

Акустическая метрология

Часть 4

Электроакустические параметры излучателей

И.А. Алдошина

Одно из главных требований, предъявляемых к электроакустической аппаратуре как профессиональной (для систем озвучения, концертно-театральной, студийной и др.), так и бытовой, состоит в обеспечении неискаженной передачи динамического диапазона музыкальных и речевых сигналов. Любой музыкальный и речевой сигнал можно представить в виде уровнеграммы (рис. 1), характеризующей зависимость уровня звукового давления (создаваемого, например, оркестром, голосом или любым инструментом) от времени.

Разность между максимальным и минимальным уровнем звукового давления определяет динамический диапазон сигнала, а разность между максимальным и средним уровнем его пик-фактор. Под максимальным уровнем понимается уровень звукового давления, выше которого значения сигнала могут нахо-

диться не более 2% времени для музыки и 1% – для речи. Максимальные уровни звуковых давлений реальных источников могут достигать значений: у рояля – 103 дБ; у симфонического оркестра – 112 дБ; у рок-ансамбля – 128 дБ и др.



Рис. 2. Мощные студийные агрегаты для цифровых студий звукозаписи

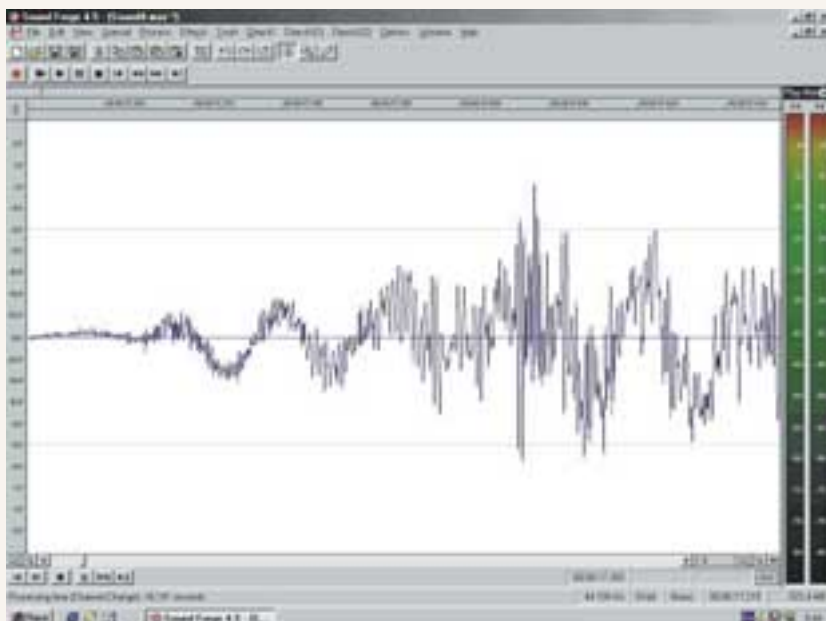


Рис. 1. Уровнеграмма музыкального сигнала

Для того чтобы акустическая аппаратура воспроизводила такие уровни звуковых давлений, она должна быть, во-первых, особым образом сконструирована, во-вторых, к ней должны подводиться большие значения электрической мощности от усилителя.

Если акустическая система не может воспроизвести такие уровни, то верхние уровни сигнала клиппируются, при этом возникают нелинейные искажения, которые существенно искажают субъективно воспринимаемое качество звучания.

Для характеристики способности АС к неискаженной передаче динамического диапазона звука в каталогах и проспектах используется такой параметр, как Max SPL – максимальный уровень звукового давления. В большинстве АС значения Max SPL лежат в пределах 102 – 105 дБ, однако для работы с цифровыми трактами созданы студийные агрегаты с Max SPL до 110 дБ и более (рис. 2), а в порталных концертных акустических системах эти значения могут быть 125 дБ и выше. Чтобы обеспечить такие уровни давлений, к акустическим

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

системам должны подводиться большие мощности от УНЧ: 100 – 200 Вт для бытовой аппаратуры и 300 – 1000 Вт и более – для профессиональной. Обычно в каталогах на акустические системы дается рекомендуемая мощность УНЧ. Часто изготовитель указывает даже две мощности: минимальную, при которой АС еще достаточно натурально воспроизводит программу, и максимальную, при которой АС еще продолжает работать без значительных искажений.

