

Акустическая метрология

Часть 1

Электроакустические параметры излучателей

И.А. Алдошина

За последние десятилетия в развитии всех направлений аудиотехники произошла своего рода научно-техническая революция. Появление новых цифровых средств записи, обработки, хранения и передачи звука, таких как цифровое радиовещание, цифровая аудио- и видеозапись (CD, DVD и др.), Internet и др., а также создание специализированных цифровых процессоров и алгоритмов обработки звука привело к принципиальным изменениям в теории, практике проектирования и технологии изготовления практически всех видов аудиоаппаратуры.

С одной стороны, появились новые технические возможности для компьютерного моделирования акустических устройств (акустических систем, звуковых колонок, рупорных громкоговорителей и др.), для цифрового управления параметрами аудиоаппаратуры и помещения, в котором они установлены (например, система аурализации), для создания систем пространственной передачи и воспроизведения звука (системы Surround Sound), для цифровой записи, обработки и ретрансляции и т.д.

С другой стороны, значительных успехов добились исследования в области психоакустики по расшифровке восприятия «слухового образа», позволившие выявить целый ряд признаков во временной и спектральной структуре звуковых сигналов наиболее информативных для слуховой системы.

Новые условия не только изменили требования к проектированию аудиоаппаратуры, весьма расширив возможности разработчиков в создании новых видов акустических систем, агрегатов, звуковых колонок и др., но и к ее техническим параметрам.

Эти же требования обусловили изменение норм на уже существующие параметры (нелинейные искажения, динамический диапазон, переходные искажения и т.д.); привели к значительному расширению числа измеряемых характеристик (в 80-е г. обычно нормировалось четыре-пять параметров, сейчас в каталогах на аппаратуру указывается до 30 параметров), а также определи-

ли появление принципиально новых видов параметров (кумулятивные спектры, распределения Вигнера и др.), лучше коррелирующих с восприятием слухового образа.

Требования к методикам измерений объективных параметров, организации субъективных экспертиз, нормам на бытовую и профессиональную акустическую аппаратуру, а также к методам испытаний АС на надежность, климатическую и механическую устойчивость, электробезопасность и электромагнитную совместимость изложены в международных и национальных стандартах, например для акустических излучателей, таких как IEC 268-5, IEC 581-7, IEC 581-13, DIN 45-500, ГОСТ 16122-88, ГОСТ 23262-83, ОСТ 4.202.003-84, ANSI S 4.26-1484, AES-20-96 и др.

В нашей стране до 90-х гг. существовала достаточно жесткая система стандартизации и контроля параметров выпускаемой аудиоаппаратуры, все виды аппаратуры проходили испытания на момент постановки в производство, периодически раз в полгода, при изменении технологии и т.д. Затем обязательная система контроля для большинства параметров была отменена, обязательный контроль остался только для двух параметров: электробезопасности и электромагнитной совместимости, т.е. если акустическая система или звуковая колонка не бьет током, то она вполне пригодна для установки в систему звукоусиления.

Строгая система контроля и стандартизации существует в Европе (особенно в Германии). В России рынок в силу такой свободы оказался наводнен аудиоаппаратурой, которая не проверяется и не нормируется на соответствие стандартам, приходится полагаться на параметры, указанные в каталогах. Здесь также имеет место полная путаница, поскольку некоторые фирмы, пользуясь наличием различных стандартов, указывают нормы на параметры из разных документов (или вообще из собственных соображений). Остается надеяться, что система контроля параметров аудиоаппаратуры на соответствие международным стандартам будет у нас хотя бы частично восстановлена.

В связи с этим прежде чем переходить к описанию последних достижений в проектировании современной техники озвучения и звукоусиления, мы решили предложить вниманию читателей серию статей по акустичес-

кой метрологии, чтобы дать возможность ориентироваться в многочисленных параметрах, указанных в современных каталогах на аппаратуру.

