

ФЕВРАЛЬ

1998

CLASS A

Hi-Fi, High End AUDIO

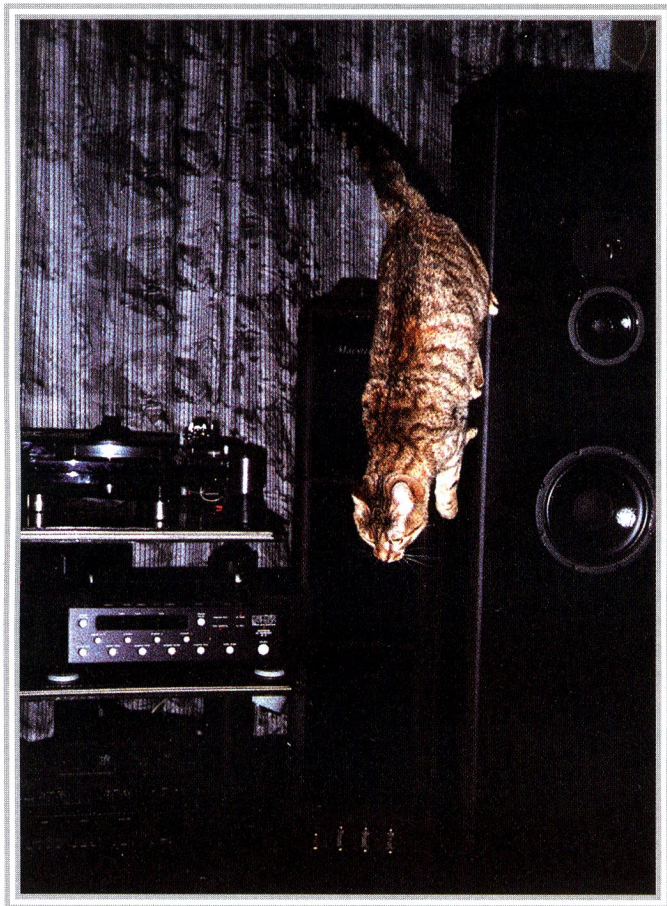
репортаж из Лас-Вегаса

Старый винил
и новый Dual

Домашнее кино:
мечты сбываются!

Размышления о
концептуальном и реальном

РАЗМЫШЛЕНИЯ О КОНЦЕПТУАЛЬНОМ И РЕАЛЬНОМ (продолжение)



3. Некоторые особенности акустики закрытых помещений

Архитектурная акустика — одна из древнейших областей человеческого знания, многие века успешно опиравшаяся на интуитивный и эмпирический фундамент, лишь в конце XIX века стала приобретать черты науки благодаря начавшимся измерениям взаимосвязи свойств акустических полей с формой помещений и влиянием отделочных материалов, изучению психо-физиологических свойств пространственного слуха при восприятии звука в различных помещениях, а также определению статистическо-психологических, эстетических и семантических критериев предпочтительности архитектурно-строительных решений для разнообразных музыкальных программ и типов личностей слушателей.

Одно лишь неполное перечисление целей, стоящих и поныне перед учеными, объясняет громадные сложности создания методов инженерных расчетов, позволяющих еще на стадии проектирования предвосхитить результаты строительства, а также выработать физико-технические средства — некие конструкции, обеспечивающие объективно и субъек-

ективно однозначно трактуемые результаты поставленных целей и примененных методов их достижения.

Развитие искусств требовало соответствующих строений для массовых зрелищ. Термин «театр» и обозначает место, чтобы видеть. Впоследствии появилось потребность и в месте, чтобы слышать. Изначально архитектурная акустика была ориентирована на большие и просто огромные открытые сооружения, позже — на закрытые помещения. Во все времена субъективные суждения о качестве звучания речи и музыки в том или ином сооружении являлись единственным критерием его акустического качества. Современные концертные, театральные и кинозалы оснащаются сложными системами электроакустического формирования звуковых полей с возможностью управления акустическими свойствами помещения, аппаратно и архитектурно оптимально адаптируемых для различных типов музыкальных программ.

Все достижения науки в области архитектурной акустики используются преимущественно при проектировании общественных сооружений, то есть достаточно крупных и дорогостоящих. Методологии изучения и рекомендации для создания таких уникальных помещений отчасти могут быть использованы и при построении высококачественной комнаты прослушивания — самого дорогого компонента аудиосистемы. Одни и те же акустические процессы в помещениях описываются тремя языками — тремя теориями: волновой, статистической и геометрической.

Все три метода имеют значительную взаимосвязь, дополняя друг друга, если только одним методом не удастся решить конкретную задачу. Начнем рассмотрение с самой молодой теории — волновой, переходя к другим по мере надобности.