Вопросы согласования по мощности усилителей и акустических систем настолько важны для обеспечения хорошего качества звучания, что в связи с этим разработаны специальные международные рекомендации IEC 268-5,581-7. В соответствии с ними в каталогах, рекламах и технической литературе для акустических систем и других видов акустической аппаратуры указываются следующие виды мощностей:

- **характеристическая**, при которой АС обеспечивает заданный уровень звукового давления (в международных рекомендациях на аппаратуру hi-fi он должен быть не менее 94 дБ на 1 м);
- **паспортная** (power handling capacity – phc), при которой АС может работать на специальном шумовом сигнале длительное время (обычно 100 ч) без механических и тепловых повреждений; это самый распространенный вид мощности, указываемый в технической литературе;
- **максимальная синусоидальная**, обеспечивающая возможность проведения измерений на синусоидальном сигнале в течение 1 ч.

Специально для согласования с усилителями введено еще два вида мощностей: долговременная и кратковременная максимальная мощность (в немецком стандарте DIN 45500 введена близкая к последней по определению мощность «музыкальная»); для испытаний используется шумовой сигнал, но испытания продолжаются по 1 мин 10 раз с интервалом 2 мин и по 1 с 60 раз с интервалом 1 мин соответственно.

Значения этих мощностей могут для одной и той же акустической системы отличаться в несколько раз. Например, характеристическая мощность – 35 Вт, максимальная синусоидальная – 50 Вт, паспортная – 90 Вт, долговременная – 100 Вт, кратковременная – 150 Вт.

В предыдущие годы в технической документации на отечественную аппаратуру указывалась номинальная мощность, которая определялась заданным уровнем нелинейных искажений, она обычно и указывалась в названии на акустическую систему, например 35АС-01. После того как в международных стандартах перешли на другие виды мощностей, в названии стали давать паспортную мощность, например S-90, через некоторое время в названиях акустических систем начали ставить долговременную (или даже кратковременную) мощность, например 150АС, таким образом создается впечатление, что мощности все время растут, хотя в конструкции ничего не меняется, а дело только в различном определении мощностей, многие фирмы пользуются этим в рекламных целях (поэтому и требуется хорошая осведомленность пользователей в этих тонкостях).

Для согласования акустических систем с усилителями мощности важное значение имеет характер ее полного входного электрического сопротивления (импе-

данса). Электрическое сопротивление реальных многополосных акустических систем и отдельных громкоговорителей имеет сложный комплексный, зависящий от частоты характер (рис. 3). Обычно в национальных и международных стандартах предусматривается запись частотной зависимости модуля электрического сопротивления, хотя указание фазовых характеристик импеданса также очень полезно и часто приводится в современных каталогах.

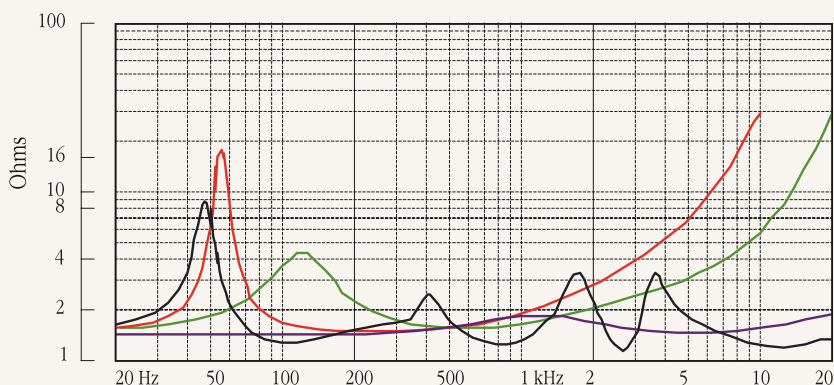


Рис. 3. Частотная зависимость импеданса для акустической системы и отдельных головок громкоговорителей

В соответствии с ГОСТ 16122-88 запись частотной зависимости полного входного сопротивления может производиться в режиме постоянства напряжения или в режиме постоянства тока (рис. 4). В современных цифровых компьютерных станциях измеряются комплексные частотные характеристики (амплитудные и фазовые) входного электрического сопротивления.

