микрофона, например Neumann Solution-D, в корпусе установлены АЦП и цифровой процессор для предварительной обработки звука. Вообще многообразие конструкций микрофонов сейчас огромно и может служить предметом отдельного анализа.

История микрофонов начинается с 1876 г. (т.е. насчитывает почти 130 лет), с создания А. Белл'ом электромагнитного микрофона, затем в 1878 г. появился угольный микрофон (Т. Эдисон), в 30-е годы – конденсаторный и электродинамический, в 1962г. – электретный и, наконец, в 2000 г. – цифровой микрофон.

В настоящее время микрофоны находят широкое применение в качестве входного элемента в системах звукового вещания (радиовещания, телевидения), звукозаписи, озвучения и звукоусиления, в концертно-театральной аппаратуре, медицине, измерительной технике и др.

Качество микрофонов как входного звена тракта в значительной степени определяет качество всего тракта в целом, поэтому к микрофонам предъявляются очень жесткие требования:

- по техническим параметрам (динамический диа-

пазон 130 – 140 дБ, частотный диапазон не менее 20 – 20000 Гц, к.н.и. меньше 1 % и др.),

- по эстетическим критериям (поскольку микрофон постоянно виден зрителям на сцене, на ТВ, на эстраде),
- по надежности (так как микрофон подвергается тряске, воздействию дыхания, климатомеханическим воздействиям: ветер, влажность, температура и др.),
- по качеству звучания (сохранение тембра при передаче музыки различных жанров, пения, речи и др.).

Мировая аудиопромышленность выпускает в настоящее время несколько десятков миллионов в год микрофонов сотни моделей (отечественная промышленность до начала 90-х производила более 3 млн микрофонов 34 моделей). Выпуском микрофонов занимаются десятки фирм, из них такие знаменитые, как AKG, Sennheiser Electronics, B&K, Neumann, Beyerdynamic, DPA Microphone, Shure, Sony и др., а также ряд отечественных фирм: «Октава» (г. Тула), «Нева-Тон», «Микрофон» (Санкт-Петербург) и др.

Требования к параметрам микрофонов и методам их измерений изложены в международных и отечественных стандартах МЭК(IEC)60268, ч.4; МЭК-60268, ч.15; МЭК-60581, ч.5; МЭК-61094, ч.1-4; ГОСТ 16123-88; ГОСТ6495-88, DIN-45500, ч.5; ANSI S1.12-97; AES-X85 и др.

Основные параметры микрофонов, обычно представленные в современных каталогах и технической документации, приведены ниже:

**Номинальный диапазон частот (frequency range)** – частотный диапазон, в котором определяются параметры микрофона (задается производителем). Для современных конденсаторных микрофонов, например, он задается равным 20 – 20000 Гц. Внутри этого диапазона определяются зависимость чувствительности от частоты и другие параметры. Этот параметр дает только общую информацию о том, где должны измеряться основные параметры микрофона, иногда он обозначается как «bandwidth» – ширина полосы;

**Чувствительность (sensitivity)** – определяет способность микрофона преобразовывать акустическое давление в электрическое напряжение. Как всякая передаточная функция она определяется отношением сигнала на выходе микрофона (т.е. напряжения –  $U_b$ ) к сигналу на входе микрофона (т.е. звуковому давлению  $P_{па}$ ):  $S = U_b / P_{па}$ .

В зависимости от способа измерения различают следующие виды чувствительности: по свободному полю, по давлению, по диффузному полю, на холостом ходу, на номинальной нагрузке. Они все имеют несколько разные значения, поэтому следует обращать внимание, о какой чувствительности идет речь при выборе микрофона.

**Чувствительность по свободному полю** – «отношение напряжения на выходе микрофона к звуковому давлению в свободном звуковом поле в рабочей точке, занимаемой микрофоном, на данной частоте. Если угол приема не указан, то имеется в виду, что угол приема (между осью микрофона и направлением падения звуковой волны) 0°.»

Измерения чувствительности по свободному полю производятся в заглушенных камерах, т.е. специальных помещениях, в которых обеспечено отсутствие отраже-

ний за счет размещения на стенках большого количества звукопоглощающего материала (рис.2): на измерительный громкоговоритель подается синусоидальный сигнал, при поддержании постоянства уровня звукового давления в заданной точке поля определяется звуковое давление специальным измерительным (управляющим) микрофоном очень маленького размера с тем, чтобы не вносить искажений в структуру звукового поля. Затем на это место устанавливается измеряемый микрофон и определяется его выходное напряжение. Чувствительность определяется как  $S_m = U/P_j K$ , где  $K$  – коэффициент усиления микрофонного усилителя,  $P_j$  – звуковое давление в точке размещения испытуемого микрофона, измеренное измерительным микрофоном,  $U$  – напряжение холостого хода на выходе микрофона. Это называется **метод замещения**. Может быть использован **метод сравнения**, когда измерительный и испытуемый микрофоны сразу устанавливаются в одну точку поля. При этом, если развиваемое микрофоном напряжение относится к давлению, действующему на диафрагму этого же микрофона, то эта величина называется **чувствительностью по давлению** (она отличается от чувствительности по свободному полю, так как микрофон сам вносит определенные искажения в структуру звукового поля и значения звукового давления за счет этого могут отличаться).