Воздух, находящийся в замкнутом объеме, обладает некоторой распределенной массой. Поскольку плотность воздуха невелика и между его молекулами существует достаточное расстояние для их перемещения под воздействием внешних сил (например, под действием сил источника звука, о чем говорилось в разделе 1), постольку распределенная колебательная система объема воздуха может совершать вынужденные колебания с частотами воздействующих сил, а также с собственными частотами. После снятия действия вынуждающих сил (отключение источника звука) колебательный процесс не прекращается мгновенно, но изменяется его характер: продолжают совершаться только собственные колебания распределенной воздушной массы, которые постепенно затухают. Это явление называют отзвуком (реверберацией).

При включенном источнике звука звуковые волны распространяются в различных направлениях: осевом, касательном и наклонном, отражаются от ограничивающих помещение поверхностей и, складываясь с прямыми волнами, создают стоячие волны. Частоты собственных колебаний f_n распределенной массы воздуха зависят от абсолютных размеров помещения, а также соотношений его размеров (пропорций, рис. 3.1):

$$f_n = \frac{c_0}{2\sqrt{(n_L/L)^2 + (n_B/B)^2 + (n_H/H)^2}} \quad (3.1)$$

где L, B, H — длина, ширина и высота помещения;
 n_L, n_B, n_H — целые числа от нуля до бесконечности, показывающие количество стоячих волн, возникающих соответственно в направлениях L, B и H .

Частоты собственных колебаний воздуха в помещении располагаются между собой теснее, а звуковое поле более равномерно, если L, B и H не равны и не кратны друг другу. Для примера на рис. 3.2 показан спектр собственных частот помещения с размерами $L = 6$ м, $B = 4$ м и $H = 3$ м. В области низких частот собственные частоты помещения располагаются достаточно далеко друг от друга, а выше частоты 70 Гц их число увеличивается и далее спектр собственных колебаний воздуха в помещении становится практически сплошным. Этот физический факт имеет также существенное значение для семантической и эстетической составляющих при восприятии музыки. Рассмотрим, какое именно.

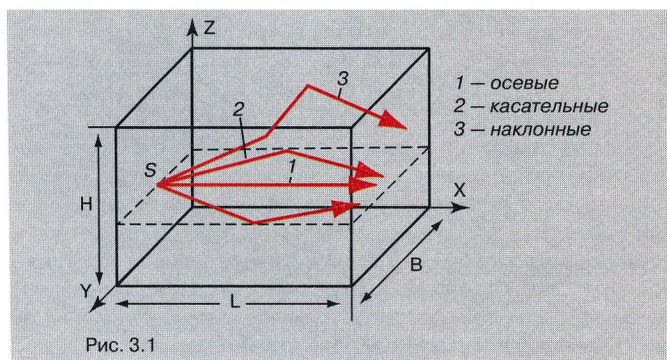
Спектр сложного звукового (музыкального) сигнала может содержать частоты, которые отсутствуют или которых мало в спектре собственных колебаний воздуха в помещении. При этом вынуждающее действие источника сигнала вызовет ответное (в резонанс) колебание воздушной среды на частотах, совпадающих с частотами источника. Именно эти частоты в звуковом сигнале получат добавочную энергию, а потому и затухание собственных колебаний воздуха будет продолжаться дольше. Те спектральные составляющие сигнала, частоты которых не совпадут с собственными частотами помещения, не получат дополнительной энергии отзвука помещения и будут маскироваться теми спектральными составляющими, которые удачно попали в резонанс с собственными частотами помещения. Так нас просвещает академический учебник.

Это явление может (но не обязательно, как будет показано далее) вызвать изменение тембра и четкости восприятия музыки, особенно в области низких частот. Именно на это явление ссылаются, когда утверждают, что в небольших помещениях (вроде того, спектр собственных частот которого приведен на рис. 3.2) нет смысла устанавливать АС с полосой воспроизводимых частот ниже 80 Гц. Этот вопрос уже поднимался недоумевающими читателями в журнале «Аудио Магазин» (№ 3 (4)' 95; №1 (6)' 96), и им уважаемый эксперт В.М.Зуев убедительно доказывал, что в маленьких помещениях они плохо слышат звуки с частотами ниже

$$f = 340/V^{1/3} \quad (3.2)$$

где V, m^3 — объем комнаты.

А все, что слушатель слышит выше этой частоты, маскируется и искажается гудящим и затынутым басом. Поэтому-де нижняя граничная частота не должна быть ниже той, что определяется по формуле (3.2). Кстати, для помещения размером 6 x 4 x 3 м эта частота, вычисленная по формуле (3.2), составляет 82 Гц. А теперь посмотрите на рис. 3.2.



