

# Акустическая метрология

## Часть 2

### Электроакустические параметры излучателей

**И.А. Алдошина**

В первой части статьи (см «Install Pro», 2001, №5) были рассмотрены аналоговые и цифровые методы измерения линейных искажений в излучателях (акустических системах, громкоговорителях, звуковых колонках, контрольных агрегатах и др.) в соответствии с требованиями международных стандартов и принятой практикой оценок современной аппаратуры. В этой статье мы продолжим знакомство с методами измерения пространственно-временных линейных искажений.

Вопросы влияния параметров помещения прослушивания на выходные характеристики акустических систем и их качество звучания имеют чрезвычайно важное значение при проектировании акустической аппаратуры категории hi-fi, High-End и аппаратуры для озвучения. В последние годы особенно в связи с внедрением пространственных систем звукопередачи (Surround Sound) этому уделяется очень большое внимание в аудиотехнике, в частности при разработке адаптивных цифровых процессоров и систем компьютерного моделирования акустических свойств помещения (систем аурализации). Для решения этих проблем необходима оценка параметров акустической аппаратуры, измеренных не только на оси излучателя (АЧХ, ФЧХ, кумулятивные спектры), но и в других точках пространства.

Для определения «пространственного» распределения звукового давления, излучаемого акустическими устройствами, в современной практике проектирования аудиоаппаратуры и в действующих стандартах IEC 268-5 (2000 г.), ГОСТ 16122-88, AES-5id-98 предусмотрено измерение таких параметров, как характеристика направленности и частотная характеристика акустической мощности.

Под характеристикой направленности понимается «зависимость уровня звукового давления от частоты и от угла между опорной осью и измеряемой осью в условиях свободного поля в различных (заданных) плоскостях», а под измеряемой осью – линия, соединяющая микрофон и измеряемый источник звука.



Рис. 1. Вид заглушенной камеры

В стандартах предусмотрено измерение характеристики направленности в заглушенной камере двумя методами (рис. 1):

- запись АЧХ при смещении микрофона под определенными углами от опорной оси, при этом интервалы изменения углов рекомендуется выбирать кратными  $15^\circ$  (рис. 2). В минимальных требованиях на аппаратуру hi-fi установлено, что при отклонениях микрофона на  $\pm (20^\circ - 30^\circ)$  в горизонтальной плоскости и на  $\pm (5^\circ - 10^\circ)$  в вертикальной отклонение полученной АЧХ от АЧХ, измеренной по оси, не должно превышать 4 дБ;
- запись диаграмм направленности в полярных координатах (polar pattern), т.е. запись значений уровней звукового давления, измеренных микрофоном в условиях свободного поля при непрерывном вращении излучателя на поворотном устройстве. Запись может производиться на синусоидальном сигнале или на 1/3-октавном или октавном шуме. Измерения должны осуществляться на различных частотах внутри номинального диапазона, по крайней мере на частотах 500, 1000, 2000,

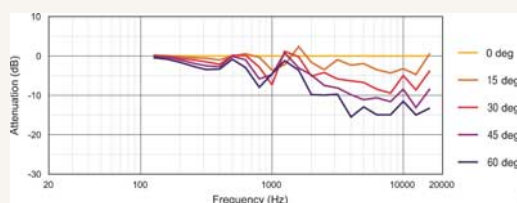


Рис.2. Запись АЧХ под разными углами

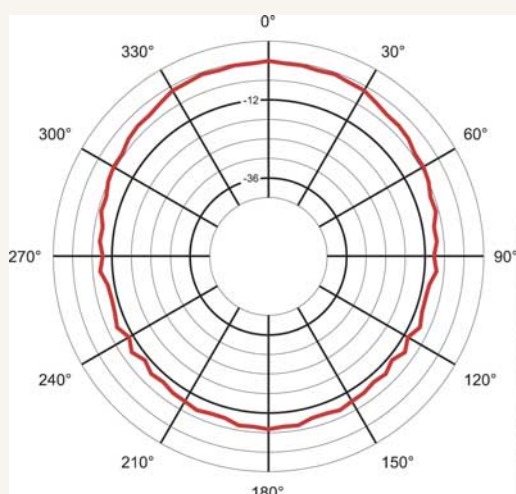


Рис. 3. Полярная диаграмма

4000 и 8000 Гц. Для маленьких высокочастотных громкоговорителей измерения необходимо проводить на более высоких частотах, их значения оговорены в стандарте IEC 268-1. Входное напряжение выставляется таким образом, чтобы уровень звукового давления на оси на измеряемых частотах был постоянным. Пример записи полярных диаграмм для звуковой колонки VT 4889 JBL на частоте 250 Гц показан на рис. 3. Если излучатель имеет неосесимметричную форму (например, звуковая колонка, вытянутая в одном направлении), то полярную диаграмму надо снимать по крайней мере в двух плоскостях (горизонтальной и вертикальной).