Измеренная таким образом чувствительность называется **чувствительностью на холостом ходу**. Если измерения напряжения проводятся на номинальном выходном сопротивлении микрофона (которое должно указываться в технической документации), то получается значение чувствительности на номинальной нагрузке. Измерения могут быть выполнены на синусоидальном и на шумовом сигнале.

В случае, если измерения звукового давления выполняются в условиях диффузного поля (т.е. в специальных реверберационных камерах, обеспечивающих равномерное и изотропное звуковое поле за счет большого количества отражений) в рабочей точке, занимаемой микрофоном (также с помощью измерительного микрофона) на шумовом сигнале, то полученная величина отношения выходного напряжения к значению звукового давления называется **чувствительностью по диффузному полю**.

**Уровень чувствительности** – 20 логарифмов отношения чувствительности микрофона к значению 1В/Па:  $L_{дБ} = 20 \lg S_m / S_0$ , где  $S_0 = 1В/Па$ . Величина  $L_{дБ}$  при этом получается отрицательной.

В современных зарубежных каталогах на микрофоны обычно приводится чувствительность (*sensitivity*), которая определяется в соответствии с МЭК 60268-4 как **среднеквадратичное (RMS) значение напряжения на выходе микрофона на нагрузочном сопротивлении 1 кОм на частоте 1 кГц, когда на него действует давление 1 Па (94 дБ) в условиях свободного поля (угол приема 0°)**.

Обычно чувствительность современных конденсаторных микрофонов находится в пределах от 8 мВ/Па до 40 мВ/Па. Например, микрофон DPA Type 3530 име-



Рис. 2. Измерения микрофонов в заглушенной камере

ет чувствительность 10 мВ/Па и уровень чувствительности -40 дБВ (на холостом ходу), микрофон С-3000В фирмы AKG соответственно 25 мВ/Па (-32 дБВ). Серьезные фирмы указывают обычно в каталогах допустимые пределы разброса чувствительности при производстве (1 – 2 дБ).

Существуют различные приближенные методы для измерения чувствительности микрофонов, например с помощью пистонфона для очень низких частот, специального актюатора, создающего сильное электростатическое поле для возбуждения диафрагмы для ненаправленных конденсаторных микрофонов, и с помощью метода взаимности.

**Частотная характеристика чувствительности микрофона (Frequency Response)** – зависимость чувствительности или уровня чувствительности от частоты в номинальном диапазоне частот. Измерения проводятся по такой же методике на различных частотах внутри номинального диапазона на синусоидальных или шумовых сигналах.

В настоящее время так же как и для громкоговорителей активно развиваются цифровые методы измерений микрофонов в незаглушенных помещениях. На первом этапе характеристика измерительного громкоговорителя в данной точке помещения выравнивается с помощью измерительного микрофона, затем короткий импульс подается на измерительный громкоговоритель, сигнал, полученный с испытуемого микрофона, вводится в компьютерную измерительную станцию (рис.3) и с помощью преобразования Фурье вычисляются частотная характеристика чувствительности, фазовая характеристика и трехмерный спектр (т.е. зависимость ЧХЧ от времени).

Из записанной частотной характеристики чувствительности (ЧХЧ) определяется неравномерность.

**Неравномерность частотной характеристики –**

разность максимального и минимального значений уровня чувствительности в номинальном диапазоне частот. Например, для микрофона фирмы DPA Туре 4006 неравномерность в диапазоне 20 Гц – 20 кГц равна ± 2 дБ.

Обычно ЧХЧ высококачественных микрофонов обладает минимальной неравномерностью, это является одним из главных индикаторов качества микрофонов, поскольку определяет степень неискаженной передачи тембра источника, однако в некоторых случаях, например для записи речи и вокала, делается подъем на ЧХЧ в области 2 – 8 кГц с целью увеличения разборчивости (presence peak). Кроме того, в большинстве современных микрофонах предусмотрена возможность коррекции АЧХ на низких частотах (рис.4) для записи в условиях шумов, а также для коррекции подъема ЧХЧ на низких частотах при приближении к источнику звука, этот эффект свойственен только направленным микрофонам (proximity effect).

Направленные свойства микрофонов, т.е. зависимость чувствительности микрофона от угла падения звуковой волны, определяется с помощью следующего параметра:

**Характеристика направленности (directionality)** – зависимость чувствительности микрофона на заданной частоте в свободном поле от угла падения звуковой волны. Частотные характеристики направленности определяются как семейство частотных характеристик чувствительности, измеренных при разных углах падения звуковой волны в свободном поле. Эти же характеристики могут быть записаны в полярных координатах (рис. 5), показывающих зависимость уровня чувствительности (дБ) от угла падения волны (на рис.5 окружности соответствуют различному уровню чувствительности в децибелах, обычно выбирается шаг 5 дБ, а диаметры – углу падения звуковой волны по отношению к оси в градусах). Полярные диаграммы (polar pattern) также записываются в заглушенной камере, но микрофон при этом вращается вокруг оси относительно излучателя.

**Коэффициент направленности** – отношение чувствительности микрофона на данной частоте при угле падения звуковой волны под углом  $\alpha$  к оси к чувствительности при угле падения звуковой волны, равного 0° (т.е. по оси):  $\Gamma(\alpha) = S_M(\alpha) / S_M(0)$ .