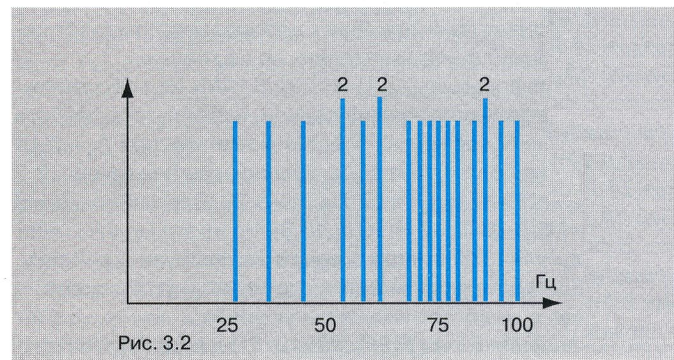
Видите, там есть частоты значительно ниже. Верна ли формула (3.2)? Ответ очевиден. Моя лаборатория «SAS» размещается в помещении размером 5,25 x 3,05 x 2,55 м, для которого частота по формуле (3.2) составляет 99 Гц. Летом 1997 года во время визита Вениамина Михайловича в Москву я предоставил и ему тоже, как и многим другим, возможность убедиться в том, что биполярные АС «Mirage M1» совместно с остальными компонентами звукового тракта безо всяких трудностей преодолевают «запрет», наложенный им на качественное воспроизведение баса: во-первых, при обычном для прослушивания музыки положении регулятора громкости не только приборами, но и ушами слышен тон частоты 20 Гц и комната, естественно, не резонирует; во-вторых, при воспроизведении музыки, где одновременно и даже на одной ноте играют достаточно много самых низкочастотных инструментов (бас-гитара, «бочка», контрабас, виолончель), ни один из них не маскируется другим; в-третьих, звуковой тон не увеличивается по амплитуде (например, при щипке струны контрабаса) и не затягивается во времени, чем пугает Вениамин Михайлович в «АМ» №1' 96, стр. 97; в-четвертых, АС установлены с точностью до наоборот (относительно рекомендации В.М.Зуева там же), то есть стоят на полу без шипов и уж тем более не оторваны от него на 0,5 м, а также установлены параллельно короткой, а не длинной стене.

Надо полагать, что это сделано не случайно. Лаборатория «Supreme Audio Synthesis» создавалась мной именно для творческого анализа неоднозначных проблем.

Попробуем найти основные причины, вследствие которых практика слухового восприятия опровергает слишком общающее мнение эксперта и учебника. Позволю себе сделать небольшое отступление для лучшего восприятия читателем моей дальнейшей мысли. Положим, перед вами две электрические розетки: в одной напряжение 220 В, а в другой — 127 В. В вашем распоряжении есть вольтметр, у которого кто-то снял шкалу. Можно ли этим прибором определить нужную вам розетку, чтобы включить аппаратуру на 127 В? Правильно, можно. Вы легко сопоставите, что в первом случае (220 В) стрелка вольтметра отклонится на несколько большую величину, чем во втором случае (127 В). А сможете ли вы с таким прибором настроить кроссовер? Сомнительно.

Аналогично обстоит дело с измерительными эталонными (референсными) аудиосистемами, посредством которых происходит сопоставление одного с другим. Если в измерительной аудиосистеме шкалу кто-то снял либо не поставил, то велика ли вероятность достоверности суждений, опирающихся на такой «измерительный прибор»?

Если читатель внимательно изучает «АМ», то он может обратить внимание на состав эталонного тракта редакции этого журнала. В него, в частности, входит DAC-1 «Audio Note», имеющий, как и все остальные DAC'и этой фирмы, выходной каскад по схеме СРПП с выходным сопротивлением около 1 кОм и разделительный конденсатор емкостью 0,39 мкФ. На частоте 1 кГц этот конденсатор имеет реактивное



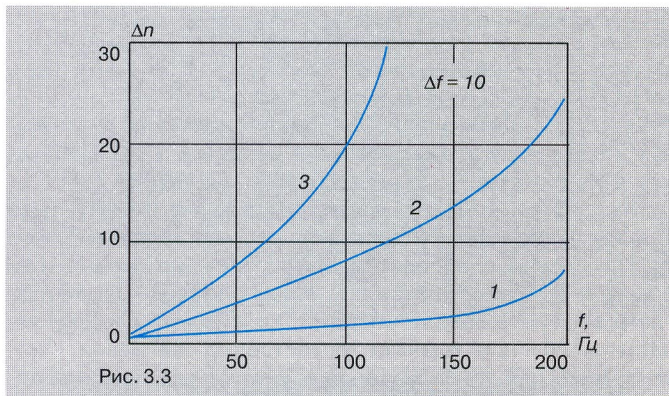


Рис. 3.3

сопротивление 408 Ом, добавляющееся к выходному сопротивлению каскада СРПП, на частоте 100 Гц — уже 4080 Ом, на частоте 20 Гц — аж 20400 Ом. Как именно влияет на создание гулко-баса такой большой и частотно-зависимый выходной импеданс, вы можете подробнее узнать из моей статьи в журнале «Hi-Fi & Music» №№10 и 11 за 1997 г. Бас станет пухлым, расплывчатым и увеличивающимся по амплитуде при щипке струны контрабаса. Именно такое явление и наблюдают эксперты «АМ», но ошибочно приписывают его только комнатным резонансам. Дальнейшая высокоимпедансная часть электрического тракта только усугубляет эту проблему. Аналогично обстоит дело и с усилителями мощности, а также «акустическими» и межблочными кабелями. Трагическое влияние на бас, как показали эксперименты в лаборатории «SAS», оказывают несовершенные CD транспорты и цифровая часть DAC'ов. В эталонный тракт «АМ» входят и усилители со сравнительно высоким импедансом, и кабели, и АС, неадекватно, как мне представляется, передающие низкие частоты. Все это в совокупности не позволяет правильно оценивать работу крупных низкочастотных АС (20...25 Гц; -2 дБ) в малых помещениях. Вердикт будет таков: гудят. Кто виноват? Маленькое помещение. Куда как лучше (да и дешевле) маленькие: не гудят. Правда, и баса не дают. А он, мол, никому и не нужен, т.к. никто в больших хоромах не живет, а в небольшой комнате... (см. «АМ» №1'96).