Из измеренных таким образом характеристик можно определить ряд параметров:

- коэффициент направленности – отношение звукового давления, измеренного под заданным углом относительно рабочей оси, к звуковому давлению на рабочей оси для одной и той же частоты (полосы частот) и при одном и том же расстоянии от рабочего центра громкоговорителя:

$$\xi(\theta^\circ) = \frac{p_{3B}(\theta^\circ)}{p_{3B}(0^\circ)}$$

- индекс направленности – 20-кратный десятичный логарифм коэффициента направленности;
- угол излучения – угол, в пределах которого значение индекса направленности спадает менее чем на 10 дБ.

Для измерения характеристик направленности также применяются цифровые импульсные методы, например реализованные в цифровой компьютерной станции MLSSA (рис. 4), где используются измерения импульсных характеристик в разных точках помещения (как заглушенных, так и незаглушенных) с последующим преобразованием Фурье, таким образом можно построить и амплитудные, и фазовые характеристики направленности. На рис. 5 и 6 дан пример компьютерной записи трехмерных полярных диаграмм как первым (т.е. АЧХ под разными углами), так и вторым способом (полярные диаграммы).

Как показали эксперименты, существенную связь с субъективной оценкой качества звучания акустической аппаратуры в помещении имеют частотная характеристика акустической мощности  $P_A$  и распределение этой мощности в пространстве и во времени.

Под акустической мощностью понимается «общая мощность, излучаемая громкоговорителем в пространстве на различных частотах».

На основании психофизических исследований можно сделать вывод, что акустические системы, имеющие «хорошую» АЧХ звукового давления (с малой неравномерностью) и «плохую» (т.е. узкую, с резкими изменениями ширины при изменении частоты) характеристику направленности, звучат «жестко и утомительно» в помещении. При этом стереобраз смещается с изменением спектрального состава сигнала, что совершенно недопустимо, например, для студийных контрольных агрегатов, особенно в настоящее время при переходе на пространственные системы записи: если пространственный звуковой образ, создаваемый системой контрольных агрегатов (в частности, по системе 5.1 Dolby Surround), будет смещаться в процессе записи, звукорежиссер не сможет контролировать свою работу. Поэтому для студийных акустических агрегатов в документах ОИРТ ТК 55-1 предлагалось нормирование равномерности частотной характеристики акустической мощности следующим образом: при общем спаде 1 дБ/окт при изменении частоты в пределах нормируемого диапазона допустимая неравномерность должна быть  $\pm 1$  дБ.

Методика измерений акустической мощности в заглушенной и реверберационной камере аналоговыми методами изложена в отечественных и международных



Рис. 4. Измерительная станция MLSSA

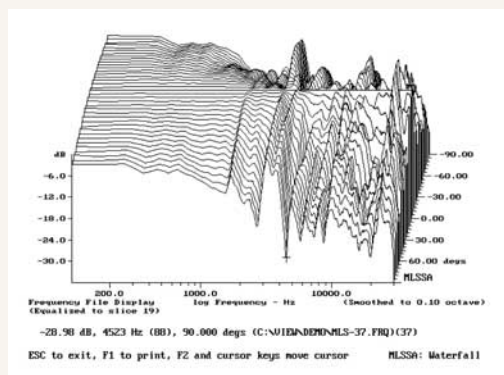


Рис. 5. Компьютерный способ записи АЧХ под разными углами

стандартах: ГОСТ 16122-88, IEC 268-5 и др. В соответствии с этими требованиями измерения могут быть выполнены в условиях свободного поля (в заглушенной камере), в условиях полупространства и в условиях диффузного поля (в реверберационной камере).