**Индекс направленности** равен двадцати десятичным логарифмам от коэффициента направленности:  $D = 20 \lg \Gamma(\alpha)$ .

**Коэффициент осевой концентрации** определяет отношение звуковой энергии, падающей на микрофон вдоль оси, к энергии со всех остальных направлений. Он рассчитывается по формуле

$$\Omega = \frac{100}{\sum_{i=1}^n \left[ \frac{S_M(\alpha_i)}{S_M(0)} \right]^2} K_i$$

где  $S_M(\alpha)$  – чувствительность при падении звука под углом  $\alpha$ ;  $S_M(0)$  – чувствительность при падении звука по оси;  $K_i$  – весовые коэффициенты для каждого шага по углу  $\alpha$  (даны в ГОСТ 16123-88).

Коэффициент осевой концентрации может быть определен как отношение квадратов чувствительности,

Рис. 3. Компьютерная измерительная станция

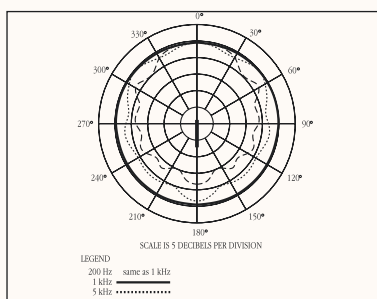


Рис. 5. Полярная диаграмма для разных частот ненаправленного микрофона

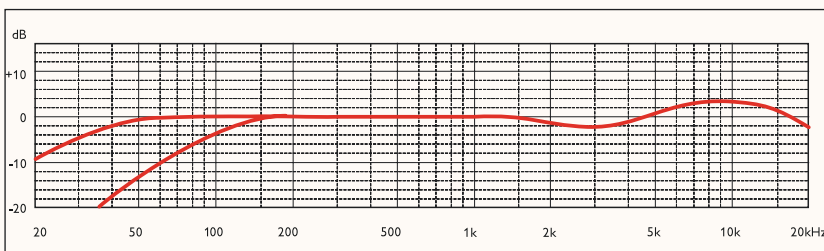


Рис. 4. Форма частотной характеристики чувствительности с коррекцией высоких и низких частот для микрофона TLM 170R Neumann

измеренной по свободному и диффузному полям, при использовании третьооктавного шумового сигнала с центральной частотой  $f: \Omega = S_M(0) / S_{M_{\text{шф}}}$ .

**Индекс осевой концентрации** – десятикратный логарифм коэффициента осевой концентрации:  $Q = 10 \lg \Omega$ .

**Перепад чувствительности, «фронт-тыл»** – разность между уровнями чувствительности микрофонов, измеренными при углах приема 0 и 180° на данной частоте в свободном поле:

$$\frac{Q_0}{180} = 20 \lg \frac{S_M(0)}{S_M(180)} = N_0 - N_{180}.$$

Выбор микрофонов с различными характеристиками направленности определяется условиями записи: расположением источников (например, инструментов в оркестре), шириной звуковой панорамы, уровнем шумов в окружающем пространстве, стремлением получить специальные звуковые эффекты и др. Именно поэтому в настоящее время промышленность выпускает огромное многообразие микрофонов с различными (часто переключаемыми на одном микрофоне) видами характеристик направленности.

Все микрофоны по этому параметру могут быть разделены на три группы:

ненаправленные (omnidirectional) – приемники давления;

двунаправленные (bidercional) – приемники градиента давления;

однаправленные (unidirectional) – комбинированные.

**Ненаправленные микрофоны – приемники давления (pressure microphone):**

если условно изобразить микрофон (это относится к любому типу преобразования) в виде гибкой диафрагмы в корпусе с жесткими стенками, то переменное звуковое давление от источника звука будет воздействовать на диафрагму с одной стороны (рис.6). Если длина волны много больше размеров микрофона ( $\gg d$ ), т.е. на низких частотах, то звуковая волна обтекает корпус микрофона и звуковые волны со всех направлений (как фронтальных, так и боковых и задних) приходят синфазно (в одинаковой фазе) на все точки мембраны в пределах ее площади, т.е. микрофон как бы «не чувствует» направления их прихода. Сила, действующая на мембрану, равна  $F = pS$ .

Характеристика направленности такого микрофона представляет собой шар, в центре которого находится микрофон (см. рис.5), т.е. чувствительность микрофона одинакова для всех направлений прихода звуковой волны. Такой микрофон называется *ненаправленным*, или *приемником давления*.

Следует отметить, что это свойство сохраняется только на низких частотах, с повышением частоты начинает сказываться экранирующее действие корпуса и разность фаз волн, приходящих с разных направлений, в пределах площади мембраны, при этом микрофон приобретает отчетливо направленные свойства в сторону передних источников звука. Когда длина волны велика, эта разность будет незначительна, т.е. волны падают в одинаковой фазе, но когда мала, то эта разность

будет уже значительна, что приведет к уменьшению величины действующей силы и обострению характеристики направленности с ростом частоты (см. рис.5). Таким образом, микрофоны – приемники давления являются ненаправленными только в области низких частот, с увеличением частоты их направленность обостряется.

Такие микрофоны находят широкое применение в технике звукозаписи, особенно для записи звуков окружающего (реверберационного) пространства и шумов, а также для записи вокала, так как у них отсутствует эффект «близости» (proximity), который всегда существует в направленных микрофонах (подробнее об этом ниже).