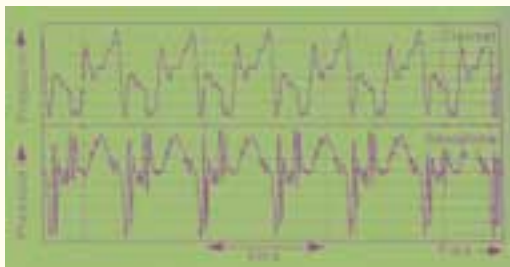


Рис. 1. Временная структура музыкального сигнала

Начнем с описания методов измерения и нормирования электроакустических характеристик излучателей: громкоговорителей, акустических систем, агрегатов, звуковых колонок и др., а затем микрофонов и стереотелефонов.

При воспроизведении музыкальных и речевых сигналов через акустические системы (так же как и через другие звенья тракта) возникают искажения временной структуры музыкального или речевого сигнала (рис. 1), которые могут быть разделены на линейные и нелинейные.

Линейные искажения изменяют амплитудные и фазовые соотношения между имеющимися спектральными компонентами сигнала и за счет этого искажают его временную структуру.

Нелинейные искажения характеризуются появлением в спектре сигнала новых составляющих, которые изменяют временную структуру первоначального сигнала в зависимости от его уровня.

Требование к отсутствию искажений сигнала в акустических системах может быть записано в форме:

$$y(t) = Kx(t - T), \quad (1)$$

где $x(t)$ – входной сигнал, $y(t)$ – выходной сигнал.

Это условие допускает только изменение сигнала в масштабе с коэффициентом K и сдвиг во времени на T , при сохранении его временной структуры.

В линейных системах входной и выходной сигналы связаны интегралом свертки:

$$y(t) = \int_{-\infty}^{\infty} g(t) x(t - \tau) d\tau, \quad (2)$$

где $g(t)$ – импульсная характеристика системы, которая определяет реакцию акустической системы на единичный импульс.

Из формул (1) и (2), а также используя преобразование Фурье от импульсной характеристики, условие передачи неискаженной временной формы сигнала может быть в частотной области представлено в следующем виде:

$$H(j\omega) = Ke^{-j\omega T}, \quad (3)$$

где $H(j\omega)$ – передаточная функция, под которой понимается частотно-зависимое отношение комплексных амплитуд сигнала на выходе и на входе акустической системы при гармонических воздействиях, т.е.

$$H(j\omega) = p(j\omega) / U(j\omega),$$

где p – звуковое давление, U – подводимое напряжение.

Модуль передаточной функции $H(j\omega)$ называется амплитудно-частотной характеристикой – АЧХ (в практике проектирования АС обычно используется $20 \lg |H(j\omega)|$), а ее аргумент $\phi(\omega)$ – фазочастотной характеристикой – ФЧХ.

Условие отсутствия искажений в частотной области (3) примет следующий вид:

$$|H(j\omega)| = K, \phi(\omega) = -\omega T, \quad (3)$$

что означает постоянство уровня АЧХ на всех частотах и пропорциональность частоте аргумента, т.е. ФЧХ.

Несоответствие АЧХ и ФЧХ в реальных акустических системах (агрегатах, звуковых колонках и др.) этим условиям и обуславливается наличием в них линейных и нелинейных искажений.

Следует отметить, что для неискаженной передачи временной формы сигнала условия (3) должны выполняться в полном частотном диапазоне от $-\infty$ до $+\infty$. Однако, поскольку любые акустические системы имеют ограниченный воспроизводимый диапазон частот (в лучших моделях он может достигать 20 – 40000 Гц), то в любых АС, даже если внутри диапазона отклонения АЧХ и ФЧХ от требований (3) минимальны, имеют место искажения временной структуры сигнала.

Амплитудно-частотные искажения

Оценка линейных искажений акустических систем по уровню их амплитудно-частотных искажений (т.е. степени отклонений АЧХ от постоянного значения – от прямой линии) на протяжении всего многолетнего периода производства акустической аппаратуры является основным методом оценки их качества.