В условиях свободного поля способ измерения акустической мощности заключается в следующем:

производится измерение звукового давления (на синусоидальном или шумовом сигнале) при различных положениях микрофона и громкоговорителя (точки из-

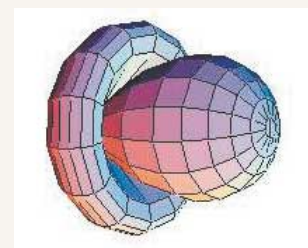


Рис. 6. Трехмерная полярная диаграмма

мерения оговорены в ГОСТе 16122-88), по международным рекомендациям IEC 268-5 точки следует выбирать на сфере, окружающей громкоговоритель (или на полусфере для полупространства). Расчет акустической мощности выполняется при этом по формуле:

$$P_A = \frac{4\pi l^2}{\rho_c} \frac{1}{n} \sum_{i=1}^n P_i^2(f),$$

где  $\rho_c$  – волновое сопротивление воздуха, кг/с м<sup>2</sup>;  $l$  – расстояние от рабочего центра громкоговорителя до измерительного микрофона, м;  $p(f)$  – звуковое давление на заданной частоте (полосе частот), развиваемое громкоговорителем в  $i$ -точке, Па;  $n$  – число взаимных расположений громкоговорителя и микрофона (не менее 20). Соответственно акустическая мощность на заданной частоте  $f$  равна:

$$P_A(f) = \frac{4\pi l^2}{\rho_c} p^2(f).$$

Измерения акустической мощности в реверберационной камере (т.е. в условиях диффузного поля) производятся в следующем порядке: измеряется звуковое давление на шумовом сигнале (1/3-октавной или октавной полосе) на различных частотах и при различных положениях измерительного микрофона (не менее 5), затем рассчитывается среднее звуковое давление. Акустическая мощность излучателя определяется по формуле:

$$P_A = \frac{V}{T} P_{cp}^2(f) 10^{-4},$$

где  $P_A$  – акустическая мощность, Вт;  $V$  – объем помещения, м<sup>3</sup>;  $T$  – время реверберации, с;  $P_{cp}$  – среднее звуковое давление, Па.

Расчет акустической мощности (т.е. полной звуковой энергии, излучаемой в окружающее пространство) и построение ее частотной зависимости выполняются также в настоящее время цифровыми методами (путем интегрирования по пространству полярных диаграмм, измеренных, например, способом, указанным выше).

Во всех современных зарубежных каталогах на аудиоаппаратуру обычно приводятся еще два параметра, характеризующих ее направленные свойства, которые в нашем стандарте называются коэффициентом осевой концентрации и индексом осевой концентрации, в международных стандартах – directivity factor ( $Q$ ) и directivity index ( $Di$ ).

Коэффициент осевой концентрации (directivity factor –  $Q$ ) – это отношение квадрата звукового давления, измеренного на оси системы, к ее акустической мощности на этой же частоте (акустическое давление должно измеряться в тех же условиях, что и акустическая мощность, т.е. в свободном или реверберирующем поле):

$$Q(f) = \frac{4\pi l^2}{\rho_c} \frac{P_0^2(f)}{P_A(f)},$$

Индекс осевой концентрации (directivity index –  $Di$ ) определяется двумя способами:

- через акустическую мощность, измеренную указанным выше методом:

$$Di = 10 \lg Q = 10 \left( \frac{4\pi l^2}{\rho_c} \lg \frac{P_0^2(f)}{P_A(f)} \right) = 10 \lg \frac{P_0^2(f)}{P_{cp}^2(f)},$$

где  $P_0(f)$  – давление, измеренное на оси излучателя;

- через измерения уровня звукового давления  $L_{zx}$  – в условиях свободного поля на оси на расстоянии 1 м, и уровня звукового давления в условиях диффузного поля  $L_p$ :

$$Di = L_{zx} - L_p + 10 \lg \frac{T}{T_0} - 10 \lg \frac{V}{V_0} - 25 \text{ dB},$$

где  $V$  – объем помещения, м<sup>3</sup>;  $T$  – время реверберации, с;  $V_0 = 1 \text{ м}^3$ ;  $T_0 = 1 \text{ с}$ .

Значение этих коэффициентов и их зависимость от частоты чрезвычайно важны особенно для аппаратуры, предназначенной для озвучения (рупорных громкоговорителей, звуковых колонок и др.), поскольку все современные методики проектирования систем звукоусиления учитывают при расчетах именно эти параметры излучателей.