Размеры комнаты для прослушивания лаборатории «SAS» никак не тяготеют к хоромам. Поэтому искреннее удивление Вениамина Михайловича несопоставимостью того, что он видит тому, что он слышит, проявилось в словах:

— Этот бас действительно записан на CD, или «Миражи» его «доигрывают»?

Тут я сразу вспомнил, что «АМ» часто объяснял читателям, что внутренний слух может многое «доигрывать», когда система что-то «не играет». Вероятно, это так. Эксперты «АМ» чаще меня имеют дело с подобными системами. Поэтому я тоже искренне уверил В.М.Зуева в том, что в «Миражах» не спрятан «рояль в кустах», что они «играют» лишь то и с тем качеством, что и с каким качеством на них подают остальные аппараты, кабели и т.д. Итак, из сказанного следует мое предположение, что несовершенство эталонной системы редакции журнала «АМ» привело к добросовестному заблуждению в рекомендациях читателям, но не только.

Вернемся в формулам (3.1) и (3.2). В «АМ» № 1'96 утверждается, что вторая получена из первой, и результаты расчета отличаются не более чем на 5%. К сожалению, при $n_L = n_B = n_H = 1$ отличия составляют 11%. Для помещения по рис. 3.2 $f_1 = 76$ Гц (по 3.1) и $f_1 = 82$ Гц (по 3.2). Для лаборатории «SAS»: $f_1 = 93$ Гц (3.1) и $f_1 = 99$ Гц (3.2). Но не эта мелочь главное. В формуле (3.2) вместе с водой выплеснули и ребенка. Формула (3.1) дает следующие частоты, что и отображено на рис. 3.2:

для помещения 6 x 4 x 3,2 м: 28; 42; 51; 57; 69; 71; 76 Гц;

для лаборатории «SAS» 5,25 x 3,05 x 2,55 м: 32; 56; 64; 67; 74; 87; 93 Гц.

Поэтому утверждение «АМ», что по формуле (3.1) при $n_L = n_B = n_H = 1$ можно вычислить самый первый «наиболее мешающий» резонанс, не соответствует физике и математической модели помещения, рассматриваемого в волновой теории акустики. Самые первые резонансы — 28 и 32 Гц — для рассмотренных помещений, которые обусловлены тем, что n_L, n_B и n_H могут поочередно и в сочетаниях принимать нулевое значение, что специально отмечено в учебнике, на который ссылается В.М. Зуев. Как известно, философия начинается с сомнения. Если бы я не усомнился в рекомендациях «АМ», то многие, возможно, рассматривали бы их как истину в последней инстанции. И, безропотно идя за поводом, как на известной картине Питера Брейгеля, покупали бы мини-АС, DAC'и, надувающие бас, т.е. синтезирующие его искусственно, хлипкие кабели, по которым нельзя достойно транспортировать не только инфра-бас, но и средние частоты. «Отбросьте всякие сомнения, о вы, входящие сюда». Такова, по Данте, надпись над входом в Ад. Многим еще памятна и другая фраза-зазыв: «Верным путем идете, товарищи!». Если вы считаете мой путь ошибочным, то дальнейший текст вам читать еще вреднее — идите туда, куда ведут. Зачем задумываться?

Итак, к радости читателя, резонансные частоты даже небольших помещений достаточно низкие, чтобы не ограничивать себя малогабаритными АС, если абстрагироваться от коммерческих рекламных тестов. Но, к огорчению читателя, чуда не случится: загудеть могут и мини-АС (несмотря на то, что этого, якобы, не может быть никогда), если остальная часть аудиосистемы этому способствует. В дальнейшем будет показано, как этого избежать.

В лаборатории «SAS» нет компонентов, раздемпирующих бас в электрической части. Поэтому к АС от усилителей "Maestro Grosso" по соответствующим кабелям тоже собственной конструкции подводится хорошо контролируемый во всем звуковом и инфразвуковом диапазоне частот сигнал. В силу этого четкость и глубина баса, излучаемого АС, вызывает сочный, но четкий, а не размазанный отклик помещения. Здесь весьма уместна поговорка: «Как аукнется, так и откликнется!» Но при замене в тракте лаборатории усилителей «Maestro Grosso» на очень многие дорогие импортные аппараты гул имеет место быть, хотя низких басов почти нет. Правом ли и в этом случае обвинять «малое помещение»?