**Двунаправленный микрофон – приемник градиента давления (pressure gradient microphone):**

схематически принцип работы микрофона – приемника градиента давления показан на рис.6. В таком микрофоне независимо от принципа преобразования обеспечен доступ звуковой волны как с передней, так и с тыльной части мембраны (так как в корпусе микрофона имеются отверстия для доступа звуковых волн к задней части мембраны). При этом мембрана находится под действием разности (т.е. градиента) сил:

$$\Delta F = F_1 - F_2,$$

где  $F_1 = p_{\text{зв}} S \sin \omega t$  – сила, действующая на переднюю сторону диафрагмы;  $F_2 = p_{\text{зв}} S \sin(\omega t - \Delta \varphi)$  – сила, действующая на заднюю сторону диафрагмы, она отстает по фазе на  $\Delta \varphi$ , так как звуковые волны проходят более длинный путь до задней стороны диафрагмы. Эта разность фаз приближенно равна  $\Delta \varphi = 2\pi(d \cos \alpha) / \lambda$ , при этом градиент сил, действующих на диафрагму, равен:

$$\Delta F = p_{\text{зв}} S \frac{d}{c} \omega \cos \alpha,$$

где  $d$  – толщина диафрагмы;  $\alpha$  – угол падения звуковой волны;  $c$  – скорость звука. Как видно из этого выражения, когда угол падения звуковой волны 0 или 180°, то разность (градиент) сил воздействия максимальна (так как  $\cos \alpha = 1$ ), а когда угол падения 90°, то она равна нулю ( $\cos \alpha = 0$ ), отсюда зависимость чувствительности от угла падения имеет вид, показанный на рис. 7. Характеристика направленности такого типа обычно называется «восьмерка» (figure eight).

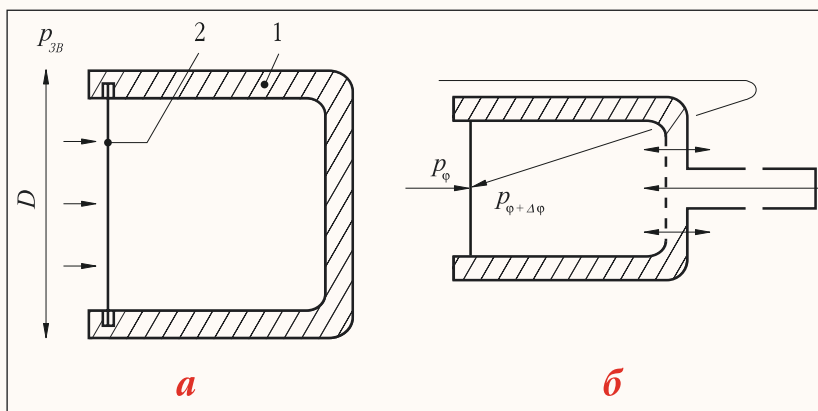


Рис. 6. Типы микрофонов:  
а) приемник давления;  
б) приемник градиента давления

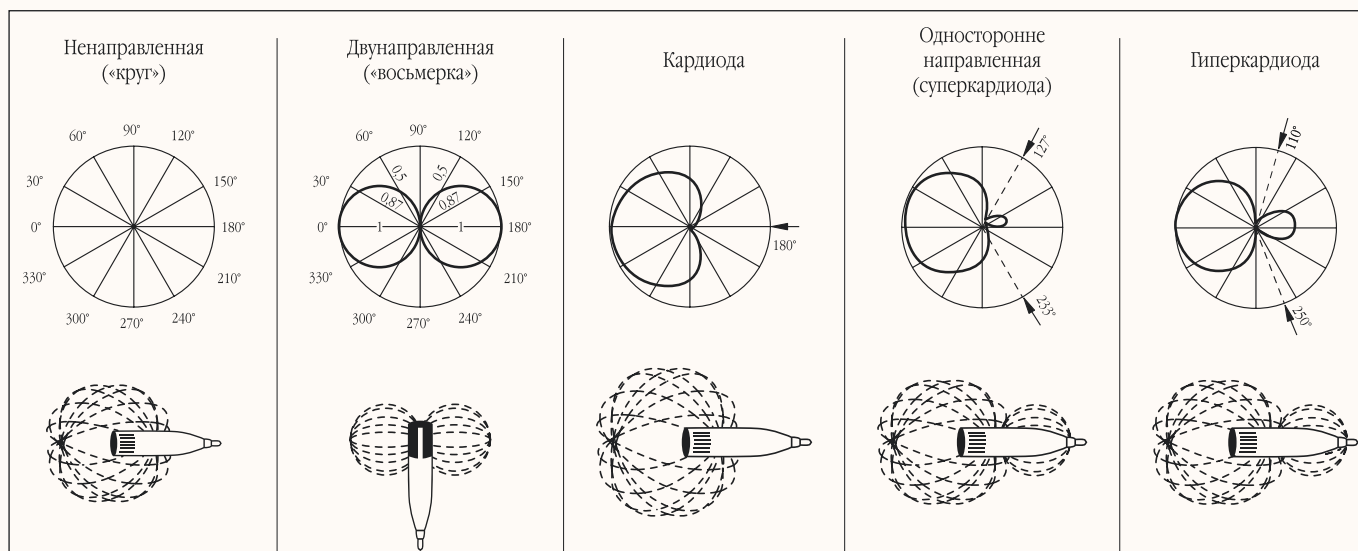


Рис. 7. Основные виды характеристик направленности микрофонов

Микрофоны с такой характеристикой направленности чувствительны к звуковым волнам, падающим вдоль оси, и практически нечувствительны к звуковым волнам, падающим под углом  $90^\circ$  к оси. Они находят достаточно широкое применение при стереозаписи, например, по системе MS.