В значительной степени это связано с тем, что амплитудно-частотные характеристики

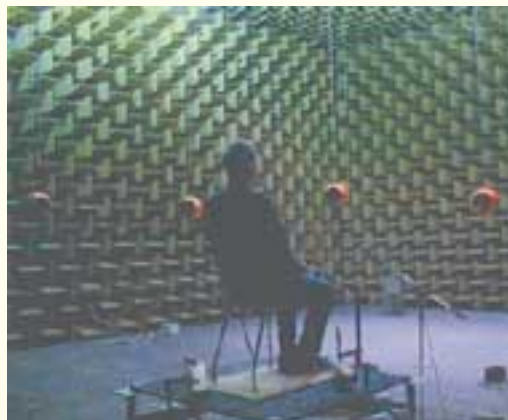


Рис. 2. Вид заглушенной камеры

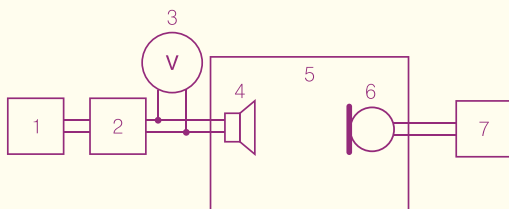


Рис. 3. Структурная схема измерений АЧХ:
 1 – установка автоматической записи;
 2 – УНЧ; 3 – вольтметр; 4 – испытуемая АС; 5 – заглушенная камера; 6 – микрофон; 7 – микрофонный усилитель

литудно-частотные искажения субъективно воспринимаются как искажения тембра, к которым слух очень чувствителен. Поэтому методики измерения АЧХ детально разработаны и включены во все международные и национальные стандарты. Обычно измерения АЧХ (т.е. зависимости уровня излучаемого АС звукового давления от частоты) производятся в специальных заглушенных камерах, обработка поверхностей которых позволяет значительно уменьшить влияние отражений. Заглушенные камеры представляют собой сложные и дорогостоящие помещения, построенные на отдельном фундаменте, поверхности которых заделаны звукопоглощающими клиньями (длиной до 1,5 м, рис. 2). Одна из самых крупных камер в России (размером 10 x 10 x 10 м) имеется в ИРПА (С-Пб), новейшая камера была построена в Риге на НПО «Радиотехника» (как раз перед началом перестройки). Сейчас их строительство почти не ведется из-за дороговизны, постепенно идет переход на цифровые методы измерений (о них чуть позже).

Структурная схема измерений показана на рис. 3. В качестве измерительного используется синусоидальный или шумовой сигнал. Запись АЧХ производится в режиме постоянства напряжения, при установке микрофона на расстоянии 1 м или более. Пример записи АЧХ для акустической системы показан на рис. 4.

Из записанной таким образом АЧХ можно рассчитать целый ряд параметров, позволяющих количественно оценить следующие амплитудно-частотные искажения.

- **Эффективно воспроизводимый диапазон частот (effective frequency range)** – диапазон, в пределах которого уровень звукового давления снижается на некото-

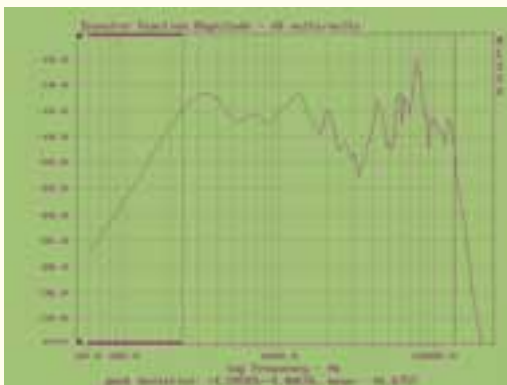


Рис. 4. Пример записи АЧХ

рую заданную величину по отношению к уровню среднего звукового давления, усредненному в некотором диапазоне частот.