Волновая теория показывает, что плотность спектра Δn , т.е. количество собственных частот уменьшается при уменьшении объема помещения:

$$\Delta n = 4\pi V (f_n)^2 \frac{\Delta f_n}{(C_0)^3} \quad (3.3)$$

где V, m^3 — объем помещения;

f_n и Δf_n — центральная частота и ширина интервала, в пределах которого производится определение Δn .

На рис. 3.3 приведена зависимость количества собственных частот Δn от частоты сигнала f_n при $\Delta f_n = 10$ Гц для помещений объемом 26, 135 и 400 m^3 (соответственно кривые 1, 2, 3). Из рис. 3.3 видно, что только для очень маленьких помещений плотность спектра собственных частот мала, причем на самых низких частотах, что действительно свидетельствует о неравномерности звукового поля в них. Однако влияние этого явления на слуховые ощущения будет разным при вариациях положения источников звука и слушателя в помещении, а тем более изменении акустической обработки поверхностей. Существенную роль играет также тип излучателей АС. Эти три фактора тоже не учитывались в «АМ» №1'96 при выдаче рекомендаций читателям.

Только в исключительно низкочастотном электронном и электроакустическом тракте лаборатории «SAS» удалось de facto проверить степень влияния всех без исключения компонентов аудиосистем на качественные и количественные показатели звука. Причем даже без специальной обработки поверхностей помещения лаборатории. И все равно басы не гудят, как многими проверено. Ныне я заготовил материалы для акустической обработки, после осуществления которой смогу изложить читателям результаты новых экспериментов. А практика, как известно, является критерием истинности любой теории. Если, конечно, подтверждает теорию.

Давайте вместе подумаем, нет ли такой теории, которая объясняет реальные и легко повторяемые практические результаты, полученные в лаборатории «SAS».

Многие, конечно, двигали АС по комнате, да и сами где только ни садились, ни лежали, ни стояли. Лишь бы звук был! Правильно? Ох, как велико число сочетаний и перестановок! И в лаборатории «SAS» весь пол тоже размечен координатами «Миражей» и многих других АС после прослушивания акустики и прочих компонентов. Каждый эксперимент заслуживает отдельных повествований. Но о каждом компоненте придется говорить правду, ведь лаборатория «SAS» не коммерческая. Поэтому результаты тестирования в ней не покупаются, а лишь фиксируются. Вот доступный всем пример несовпадений результатов тестов усилителя «Orchestra By Jadis», проведенных в лаборатории «SAS» (Hi-Fi & Music № 10, 97, «АМ» № 4 (15)'97). С. Куниловский — отличный специалист. Он почти все отметил в конструкции. Почти. Упустил он из внимания, например, что детали просто приложены друг к другу, а выводы не загнуты, не зажаты и политы припоем. Полагаю, что на фирме «Jadis» читали рекомендацию «АМ», запрещающую круто изгибать выводы. Ученик превзошел учителя: фирма решила вообще не загибать выводы. Правда, заметный фон вызван не этой оригинальной особенностью монтажа. Чрезмерная длина и посредственное качество кабелей входных цепей тоже остались незамеченными. И совершенно правильно. Обращать внимание на такие мелочи бессмысленно, потому что тривиальная и архаичная схемотехника уровня 40-х годов не создает, увы, «золотых сечений» и пропорций чисел Фибоначчи между напряжениями и токами, а потому и звук лишен этих качеств. Я понимаю, как было трудно действительно хорошему эксперту найти дорогие его слуху достоинства в дешевом (\$1750) усилителе, да еще с транзистором на входе. Мне очень понравился крик души эксперта: «В первый раз я слышу у себя дома такой широкий динамический диапазон!» (Как жаль, что эксперту попадает на тестирование только посредственная техника!). Еще интереснее другая откровенность: «Это первый усилитель, которому удалось во многом переиграть мой эталонный усилитель». Так и хочется спросить: «А эталонный — уж не «Прибой» ли?» Может быть, стоит улучшить эталон и переделать его по А.М. Лихницкому? Уверен, что любой Jadis будет побит вчистую, а не по очкам. Если же восхищение эксперта усилителем «Jadis» «так искренне, так нежно», то один из московских владельцев этого усилителя (которому, т.е. усилителю, я ставил «голос» — адаптировал под конкретную систему) расстанется с Jadis без слез, но с вдохновением. Хотя результаты адаптации улучшили породу усилителя. Таким образом, удастся осчастливить сразу двоих людей. Но можно осчастливить и всех 30000 читателей «АМ», если в его эталонном тракте заменить Audio Note на Jadis. Гарантирую контр-Ватерлоо.