Если синтезировать характеристику направленности микрофона путем комбинирования ненаправленной и двунаправленной характеристик, то в осевом фронтальном направлении чувствительность увеличивается (поскольку сигналы приходят в одинаковой фазе), а в тыловом направлении – уменьшается, поскольку сигналы взаимно вычитаются, так как их фазы противоположны.

Пусть микрофон – приемник давления имеет чувствительность  $S_1$ , не зависящую от угла падения волны, а микрофон – приемник градиента давления имеет чувствительность  $S_2 \cos \alpha$ . Если чувствительности обоих микрофонов на оси выбрать равными  $S_1 = S_2$ , то характеристика направленности такой комбинации микрофонов будет иметь вид:

$$\Gamma(\alpha) = \frac{1}{2} (1 + \cos \alpha).$$

Данная форма диаграммы направленности называется кардиоидой (см. рис.7). Для создания таких комбинационных микрофонов раньше размещали два капсюля в одном корпусе и складывали их выходные напряжения. В современных односторонне направленных микрофонах используется один преобразователь с двумя или более акустическими входами для доступа звуковой волны к диафрагме.

Подбирая разные соотношения чувствительностей  $S_1$  и  $S_2$ , можно получать различные формы характеристик направленности (см. рис.7). В общем случае характеристика направленности микрофонов может быть записана в виде:

$$\Gamma(\alpha) = \frac{1}{1+A} (1 + A \cos \alpha).$$

При разных значениях коэффициента  $A$  получают разные формы характеристики направленности (см. рис.7):

- $A = 0, \Gamma(\alpha) = 1$  – круг,
- $A = 1, \Gamma(\alpha) = 1/2(1 + \cos \alpha)$  – кардиоида,
- $A = 1,7$  – суперкардиоида,
- $A = 3$  – гиперкардиоида,
- $A \rightarrow \infty, \Gamma(\alpha) = \cos \alpha$  – восьмерка.

Особую группу микрофонов составляют *остронаправленные микрофоны (shotgun)*:

Такие микрофоны состоят из односторонне направленного микрофона, нагруженного на трубку с отверстиями (или прорезьями), закрытыми тканью (рис.8). Трубка представляет собой своего рода линию задержки, так как при падении звуковых волн под углом  $\alpha$  к оси микрофона звуковые волны достигают оси микрофона с разными сдвигами фаз:

$$\Delta \varphi = \omega di (1 - \cos \alpha) / c,$$

где  $di$  – расстояние от начала трубки до  $i$ -отверстия;  $c$  – скорость звука;  $\omega$  – круговая частота. Этот дополнительный сдвиг фаз увеличивает градиент сил, воздей-

Рис. 8. Остронаправленный микрофон



ствующих на диафрагму микрофона, и «обостряет» характеристику направленности. Ткань на отверстиях трубки является дополнительным акустическим сопротивлением, которое возрастает по мере приближения к капсуле микрофона.

Односторонне направленные микрофоны находят широкое применение для записи музыки и речи в различной окружающей обстановке, особенно при наличии шумов и помех, а также в системах звукоусиления.

Кроме вышеуказанных свойств микрофонов, можно привести еще несколько характеристик, связанных с их направленностью (табл. 1).

**Чувствительность к окружающим звукам (ambient sound rejection)** – односторонне направленные микрофоны менее чувствительны к окружающим шумам и звукам, чем ненаправленные микрофоны в силу особенностей их характеристики направленности, поскольку имеют меньшую чувствительность для задних и боковых направлений (поэтому их предпочтительнее использовать в системах звукоусиления для уменьшения вероятности возникновения обратной связи). Для оценки этих свойств используется величина «чувствительность к окружающему шуму» по отношению к ненаправленному микрофону: если у ненаправленного микрофона ее принять за 100%, то у микрофонов с кардиоидной характеристикой направленности она равна 33%, для других типов ее значения даны в табл. 1.

**Коэффициент расстояния (distance factor)** – поскольку направленные микрофоны «схватывают» меньше окружающего шума, чем ненаправленные, они могут использоваться на больших расстояниях от источника звука, сохраняя при этом баланс между прямым звуком и отраженными. Например, кардиоидный микрофон может быть отодвинут на расстояние в 1,7 раза большее, чем ненаправленный, при сохранении того же баланса. Значения этих расстояний относительно ненаправленного микрофона для микрофонов с разными типами характеристики направленности даны в табл. 1.

**Угол максимального подавления (angle of maximum rejection)** – угол, в направлении которого микрофон наименее чувствителен к окружающему звуку. Например, для кардиоидного микрофона этот угол 180°, для других типов углы даны в табл. 1. Значения этих углов полезно учитывать при расстановке микрофонов и излучателей для минимизации обратной связи. Так, для каждого вида направленности вокального микрофона оптимальное расположение напольного контрольного монитора показано на рис. 9.