В международных рекомендациях IEC(МЭК) 581-7, определяющих минимальные требования к аппаратуре Hi-Fi, указывается, что при спаде 8 дБ по отношению к уровню, усредненному в полосе частот 100 – 8000 Гц, акустические системы категории Hi-Fi должны иметь эффективно воспроизводимый диапазон не уже 50 – 12500 Гц. Для акустических систем и громкоговорителей более низкого класса заданный спад может составлять 10 дБ (он должен указываться в технической документации). В современной студийной аппаратуре и аппаратуре высшего класса High-End нередко указывается диапазон 20 – 20 000 Гц при спаде 3 дБ. Среднее звуковое давление рассчитывается по формуле:

$$p_{cp} = \sqrt{\left(\sum_{i=1}^n p_i^2\right) / n},$$

где p_i – звуковое давление на i - частоте (полосе), n – число частот (полос), входящих в заданный диапазон, выбранных с интервалом в 1/3 октавы.

- **Характеристическая чувствительность (sensitivity)** – отношение среднего звукового давления, развиваемого АС в заданном диапазоне частот (обычно 100 – 8000 Гц) на рабочей оси на расстоянии 1 м при подводимой электрической мощности 1 Вт. Характеристическая чувствительность громкоговорителей в зависимости от области применения находится в следующих пределах: для бытовых акустических систем 86 – 89 дБ/Вт/м, для студийных агрегатов 92 – 94 дБ/Вт/м, для концертно-театральной аппаратуры 98 – 102 дБ/Вт/м. Зная характеристическую чувствительность, можно всегда пересчитать, какой максимальный уровень звукового давления можно получить от системы (например, АС с чувствительностью 90 дБ/Вт/м при подаче 100 Вт мощности от усилителя может обеспечить давление на 20 дБ больше, т.е. 110 дБ). Иногда в каталогах указывается максимальное звуковое давление, которое можно получить от данной акустической системы: max SPL (например, 140 дБ).

- **Неравномерность АЧХ (irregularity)** – разница между максимальным значением уровня звукового давления и минимальным или между максимальным и средним внутри эффективно воспроизводимого диапазона частот (в АС категории Hi-Fi она должна составлять не более +/- 4 дБ в диапазоне 100 – 8000 Гц, в лучших моделях АС она составляет +/-2 дБ).

Кроме того, в акустической аппаратуре, предназначенной для стереовоспроизведения, нормируется расхождение АЧХ в стереопаре (обычно 2 дБ в диапазоне 250 – 8000 Гц).

Вопросам слышимости искажений АЧХ и установлению допустимых порогов на них посвящены многочисленные исследования. Результаты этих работ позволили установить, что пороговая величина воспринимаемых неравномерностей АЧХ в среднем составляет примерно 2 дБ, чувствительность слуха к наличию пиков на

АЧХ значительно выше, чем к наличию провалов, причем уровень этой чувствительности зависит от добротности (т.е. чем больше ширина пика, тем ниже порог чувствительности), местоположения пика (провала) на спектральной огибающей прослушиваемого сигнала и расположения его на частотной шкале (максимальная чувствительность слуха в области средних частот 2000 – 3000 Гц).

Фазочастотные искажения

Длительное время ФЧХ (т.е. степень отклонения фазового сдвига сигнала в АС от прямолинейной зависимости от частоты) не измерялись и не нормировались в акустических системах, поскольку существовало мнение о «фазовой глухоте» слуха. Однако проведенные за последние годы исследования показали, что слуховая система достаточно чувствительна к фазовым искажениям.

Кроме того, особое внимание в современной технике проектирования АС к точной передаче временной структуры сигнала также требует измерения и контроля как АЧХ, так и ФЧХ для последующего восстановления этой структуры с помощью БПФ (быстрого преобразования Фурье). Как показано выше, мерой фазочастотных искажений является степень отклонения фазочастотной характеристики от прямой: $\phi(\omega) = -\omega T$.

(Методы измерения ее в заглушенной камере изложены в книге И.А. Алдошиной «Электродинамические громкоговорители». М., Связь, 1986.)