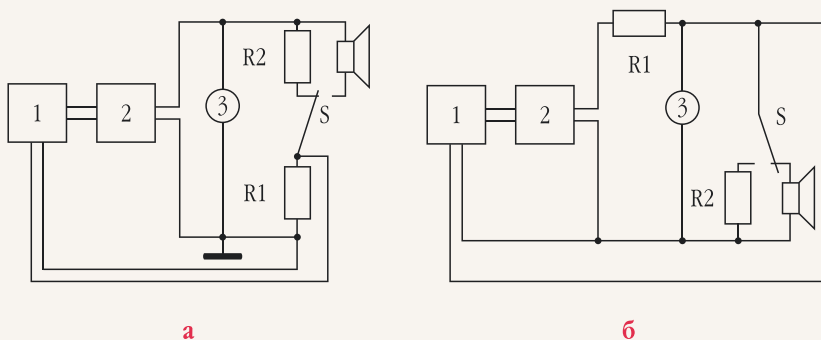


Рис. 4. Схемы измерений импеданса: а) в режиме постоянства напряжения; б) в режиме постоянства тока

Характер зависимости импеданса акустической системы от частоты определяется видом низкочастотного оформления (закрытый, с фазоинвертором, с пассивным излучателем и др.), параметрами головок громкоговорителей, свойствами фильтрующе-корректирующих цепей, используемых в системе, и др.

Например, частотная характеристика модуля импеданса низкочастотной головки (рис. 5) в закрытом оформлении, представленная на (рис. 6), может быть



Рис. 5. Низкочастотная профессиональная головка громкоговорителя

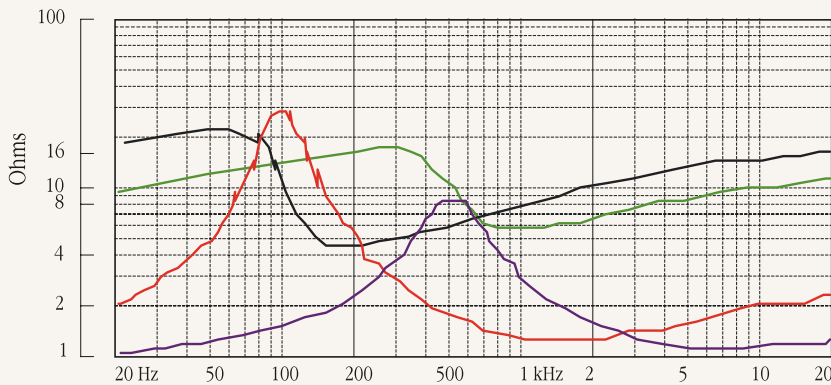


Рис. 6. Частотная зависимость модуля импеданса для низкочастотного громкоговорителя в закрытом оформлении

рассчитана из соответствующей эквивалентной схемы по следующей формуле:

$$Z(\omega) = R_0 + j\omega L_0 + \frac{1}{\frac{1}{R'} + j\omega C' + \frac{1}{j\omega L'}}$$

где

$$C' = \frac{M_{AC} S_D^2}{B^2 l^2}; \quad L' = \frac{C_{AT} B^2 l^2}{S_D^2}; \quad R' = \frac{B^2 l^2}{(R_{AB} + R_{AS}) S_D^2};$$

B – индукция в зазоре магнитной цепи; l – длина проводника звуковой катушки; R_{AS} – активное сопротивление потерь в подвижной системе; R_{AB} – активное сопротивление потерь в корпусе; S_D – эффективная площадь диффузора; C_{AT} – акустическая гибкость громкоговорителя, помещенного в закрытый корпус (зависит от гибкости подвеса ГГ и гибкости воздуха в корпусе); M_{AC} – масса подвижной системы ГГ с учетом внесенной массы воздуха; M_{AC} – полное сопротивление потерь громкоговорителя в корпусе, равно

$$R_{AT} = R_{AB} + R_{AS} + B^2 l^2 / |R_E S_D^2|;$$

L_0 и R_0 – индуктивность и активное сопротивление катушки соответственно.