В табл. 1 приведен еще один параметр – **отношение фронт-тыл (rear rejection)**, о котором было сказано выше.

Направленные микрофоны обладают таким свойством, как зависимость их уровня чувствительности от расстояния до источника (при расстояниях меньше длины волны) на низких частотах. Это свойство называется «эффектом близости» (*proximity effect*).

Этот эффект объясняется тем, что на близком расстоянии микрофон находится в «ближней зоне» действия источника, т.е. в зоне распространения сферической волны. В сферической волне звуковое давление изменяется с расстоянием  $p \sim 1/r$ , поэтому разность да-

Таблица 1

Характеристика	Ненаправленная	Кардиоида	Суперкардиоида	Иперкардиоида	Восьмерка
Форма диаграммы направленности					
Ширина диаграммы направленности	360°	131°	115°	105°	90°
Угол максимального подавления	–	180°	126°	110°	90°
Чувствительность к окружающим звукам	0	25 дБ	12 дБ	6 дБ	0
Отношение фронт-тыл	100%	33%	27%	25%	33%
Коэффициент расстояния	1	1,7	1,9	2	1,7

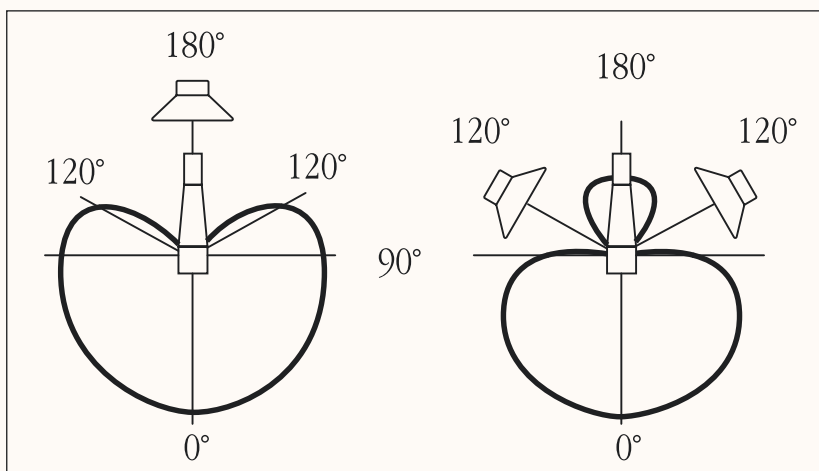


Рис. 9. Расположение контрольных агрегатов

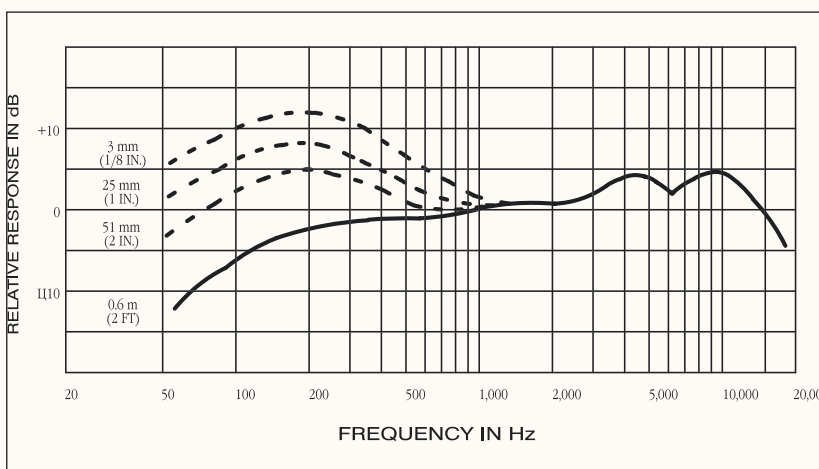


Рис. 10. Вид ЧХЧ для разных расстояний от источника Shure Beta 58A

ления, которое действует на переднюю часть мембраны и на ее тыльную часть, увеличивается за счет дополнительной разности (градиента) давлений, возникающих в сферической волне из-за разности расстояний. За счет этого чувствительность направленного микрофона на низких частотах возрастает, по мере повышения частоты длина волны становится меньше и расстояние, на котором находится микрофон, начинает превышать длину волны, поэтому этот эффект перестает сказываться. Форма частотной характеристики направленного микрофона при разных расстояниях до источника показана на рис. 10.

В связи с этим при использовании направленных микрофонов на близких расстояниях необходимо учитывать при записи подъем частотной характеристики на низких частотах (вводя необходимую коррекцию). Ненаправленные микрофоны не имеют этого эффекта, их форма частотной характеристики от расстояния не зависит.

**Уровень предельного звукового давления (max SPL)** – уровень, при котором коэффициент гармонических искажений не превосходит заданного значения. В современных студийных микрофонах он указывается 140 – 150 дБ при величине коэффициента гармонических искажений 0,5% на частоте 1000 Гц.

**Полный коэффициент гармонических искажений (THD)** – рассчитывается по методике, используемой для определения чувствительности, но при этом с помощью анализатора спектра измеряется напряжение на выходе микрофона, соответствующее первой гармонике  $U_1$ , второй  $U_2$  и т.д. Коэффициент рассчитывается по формуле:

$$K_r = \frac{\sqrt{\sum_{i=2}^n U_i^2}}{U_1}$$

Обычно величина коэффициента гармонических искажений для современных микрофонов задается <0,5%.