Как жаль, что после такого восхитительного, но эпатающего специалистов, резюме С. Куниловского, последнему разрешено редакцией ныне делать только вскрытие тел аппаратов. Труд эксперта оказался опаснее труда шахтера. Хорошо, если за риск достойно платят. Поэтому теперь в изысканном музыковедческом анализе можно найти интересную

рекомендацию: если вам не нравится работа усилителя, смените АС. Совершенно бесплатно согласен с этой рекомендацией. Меняйте непременно на Mirage, но лучше на Wilson Audio X-2 Grand SLAMM, после чего вы наконец услышите момент истины и вынужденно смените весь предшествующий им тракт. Вместо того, чтобы подглядывать через замочную скважину мини-АС, распахните настоящее окно звукам музыки. Вам сразу станут безразличны любые изыски в тестах АС. Если подобным образом вы поступите с остальными компонентами, то вообще перестанете читать журналы, в том числе и этот, а будете слушать, слушать, слушать..., слушать музыку.

Но пока приходится читать, как видите. Не подумайте, что я забыл, что мы пошли искать некую теорию. Просто многие читатели звонят в редакцию «Class A» и мне с просьбой писать еще доступнее, более развернуто и с практическими правдивыми (!) примерами. «Глас народа...». Если уж быть до конца правдивым, то следует заметить, что упомянутый усилитель блестящий. В том смысле, что все усилители «Jadis» хорошо блестят, наверное, хромированной сталью. Передняя накладная панель, анодированная под матовое золото, вероятно, подсказывает новым... российским покупателям, что это изделие именно для них. Остальные достоинства прекрасно описаны экспертом. Но есть два небольших недостатка. Мне попался какой-то журнал, где тоже в заключение указывают недостатки каждого тестируемого изделия. Там было так: большая цена, большой вес. У рассмотренного усилителя, как мне кажется в соответствии с концепцией «SAS», недостатки другие: маленькая цена, маленький вес. Впрочем, я не эксперт по должности, а поэтому, возможно, ошибаюсь в том, что следует говорить.

Небольшое, исключительно по просьбе читателей, гуманитарно-рекламное эссе закончено. Вернемся к нашим баранам.

Мы остановились на передвижении АС по комнате прослушивания и пересаживании собственно слушателя относительно АС. Не исключено, что вскоре появятся эксперты, которые за большие деньги будут ставить АС и сажать слушателей правильно. Я же совершенно бесплатно расскажу про этот действительно существующий математизированный способ посадки немного позже.

Если читатель помнит, то в разделе 1 («Class A» № 12, 1997) было замечено, и я обещал к этому вернуться, что не следует, по мнению Е.Скучика, пренебрегать влиянием ближнего поля на низких частотах, т.к. именно низкочастотные компоненты сигнала приводят к особенно сильному изменению в восприятии звуков музыки при вариациях расстояния до источника звука. Поскольку слуховой орган человека в некоторой степени реагирует на колебательную скорость частиц воздуха, то при этом возникает ощущение расстояния до КИЗ, т.е. ощущение глубины трехмерного пространства саундстейджа. В аудиосистемах, неспособных передавать низкий и четкий бас, саундстейдж может находиться близко или в удалении, но обычно плоский, хотя отдельные КИЗ в нем могут быть достаточно четко очерчены в плоскости за счет средних и высоких частот, что дает ясное и в меру прозрачное звучание, но лишает слушателя естественного пространственного ощущения, т.е. музыканты и их инструменты как бы висят в неопределенном свободном пространстве без стен и пола, что, вероятно, редко встречается в жизни.

В предыдущем номере журнала уже рассматривались термины «прозрачность» и «пространственное впечатление». Постараюсь освежить их в памяти читателя и по необходимости немного уточнить.

Прозрачность, ясность — различимость звуков отдельных инструментов или групп инструментов даже в присутствии отзвука помещения, т.е. реверберации.

Пространственное впечатление — осознанное ощущение соотношения между интенсивностью звука источника (КИЗ) и приходящих со всех направлений звуковых отражений от ограничивающих помещение поверхностей, т.е. снова отзвука помещения.

Реверберация — процесс затухания звука на месте прослушивания, отображающий размеры, форму, гулкость помещения. Процесс реверберации характеризуется временем стандартной реверберации T_{60} , определяемым как время после отключения звукового сигнала, за которое средняя плотность звуковой энергии \mathcal{E} в помещении уменьшается в миллион раз (уровень энергии уменьшается на 60 дБ) относительно своего установившегося значения.

Для небольших помещений и для частот ниже 4000 Гц время стандартной реверберации определяется формулой Эйринга для $\alpha_{ср.} > 0,2$:

$$T_{60} = \frac{0,164 V}{-S \ln(1-\alpha_{ср.})} = \frac{0,071}{-S \ln(1-\alpha_{ср.})} \quad (3.4)$$

где S — площадь поверхности, m^2 ;

$\alpha_{ср.}$ — в общем случае частотно-зависимый средний коэффициент звукопоглощения, характеризующий совокупные свойства различных материалов поверхностей помещения.