Как видно из формулы, характер зависимости полного электрического сопротивления от частоты может быть описан следующим образом:

- в области частот ниже резонансной частоты $\omega < \omega_{pec}$ импеданс представлен в виде $Z \sim (R_0 + j\omega L_0 + j\omega L')$, т.е. сопротивление имеет главным образом индуктивный характер, а поскольку величина L' связана с механической упругостью акустической системы $L' = B^2 l^2 C_{MS}$, то в области низких частот система управляется в основном упругостью;

- на частоте резонанса $\omega_{pec} = \frac{1}{\sqrt{L' C'}}$ модуль равен $|Z| \sim R_E + R'$, а фаза – нулю, т.е. сопротивление носит чисто активный характер;

- на частоте второго – электромеханического резонанса, где $\omega_{эм} = \frac{1}{\sqrt{L_0 C'}}$ (резонанс последовательного контура

с элементами L_0, C'), модуль достигает своего минимального значения $|Z| \sim R_E + \Delta$, где $\Delta \sim 0,1 R_E$ (именно по этому значению он и нормируется, так как в соответствии с ГОСТ 16122-88 величина модуля импеданса на этой частоте не должна быть ниже номинального значения больше чем на 20%), а фаза становится равной нулю. Например, если в технической документации задано номинальное значение 8 Ом, то значение модуля импеданса на частоте электромеханического резонанса не должно быть ниже 6,3 Ом;

- на высоких частотах $\omega > \omega_{эм}$ полное электрическое сопротивление носит чисто индуктивный характер и определяется индуктивностью L_0 звуковой катушки громкоговорителя.

Созданные за последние годы методы расчета на ЭВМ характеристик АС в области низких частот требуют измерения у ГГ, входящих в их состав, целого ряда «электромеханических» параметров, называемых «параметры Small-Thiele» (по имени ученых, разработавших эти методы): активного сопротивления звуковой катушки R_E ; частоты основного резонанса f_s ; добротности Q_{TS} (полной), Q_{ES} (электрической), Q_{MS} (механической); эквивалентного объема V_{AS} , эффективной площади излучения S_D ; максимального смещения звуковой катушки X_d и др. Некоторые из этих параметров можно определить из записанной частотной характеристики входного электрического сопротивления:

- частота основного резонанса f_s определяется как частота, при которой значение модуля полного электрического сопротивления имеет первый главный максимум (рис. 6). Частота может измеряться непосредственно или определяться из записанной частотной характеристики модуля полного электрического сопротивления. В некоторых случаях, особенно при измерениях высокочастотных громкоговорителей, более точным методом является определение резонансной частоты из фазочастотной характеристики (как частоты, при которой ФЧХ проходит через ноль);

- добротность – полная Q_{TS} , механическая Q_{MS} и электрическая Q_{ES} в электроакустических преобразователях связаны между собой соотношением:

$$\frac{1}{Q_{TS}} = \frac{1}{Q_{MS}} + \frac{1}{Q_{ES}}$$

Наибольшее распространение получили методы их определения, использующие измерения частотной характеристики модуля полного электрического сопротивления на синусоидальном сигнале или измерения параметров переходного процесса в электрической цепи излучателя.

Измерения проводятся по схеме (см. рис. 4): при плавном изменении частоты определяется частота f_0 , при которой показания вольтметра будут максимальными U_{MAX} ; затем определяется частота f_{sm} , соответствующая минимальным показаниям U_{MIN} , а также отмечаются две частоты f_1 и f_2 , расположенные в области $f_1 < f_0 < f_2$, на которых напряжения равны $U_1 = U_2$.