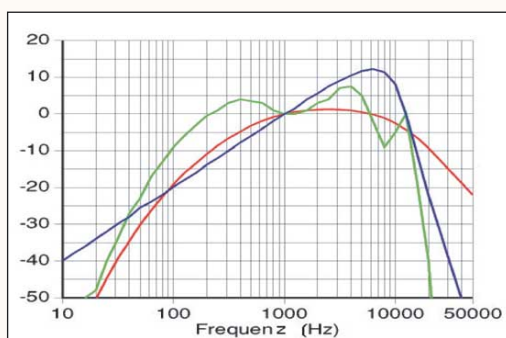


Рис. 11. Взвешивающие кривые для определения эквивалентного уровня шумов

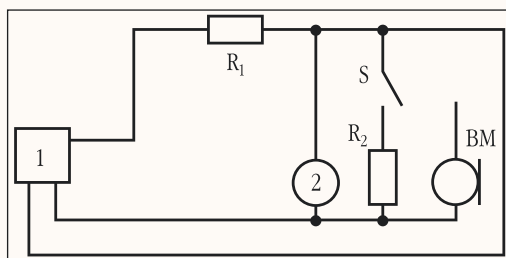


Рис. 12. Схема измерения импеданса микрофонов

Следует заметить, что этот коэффициент должен быть измерен для капсуля микрофона вместе с предусилителем, иногда фирмы указывают его, измеряя только искажения в предусилителе (замещая капсуль эквивалентной нагрузкой), что дает заниженные значения. Поскольку измерять значения коэффициента гармонических искажений для таких высоких уровней давления очень трудно из-за искажений, возникающих в измерительных громкоговорителях, то используют различные приближенные методы (например, с помощью пистолета, который представляет собой жесткий корпус, куда вставляются движущийся поршень и измеряемый микрофон).

Примером могут служить значения max SPL для микрофона фирмы DPA Type 4004 Hi-SPL: 142 дБ (<0,5% THD), 148 дБ (<1% THD).

**Уровень собственных шумов микрофонов** – в соответствии с отечественными и международными стандартами используются различные методы измерения собственных шумов.

ГОСТ16123-88 вводит следующий параметр: *уровень эквивалентного звукового давления, обусловленного помехами*, который определяется как «двадцать десятичных логарифмов отношения звукового давления, вызывающего на выходе микрофона напряжение, равное напряжению, обусловленному внешними и внутренними помехами при отсутствии звукового поля, к звуковому давлению, равному  $2 \cdot 10^{-5}$  Па»;

$$L_p = 20 \lg \frac{U_{\text{ВЫХ}}}{U_0} = 20 \lg \frac{S_m P_{\text{ЭКВ}}}{S_m P_0} = 20 \lg \frac{P_{\text{ЭКВ}}}{P_0}$$

где  $U_{\text{ВЫХ}}$  – напряжение на выходе микрофона, вызванное помехами;  $S_m$  – чувствительность микрофона на частоте 1000 Гц;  $P_{\text{ЭКВ}}$  – эквивалентное звуковое давление. Это означает, что измеряется напряжение на выходе микрофона в отсутствие звукового давления, обусловленного только внутренними шумами, и затем определяется, какому звуковому давлению оно могло бы соответствовать.

В международных каталогах на микрофоны обычно указываются следующие величины: эквивалентный уровень звукового давления (Equivalent Noise Level) и отношение сигнал/шум (Signal/Noise ratio). Способы измерения несколько отличаются в разных стандартах, поэтому в современных каталогах приводятся два значения эквивалентного уровня шумов: по стандартам DIN 45412(IEC 651) и DIN 45-405 (CCIR 468-2). В первом случае при определении звукового давления используется взвешивающая стандартная кривая A (рис.11), рассчитывается его среднеквадратичное значение (RMS) и относится к нулевому уровню  $2 \cdot 10^{-5}$  Па. Во втором случае используется другая форма взвешивающей кривой (так называемая психометрическая кривая), также показанная на рис.12 (имеются и некоторые другие отличия в методике).

Для студийных конденсаторных микрофонов, например, эквивалентный уровень шума находится в пределах 10 – 20 дБ А (IEC 651) и 20 – 30 дБ (CCIR 468-3), для динамических микрофонов он может быть существенно меньше (на 10 – 12 дБ). Так, для конденсаторного микрофона С-3000В фирмы AKG эквивалентный уровень шумов по стандарту IEC-651 (DIN45-412) составля-

ет 14 дБ А, а по стандарту CCIR468-2 (DIN45-405) – 25 дБ. Предполагается, что выбирая микрофон, потребитель хорошо разбирается в таких тонких отличиях.

Для характеристики собственных шумов микрофонов используется также отношение сигнал/шум, которое рассчитывается двумя способами:

- S/N ratio DIN/IEC651 – отношение сигнал/шум, определяемое как разница между опорным уровнем звукового давления 94 дБ (1 Па) и уровнем эквивалентного звукового давления, измеренного с взвешиванием по кривой А.

- S/N ratio CCIR 468-2 – отношение сигнал/шум измеряется как разница между уровнем напряжения микрофона, находящегося внутри звукового поля давлением 1 Па = 94 дБ, и уровнем напряжения, соответствующего собственному шуму, измеренному с фильтром по CCIR 468-2.