Коэффициент звукопоглощения показывает, какая часть звуковой энергии, переносимой звуковой волной, поглощается при падении этой волны на поверхность:

$$\mathcal{E}_{погл.} = \alpha_{ср.} \mathcal{E}_{пад.}; \alpha_{ср.} = \mathcal{E}_{погл.} / \mathcal{E}_{пад.} \quad (3.5)$$

Формула Эйринга относится уже к статистической теории акустики помещений и выведена в предположении, что звукопоглощающие материалы распределены по поверхности равномерно и имеют одинаковый коэффициент $\alpha_{ср.}$, что обеспечивает достаточную диффузность звукового поля в помещении. Диффузным называют такое звуковое поле, в котором выполняются условия однородности и изотропности: усредненная во времени плотность звуковой энергии во всех точках одинакова; все направления прихода звуковой энергии в любую точку помещения равновероятны, и по любому направлению усредненный поток звуковой энергии одинаков.

В реальных условиях небольшого помещения, когда источники звука (АС) неодинаково удалены от различных поверхностей, нельзя считать равной вероятность падения звуковых волн на различные участки поверхностей. Отражения волн от поверхностей приходят в точку прослушивания с разными временами задержки отзвука t_3 , на которые оказывают значительное влияние не только форма и размеры

помещения, но также наличие или отсутствие структурирования поверхности, особенно вблизи АС. Необходимость дифференцированного рассмотрения направления отдельных отражений с учетом их t_3 свидетельствует о вступлении в силу геометрической теории акустики помещений. Достоверность методов геометрической теории тем выше, чем меньше длина волны распространяющегося звука по сравнению с линейными размерами помещения:

$$c_0 / f = \lambda < \{L; B; H\} \quad (3.6)$$

Требование (3.6) совпадает с условиями обеспечения диффузного распространения и отражения звуковых волн в статистической теории: все линейные размеры помещения L, B и H должны быть больше длины волны λ_n самой низкой частоты сигнала:

$$\lambda_n < H / 3 \quad (3.7)$$

т.к. обычно $H < B < L$.

Очевидно, что традиционные комнаты прослушивания не удовлетворяют условиям (3.6) и (3.7), а потому применимость для них результатов статистической и геометрической теорий весьма затруднительна.

Спасибо диалектике, мы можем обратить недостатки малых помещений в достоинства. Именно тем, что находимся всегда в ближнем поле АС: для частоты 16 Гц ближнее поле простирается на 21 м, для 30 Гц — на 11 м, для 100 Гц — на 3,4 м. Необходимо, как видите, чтобы аудиосистема воспроизводила как можно более низкочастотный диапазон. Только тогда ваша маленькая комната как бы раздвинется, удлинится. Вам захочется закрыть глаза и уменьшить яркость освещения, чтобы глубина звуковой иллюзии не опережалась зримой действительностью. Осталось всего ничего: получить четкий, точный и потому комфортный звук. А заодно объяснить, почему на разных CD и LP по-разному записан бас и т.д. Вот мы и приблизились к той теории, которую искали. Собственно, я даже уверен, что все читатели-слушатели ее знают. Когда вы слушаете музыку при закрытой двери, ведущей из комнаты прослушивания в соседнее помещение, то звук имеет один характер, а при открытой двери — другой. Замечали? Конечно! Аналогично и с открыванием и закрыванием окна. Еще заметнее?

В теории акустики помещений такие помещения называются акустически связанными. Ваш собственный опыт показывает, что звук меняется и при изменении положения слушателя, например, когда вы выходите на кухню заварить чай для компании ваших гостей-слушателей. Какой на кухне энергичный бас! Почему же в комнате он не так хорош? На этот вопрос дотошный читатель найдет ответ самостоятельно.

А мы перейдем к другому. Можно ли считать студию, в которой, например, играет джазовое трио, и из которой через