Величина этих напряжений определяется как

$$U_{1,2} = U_{MAX} \sqrt{\frac{R_0}{|z|_{MAX}}},$$

где R_0 – сопротивление громкоговорителя на постоянном токе, а $|z|_{MAX}$ – максимальное значение модуля.

В этом случае механическая добротность равна:

$$Q_{MS} = \frac{\sqrt{f_1 f_2}}{f_1 - f_2} \sqrt{\frac{|z|_{MAX}}{R_0}}.$$

Полная добротность определяется как $Q_{TS} = Q_{MS} \frac{R_0}{|z|_{MAX}}$.

Электрическая добротность вычисляется по формуле

$$\frac{1}{Q_{ES}} = \frac{1}{Q_{TS}} - \frac{1}{Q_{MS}}.$$

• Эквивалентный объем V_{AS} определяется как закрытый объем воздуха, имеющий акустическую гибкость, равную гибкости подвижной системы громко-

говорителя: $V_{AS} = V_B \left[\left(\frac{f_c}{f_s} \right)^2 - 1 \right]$, где f_s – резонансная

частота громкоговорителя без оформления, f_c – резонансная частота громкоговорителя, помещенного в закрытый корпус объемом V_B с хорошей герметизацией. Объем ящика выбирается из условия: $f_c > \sqrt{2} f_s$.

В настоящее время цифровая техника позволяет использовать быстрые и точные методы определения всей совокупности электромеханических параметров: записывается переходная характеристика громкоговорителя (в соответствующем корпусе) по напряжению в звуковой катушке. Затем численными методами идентифицируются коэффициенты электрической цепи, переходная характеристика которой совпадает с измеренной, и из полученных таким образом характеристик вычисляются указанные выше параметры. Этот метод реализован в современных компьютерных метрологических станциях.

Полный набор параметров Small-Thiele для низкочастотных головок громкоговорителей фирмы Pioneer для профессиональной аппаратуры приведен в таблице (поскольку при дальнейшем описании методов проектирования аппаратуры для озвучения, которое предполагается сделать в следующих статьях, эти параметры будут постоянно использоваться).

В современных метрологических компьютерных станциях и программах (MLSSA, Clío и др.) заложена возможность измерения более 30 электроакустических характеристик, некоторые фирмы дают подробнейшие данные на свою аппаратуру, в то же время другие приводят два-три параметра, однако в настоящее время имеются международные стандарты (например, IEC 581-7), которые определяют минимальные требования на бытовую и профессиональную аппаратуру, являющиеся обязательными для представления в технической документации на все виды аппаратуры.

Параметры Small-Thiele	Обозначение	Ед. измерения	TL-1101	TL-1102
Nominal impedance (Номинальный импеданс)	–	Ом	16	8
Piston Area (Площадь поршня)	S_D	in ² /м ²	56,8/0,0366	56,8/0,0366
DC Voice Coil Resistance (Сопротивление звуковой катушки)	R_E	Ом	13	7,2
Voice Coil Inductance 1kHz (Индуктивность звуковой катушки на 1 кГц)	L_E	мГ	2	1,1
Flux Density (Плотность магнитного потока)	BL	Тм	20,5	13,5
Equivalent Acoustic Volume (Эквивалентный акустический объем)	V_{AS}	ft ³ /л	3,25/92	4,27/121
Mechanical Suspension Compliance (Механическая гибкость подвеса)	C_{MS}	x 10 ⁻⁴ м/Н	4,832	6,382
Mechanical Mass of Cone and Free Air (Механическая масса конуса и присоединенная масса воздуха)	M_{MS} M_{MD}	г	36,3 28,7	41,3 34,1
Free Air Resonance Frequency (Резонансная частота)	f_c	Гц	38	31
Mechanical Q Factor (Механическая добротность)	Q_{MS}	–	3,86	4,35
Electrical Q (Электрическая добротность)	Q_{ES}	–	0,27	0,32
Factor Total Q Factor (Полная добротность)	Q_{TS}	–	0,25	0,3
Maximum Linear Peak Excursion (Максимальное линейное смещение)	X_{MAX}	in/мм	0,1/2 5	0,24/6,2
RMS Thermal Power Limit	P_{MAX}	Вт	500	500
Relative Efficiency (кпд)	–	–	1,82%	1,10%
Maximum Excursion Before Damage (Максимальное смещение, ограниченное механическими повреждениями)	–	in/мм	1,26/32	1,26/32