Для студийных конденсаторных микрофонов эти величины находятся в пределах 74 – 64 дБ (CCIR) и 84 – 74 дБ А (DIN/ IEC 651).

Например, для того же микрофона C-3000В эти отношения составляют 80 и 69 дБ.

**Динамический диапазон (dynamical range)** – разность между максимальным уровнем звукового давления (max SPL), при котором нелинейные искажения на выходе микрофона не превышают заданную величину, и уровнем эквивалентного звукового давления. Так, для микрофона C-3000В он равен 126 дБА (при этом отношение сигнал/шум у этого микрофона равно 80 дБА).

**Номинальный электрический импеданс** определяется из модуля измерения полного электрического сопротивления микрофона. Последнее определяется как отношение величин напряжения на выходе микрофона к результирующему току. Измерение модуля полного электрического сопротивления  $[Z]$  динамических микрофонов производится по схеме на рис.12. Напряжение, подаваемое на микрофон, не должно превышать значения напряжения на выходе микрофона при воздействии предельного звукового давления, указанного в технической документации. Значение резистора  $R_2$  приблизительно выбирается равным модулю импеданса микрофона  $[Z]$ , суммарное сопротивление  $R_1$  и выходное сопротивление генератора должно не менее чем в 20 раз превышать ориентировочное значение  $[Z]$  микрофона на частоте 1000 Гц. На заданной частоте измеряется уровень напряжения с микрофона и резистора  $R_2$ . Результат определяется по формуле:

$$[Z] = R_2 10^{(L_m - L_R)/20},$$

где  $L_m$  – уровень напряжения при включенном резисторе  $R_2$ , дБ;  $L_R$  – уровень напряжения при включенном микрофоне, дБ;  $R_2$  – сопротивление резистора, Ом.

Обычно задается значение  $[Z]$  на частоте 1000 Гц. Для конденсаторных микрофонов в ГОСТ16123-88 предусмотрен несколько другой метод, при котором микрофон замещается конденсатором равной емкости.

Величина выходного электрического импеданса (output electrical impedance), т.е. модуля полного электрического сопротивления, в большинстве современных конденсаторных микрофонов находится в диапазоне 50 – 200 Ом, у динамических микрофонов до 600 Ом,

Таблица 2

<b>Specifications</b>	
<b>Transducer type:</b>	1 in. (25 mm) large diaphragm pressure gradient
<b>Diaphragm material:</b>	Gold-sputtered mylar foil
<b>Frequency response</b>	20 Hz to 20 kHz, (see frequency response curve)
<b>Sensitivity at 1 kHz:</b>	25 mV/Pa (-32 dBV)
<b>Polar pattern:</b>	Cardioid
<b>Pre-attenuation:</b>	10 dB
<b>Impedance:</b>	200 ohms
<b>Recommended loading:</b>	>1000 ohms
<b>Equivalent noise level (A-weighted):</b>	14 dB
<b>Sound pressure level for 0.5% THD:</b>	140 dB (150 dB with 10 dB pre-attenuation)
<b>Dynamic range:</b>	140 dB
<b>S/N ratio (A-weighted):</b>	80 dB-A
<b>Power requirement:</b>	Phantom powering, 9 to 52 Vdc
<b>Environmental:</b>	Temperature: 14° F to 140° F (-10° C to 60° C)
<b>Output connector:</b>	3-pin XLR-M
<b>Size:</b>	2.217 in. diameter (57 mm); 6.29 in. length (160 mm)
<b>Net/shipping weight:</b>	11.3 oz. (320 g)
<b>Included accessories:</b>	H100 elastic mounting suspension
<b>Optional accessories:</b>	B18 battery power supply PF100 pop filter W414 wind screen

т.е. они имеют низкий импеданс, поскольку применявшиеся ранее микрофоны с высоким импедансом от 10000 Ом и более имели значительные потери высоких частот в кабеле. При этом входное сопротивление предусилителей (input recommended load impedance) должно быть больше выходного сопротивления микрофона в 5 – 10 раз и составляет обычно 1000 – 2000 Ом. При таком соотношении сопротивлений обеспечиваются меньшие потери в кабеле.

Кроме указанных выше электроакустических параметров, задается обычно рабочий диапазон изменения температуры и влажности окружающей среды, внутри которого чувствительность не должна изменяться более чем на +/-2 дБ. Электродинамические микрофоны всех групп сложности имеют рабочий диапазон, как правило, -40...+50° по температуре и 95% влажности при 20°, конденсаторные -10...+35° и 85% влажности при температуре 20°. Минимальные требования к параметрам микрофонов различных групп сложности изложены в ГОСТ6495-88.

В международных стандартах нормируются методы измерений, параметры устанавливает фирма-производитель. В условиях жесткой конкуренции эти параметры постоянно улучшаются, примером могут служить параметры, приведенные в табл. 2, одной из последних разработок фирмы AKG – микрофона C-3000В.

Таким образом, выбор микрофонов для систем озвучивания, звукоусиления и звукозаписи требует достаточно глубокого понимания значений параметров, указанных в каталогах и технической документации, иначе может оказаться, что купленный достаточно дорогой микрофон будет совершенно непригодным для решения вашей конкретной задачи.