В новой редакции международного стандарта IEC 268-5 (2000 г.) введен еще один параметр для оценки направленных свойств излучателей – это угол покрытия (coverage angle). Иногда в каталогах аппаратуры для озвучения он указывается как beamwidth (-6 дБ), что в переводе означает «ширина луча при спаде 6 дБ». Этот параметр определяется по записанной полярной диаграмме как угол, в пределах которого уровень звукового давления у главного лепестка диаграммы снижается на 6 дБ по отношению к уровню на оси (рис. 7). Запись полярной диаграммы должна производиться октавными

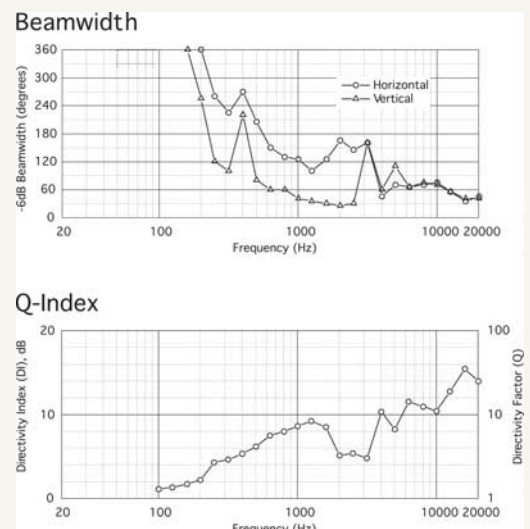


Рис. 7. Определение угла покрытия

полосами шума с центральной частотой 4 кГц (возможна запись и на другой частоте, но это должно быть оговорено в документации).

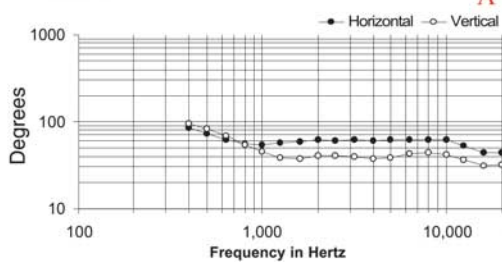
Примерное соотношение между индексом направленности  $Di$  и углами покрытия в двух перпендикулярных плоскостях – горизонтальной (А) и вертикальной (В) – в стандарте следующее:

$$Di = 10 \lg \frac{180}{\arcsin(\sin \frac{A}{2}) \sin \frac{B}{2}},$$

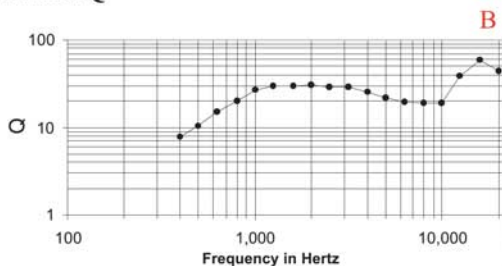
где А и В в градусах.

Обычно в звуковых колонках и рупорных громкоговорителях индекс направленности существенно возрастает с частотой, угол покрытия, наоборот, с частотой заметно уменьшается, при этом его значение и характер зависимости от частоты существенно различаются в вертикальной и горизонтальной плоскостях (рис. 8, а).

### BEAMWIDTH



### AXIAL Q



**Рис. 8. Зависимость угла покрытия, коэффициента осевой концентрации и индекса осевой концентрации от частоты: а) для радиального рупора JBL 2345; б) для рупора равномерного покрытия**

В 80-е г. был предпринят комплекс работ по созданию специального семейства рупоров, которые называют рупорами равномерного покрытия (Henricksen, C, Ureda M «The Manta-Ray Horn» JAES v.26, n.9). Эти рупоры обладают уникальными направленными свойствами: они имеют практически не зависящие от частоты индекс направленности  $Di$  и угол покрытия (beamwidth) как в горизонтальной, так и в вертикальной плоскостях (рис. 8, б). Для того чтобы добиться этого, была отработана сложнейшая форма рупора с разными законами изменения образующей в вертикальной и горизонталь-

ной плоскостях (рис. 9). Громкоговорители с такими рупорами выпускаются в настоящее время, например, фирмой JBL и находят широкое применение в системах звукоусиления, особенно в звуковых системах для кино.