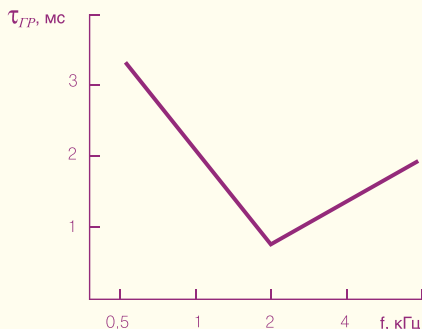


Рис. 5. Пороги слышимости ГВЗ

Однако наиболее информативной величиной с точки зрения субъективного восприятия, как показали многочисленные экспериментальные исследования, является величина искажений группового времени задерживания (ГВЗ), которое определяется следующим образом:

$$\tau_{ГП} = -\frac{d\phi}{d\omega}$$

Пороги слышимости искажений ГВЗ (т.е. степень отклонения его от постоянного значения T) были получены в работах Блаурера и составляют 1 мс в области частот 2000 Гц и 2–3 мс в области 1000 и 4000 Гц (рис. 5). Оценка фазовых искажений в АС производится в основном по этому параметру. В лучших моделях АС категории Hi-Fi измеренные значения ГВЗ приближаются к пороговым.



Рис. 6. Переходные процессы

Переходные искажения

В практике проектирования акустических систем категории Hi-Fi и студийных контрольных агрегатов уже длительное время измеряются и нормируются «переходные» искажения, определяющие характер процесса нарастания («атаки») и спада сигналов, воспроизводимых АС (искажения такого типа играют значительную роль в распознавании музыкальных инструментов и речи, рис.6). Для измерения переходных искажений используется широкий класс сигналов: пакеты тональных сигналов, прямоугольные импульсы с синусоидальным заполнением и т.д. Методика измерений таких искажений в заглушенной камере практически совпадает с методами измерения АЧХ, только выполняется на других видах испытательных сигналов.

По осциллограммам на резонансной частоте можно определить такие параметры переходного процесса, как декремент затухания $\Delta = 1/\pi \ln A_n/A_{n+1}$, где A_n/A_{n+1} – отношение амплитуд предыдущей волны к последующей; и время затухания t , в течение которого амплитуда сигнала падает до 0,1 начального значения. Для студийных контрольных агрегатов установленные нормы на параметры переходных искажений (в соответствии с международными рекомендациями ТК ОИРТ55/1) составляют: $\tau < 18$ мс на частотах ниже 100 Гц, $\tau < 5$ мс на частотах от 100 до 250 Гц, $\tau < 4$ мс на частотах выше 250 Гц. Субъективные дифференциальные пороги слышимости переходных искажений на тональных импульсах для времени затухания составляют: в области частот 1 – 10 кГц $\tau = 0,5$ мс, в области ниже 1 кГц $\tau = 1$ мс. Для реальных музыкальных сигналов значения порогов должны быть выше, так как искажения в излучателях маскируются собственными переходными процессами в музыкальных инструментах (эти вопросы в настоящее время интенсивно исследуются).

Цифровые методы измерений

Широкое развитие теории цифровой обработки сигналов и соответствующей компьютерной техники привело к появлению цифровых метрологических компьютерных станций, что позволило повысить точность, скорость измерений и обработки результатов, а также обеспечить возможность проведения измерений в незаглушенных помещениях. Из известных в настоящее время специализированных метрологических комплексов можно назвать: Tescron TEF-20 (США), Audio Precision System 1 (США), DRA Lab. MLSSA (США),

Linear-X system LMS (США), Kirchner Elektronik ATB 2.40 (Германия).

Методы измерений АС с использованием цифровой техники основаны на прямых измерениях импульсных характеристик излучателей (АС или ГГ) с последующей цифровой обработкой на ЭВМ, что дает возможность с помощью преобразования Фурье получить расчетным путем амплитудно-частотную и фазочастотную характеристики. Эти методы уже введены в современные международные стандарты (IES 268-5-2000).