Хотелось бы обратить внимание еще на один очень важный момент при оценке параметров электроакустической аппаратуры, особенно важный для ее эксплуатации в нашей стране: устойчивость и надежность характеристик при эксплуатации аппаратуры в различных климатических и механических условиях. Требования к климатомеханическим испытаниям всех видов аппаратуры значительно ужесточились за последние годы и, например, в Америке они приблизились к военным стандартам (835-A). В соответствии с ними образцы аппаратуры, предварительно измеренные по всем параметрам, помещаются на определенное время в соответствующие условия (камеры тепла, холода, влажности и т.д.), затем после выдержки снова проверяются их ра-

ботоспособность и параметры. В предыдущие годы вся выпускаемая нашей промышленностью аппаратура подвергалась этим испытаниям, поскольку при ее транспортировке и хранении были случаи значительно ухудшения параметров, например за счет размагничивания феррит-бариевых магнитов в условиях пониженных температур и др. В каталогах на аппаратуру обязательно должны указываться допустимые условия ее эксплуатации по температуре, влажности и т.п., что принципиально важно, особенно для аппаратуры озвучения, концертно-театральной и др.

Действующие в настоящее время нормы отечественных стандартов на условия испытания акустической аппаратуры, которые она должна выдерживать без потери работоспособности, приведены ниже (ГОСТ11478-88).

Наконец, все виды электроакустической аппаратуры, кроме измерения объективных параметров, должны подвергаться обязательной процедуре субъективной оценки качества звучания (это принципиально отличает электроакустическую аппаратуру от других электронных приборов). Вызвано это тем, что, поскольку до настоящего времени не решена проблема расшифровки слухового образа, нет уверенности, что даже измерение 30 и более параметров гарантирует необходимое качество звучания. В практике конструирования акустической аппаратуры можно привести достаточно много случаев, когда, например, два акустических агрегата примерно с одинаковыми объективными параметрами получают разные оценки при субъективном прослушивании. Чтобы обеспечить максимальную повторяемость и стабильность оценок при субъективной экспертизе в международных и национальных стандартах, которые на сегодняшний день подвергаются существенной доработке в связи с переходом на системы про-

Прочность при транспортировании:

Ускорение, м/с	147
Длительность ударного импульса, мс	5 – 20
Частота ударов в минуту	40 – 80
Число ударов	5000

Теплоустойчивость:

Рабочая температура, °С	40 ± 2
Продолжительность, ч	4
Предельная температура, °С	50 ± 2
Продолжительность, ч	2

Выдержка в нормальных климатических условиях, ч, не менее	6
---	---

Пониженное атмосферное давление (высотность):

Атмосферное давление, кПа (мм рт. ст.)	80 ± 1,3 (600 ± 10)
--	------------------------

Температура, °С	25 ± 2
Продолжительность, ч	0,5

Холодоустойчивость:

Предельная температура, °С	-40 ± 2
Продолжительность, ч	4
Выдержка в нормальных климатических условиях, ч	12

Влагоустойчивость:

Относительная влажность, %	93 ± 3
Температура, °С	25 ± 2
Продолжительность, ч	48
Выдержка в нормальных климатических условиях, ч	по ТУ

странственного звука (IEC268-5, AES-20-96, ОСТ4.202.003-84 и др.), четко оговариваются условия проведения испытаний, требования к выбору помещения, программного материала, экспертов, методов оценок и статистической обработки материалов. Подробнее об этом постараемся рассказать в дальнейшем.

Следующая статья из этой серии будет посвящена «Электроакустическим измерениям микрофонов».