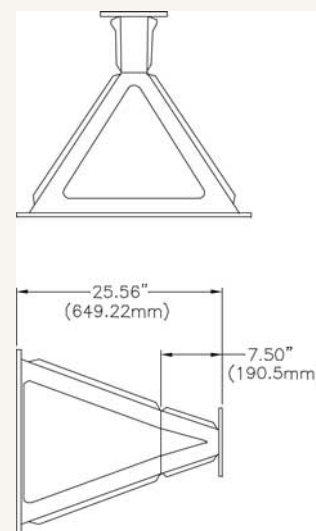
В современных акустических системах для концертно-театральной аппаратуры, даже в студийных агрегатах достаточно часто используются рупорные излучатели в качестве низко-, средне- и высокочастотного звена. Во всех каталогах особенно на эти виды аппаратуры обязательно указываются характеристики, определяющие их направленность, например в кинотеатральной системе JBL 5672 с рупорными средне- и высокочастотными громкоговорителями (рис. 10) приведены следующие характеристики: частотный диапазон 35 Гц – 16 кГц (-10 дБ), амплитудно-частотная характеристика 45 Гц – 12 кГц (+/-3 дБ), горизонтальный угол покрытия (coverage angle) – 80° (усредненный в диапазоне 300 Гц – 16 кГц (-6 дБ)), вертикальный угол покрытия – 45° (усредненный в том же диапазоне), максимум SPL – 112 дБ на 10 м.

Фирма Neho для своей серии профессиональных акустических систем для озвучения Alpha-F и Alpha-M задает направленные свойства следующим образом:

Спецификация	Alpha-F	Alpha-M
Frequency response (амплитудно-частотная характеристика)	40 Гц – 19 кГц +/-3 дБ	220 Гц – 19 кГц +/-3 дБ
Usable range (-6 дБ) (номинальный диапазон со спадом -6 дБ)	38 Гц – 20 кГц +/-6 дБ	180 Гц – 20 кГц +/-6 дБ
Sensitivity (характеристическая чувствительность)	107 дБ/Вт/м	107 дБ/Вт/м
Peak SPL (максимальный уровень звукового давления)	НЧ – 142 дБ (пик) СЧ/ВЧ – 140 дБ (пик)	140 дБ
Dispersion (угол покрытия)	75 x 30°	75 x 30°
Directivity Q&Di (коэффициент и индекс осевой концентрации)	Q=25, Di=14 дБ (f>630 Гц)	Q=25, Di=14 дБ (f>630 Гц)
Crossover frequencies (частоты раздела)	НЧ/СЧ=210 Гц СЧ/ВЧ=2,2 кГц	СЧ/ВЧ=2,2 кГц
Nominal impedance (номинальный импеданс)	НЧ – 6 Ом СЧ/ВЧ – 8 Ом	8 Ом
Recommended amplifiers (рекомендуемая мощность усилителей)	НЧ: 900 – 1400 Вт на 6 Ом СЧ/ВЧ: 700 – 1000 Вт на 8 Ом	700 – 1000 Вт на 8 Ом

Надеюсь, что эта таблица с переводами основных терминов поможет читателям правильно ориентироваться в современных каталогах.

Результаты исследований, полученные в последние годы в психоакустике, показали, что слуховая система производит оценку распределения спектральной энергии сигнала и характер изменения ее во времени, в частности эта информация лежит в основе определения таких субъективных характеристик, как громкость и отчасти тембр. Именно поэтому в 80-е г. была разработана теория и практика применения для оценки акустических систем новой характеристики. Эта характеристика давно использовалась в других областях науки (в частности в квантовой механике). В трудах таких известных ученых, как R. Heysen (в честь его памяти на всех конгрессах AES проводятся мемориальные лек-