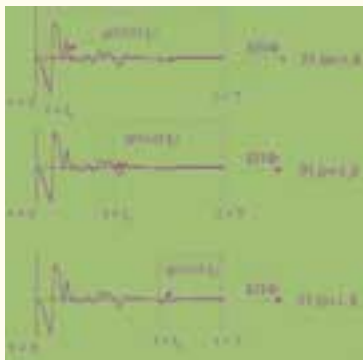


Рис. 7. Анализ импульсной характеристики с помощью БПФ

Измерения импульсных характеристик можно проводить как в заглушенных камерах, так и в обычных незаглушенных помещениях. Требования к размерам помещения для измерений определяются из следующих условий: время прихода к микрофону первых отражений $t_{отр}$ должно быть больше времени прихода самого импульса $t_{имп}$ и его длительности t , таким образом $t_{отр} > t_{имп} + t$.

Из этого условия можно установить связь расстояния между АС и микрофоном (d), размерами помещения (высота потолка h) и нижней измеряемой частотой f_{min} (например, при высоте потолка $h = 2$ м и $d = 1,15$ м $f_{min} = 298$ Гц, а при $h = 3$ м и $d = 1,75$ м $f_{min} = 199$ Гц). Как следует из этих данных, для измерений в низкочастотном диапазоне частот требуется помещение достаточно больших размеров.

Однако за последние годы активно развиваются различные цифровые методы подавления отражений в помещении с помощью цифровых адаптивных процессоров, что уже позволило разработать методики измерений характеристик акустических излучателей в помещениях значительно меньших размеров (в частности, в помещениях, где расстояние между прямым и отраженным звуком достигает 7,9 м, удалось получить значения АЧХ с 40 Гц с погрешностью около 3 дБ).

С помощью цифровой обработки сигналов можно построить динамический, так называемый «кумулятивный» спектр, который дает значительно большую информацию в частотной и временной областях о структуре сигнала, прошедшего через акустическую систему или ГГ. Идея метода состоит в том, что в разные моменты времени t_1, t_2, \dots, t_n применяется преобразование Фурье к отдельным частям импульсной характеристики,

при этом получаются АЧХ и ФЧХ, соответствующие разным моментам времени в процессе затухания колебаний (рис. 7). Если построить трехмерный график, по одной оси которого отложить уровень звукового давления (дБ), по другой – частоту (Гц), по третьей – время (с), то можно получить кумулятивный амплитудный спектр, характеризующий процесс затухания амплитуды звукового сигнала на разных частотах в разные моменты времени.

Образец амплитудного «кумулятивного» спектра представлен на рис. 8. Аналогично может быть построен и фазовый кумулятивный спектр. В настоящее время программы построения кумулятивных спектров используются во многих цифровых метрологических станциях и цифровых измерительных приборах. Возможность расчета и графического построения кумулятивных спектров заложена также в подавляющее большинство программ, предназначенных для обработки звуковых сигналов (например, SpectraLAB и др.)

Такого рода измерения несут значительно больше информации о динамическом переходном спектре акустических систем, позволяют выявить так называемые «задержанные» резонансы, которые практически не видны на стационарных АЧХ и ФЧХ. Эти резонансы мо-

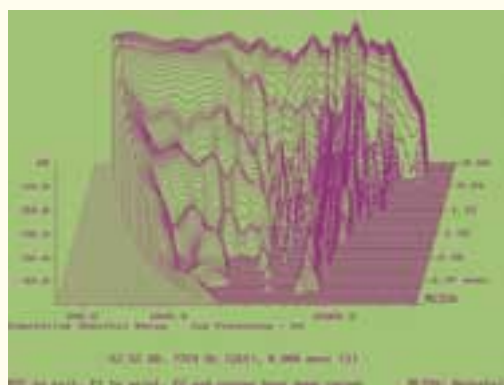


Рис. 8. Кумулятивный спектр

гут быть обусловлены отражением от задней стенки и углов корпуса акустической системы, собственными резонансами подвижной системы громкоговорителя и др.

Для оценки кумулятивных спектров акустических излучателей еще не разработаны стандартизированные нормы, однако в практике проектирования акустической аппаратуры используются такие характеристики этих спектров, как время спада АЧХ на заданной частоте, число резонансов в заданные промежутки времени, гладкость и время затухания кривых спада и т.д.

В настоящее время практически все ведущие фирмы, особенно производители профессиональной аппаратуры, приводят в каталогах кумулятивные спектры на свои изделия.