**Рис. 9. Форма рупора равномерного покрытия**

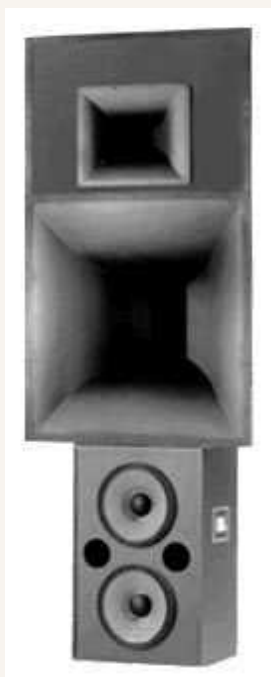


Рис. 10. Вид звуковой колонки фирмы JBL

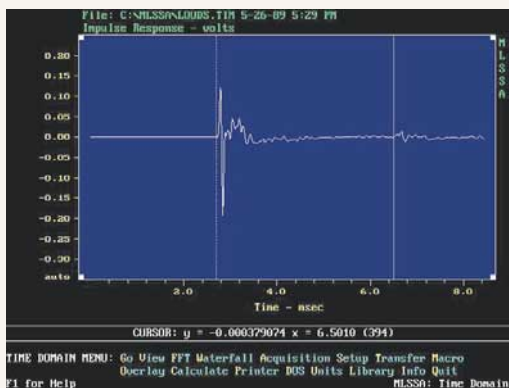


Рис. 11. Импульсная характеристика акустической системы

ции), А. Kaizer, была обоснована возможность ее применения для оценки пространственных характеристик акустических систем. Если известна зависимость звукового сигнала от времени, т.е. например импульсная характеристика акустической системы  $f(t)$  (рис. 11), то можно рассчитать функцию Вигнера, пользуясь следующей формулой:

$$W_f(\omega, t) = \int_{-\infty}^{\infty} e^{-j\omega\tau} f\left(t + \frac{\tau}{2}\right) f^*\left(t - \frac{\tau}{2}\right) d\tau,$$

где  $f(t)$  и  $f^*(t)$  – сопряженные функции («JAES», 1983, April).

Физический смысл полученных результатов представляет собой распределение акустической мощности по частоте и времени. Вид этого распределения для низкочастотного громкоговорителя показан на рис. 12. Расчет акустической мощности для различных точек дает возможность получить информацию о пространственном распределении спектральной акустической мощности внутри помещения и оценить характер изменения ее во времени, что значительно лучше коррелирует с воспринимаемым качеством звучания акустических систем. Анализ этой характеристики позволяет количественно оценить влияние резонансов подвижной системы, правильность выбора частоты раздела и влияние разделительных фильтров на выходные характеристики АС, рассчитать значение мгновенной частоты,

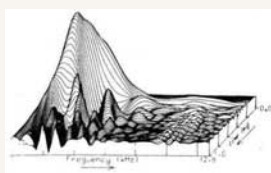


Рис. 12. Распределение Вигнера для низкочастотного громкоговорителя

группового времени задерживания и др. Развитие этой техники является одним из перспективных направлений в акустической метрологии. Она находит все большее применение в процессе разработок акустической аппаратуры.

На основании измеренных или рассчитанных значений акустической мощности можно определить коэффициент полезного действия (КПД), т.е. отношение излучаемой акустической мощности к подводимой электрической мощности при измерениях на заданной частоте или полосе частот:

$$\eta = \frac{P_a}{P_e}.$$

Следует отметить, что все электродинамические громкоговорители прямого излучения и соответственно акустические системы с ними имеют чрезвычайно низкий КПД (<1%). Только узкогорлые рупорные громкоговорители могут иметь КПД до 10%. Учитывая, что объемы производства громкоговорителей в мировой промышленности достигают сотен миллионов штук в год, нетрудно подсчитать, какие огромные электрические мощности расходятся неэффективно. Причиной такой низкой эффективности является, во-первых, то, что громкоговорители излучают в воздух, т.е. в среду с очень низким сопротивлением (в воде КПД излучателей существенно выше); во-вторых, большие мощности рассеиваются в виде тепла в звуковой катушке (в мощных низкочастотных громкоговорителях при большой нагрузке температура, измеренная на звуковой катушке, может достигать 300°), расходуется на трение в подвижной системе и т.д. Как известно, электродинамический громкоговоритель был изобретен в 1926 г. (патент Rice и Kellogg'a), с тех пор предпринималось немало попыток создать более эффективную конструкцию излучателя, но пока не удалось разработать преобразователь, который обеспечивал бы широкий диапазон воспроизводимых частот, низкий уровень нелинейных искажений и высокую эффективность, так что есть большой простор для изобретательской мысли.

*(Продолжение следует)*