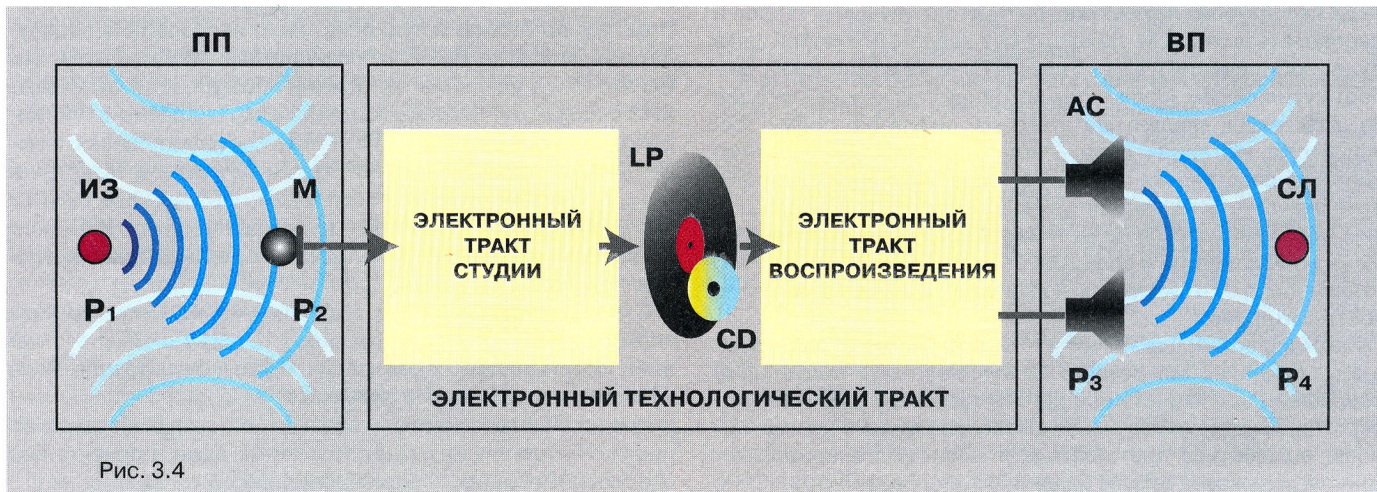


Рис. 3.4

микрофон и усилитель подается сигнал на АС, стоящие прямо в вашей комнате, считать помещением, также связанным с комнатой, как и кухня? Конечно, можно, только связь такая называется электроакустической. Кухня с комнатой прослушивания связаны через открытый дверной проем. Меньше дверь — меньше связь, больше дверь — больше связь. В случае «электро» + «акустической» связи роль двери играет «электро»: начиная от микрофона, кабелей, предусилителей, кабелей, усилителей, кабелей, АС. Если на этой «электродороге» встретятся еще пульт звукозаписи, магнитофоны и т.п., то это никак не увеличит размер «электродвери» на пути звука в вашу комнату прослушивания (вторичное помещение) из студии (первичное помещение). Следует учесть, что в состав «электро» входят еще плейер компакт-дисков, либо транспорт и DAC отдельно, предусилитель, усилитель мощности и все соединяющие их звуковые линии, то бишь кабели, интерконнекты, etc. Причем каждый (!) из перечисленных компонентов звукового тракта может оказать решающее (!) воздействие на качество электрического сигнала от микрофона, который имеет также конечное качество.

На рис. 3.4 схематически изображен канал звукопередачи из первичного помещения (ПП) во вторичное (ВП).

В первичном помещении источник звука ИЗ создает некоторое звуковое давление p_1 , которое воздействует на микрофон М. В точке расположения микрофона звуковая волна создает давление p_2 , поскольку отклик ПП тоже влияет на величину p_2 . Вы уже знаете, что такой отклик называют реверберацией. Форма и размер ПП, его акустическая обработка на разных частотах проявляют себя по разному. Поэтому давление p_2 содержит в себе семантическую и эстетическую информацию от действия p_1 ИЗ, а также некоторую дополнительную информацию об акустических свойствах ПП. Совокупный акустический сигнал p_2 воздействует на микрофон, от которого в виде электрического сигнала поступает в электронный технологический тракт. В студийном тракте сигнал записывается, затем переносится на носитель записи (CD или LP) и в таком законсервированном виде поступает в электронный тракт слушателя, где «консервы» закладывают в читающий аппарат и через АС создают во ВП звуковое давление p_3 , которое (в идеале) должно соответствовать звуковому давлению p_2 . В силу того, что ВП тоже обладает некоторыми инерционными и резонансными свойствами, происходит взаимодействие p_2 с акустическими конструкциями в объеме ВП, вследствие чего p_3 изменяется, приобретая значение p_4 в точке нахождения слушателя СЛ.

В случае акустически связанных помещений их связь правильнее назвать взаимосвязью, т.к. она имеет двусторонний характер. В случае электроакустической связи возможно только одностороннее влияние, т.е. ВП не может повлиять на ПП, в то время, как свойства первичного помещения будут влиять на качество звука во вторичном помещении — комнате прослушивания. Любой слушатель в этом убеждается, если слушает трансляцию оперного спектакля, либо запись, выполненную в маленькой студии.

Итак, логически показано, что процесс реверберации во вторичном помещении будет зависеть от акустических свойств как первичного, так и вторичного помещений. Рассмотрим сначала процессы нарастания и затухания звука только для одного помещения, не учитывая пока влияния второго.

Как известно, музыкальный сигнал представляет собой случайный процесс нерегулярной формы, непрерывно меняющийся во времени. В любом случае время нарастания и время спада какого-либо минимального семантического фрагмента музыкального сигнала имеют некоторое конечное значение. Между такими фрагментами существуют и

паузы различной длительности. В первичном помещении под воздействием таких звуковых фрагментов, создаваемых музыкальными инструментами, образуется первичное звуковое поле. Это поле также нарастает и спадает не мгновенно, но пропорционально времени нарастания и затухания звуков отдельных инструментов. Очевидно, что отзвуки от ограждающих поверхностей помещения взаимодействуют со звуками, вызвавшими их, но с некоторым запаздыванием, равным времени пробега звуковой волны до ограждающих поверхностей. При этом часть энергии звука поглощается на этих поверхностях.

Если ИЗ имеет акустическую мощность P_a , площадь поверхности помещения S , а коэффициент поглощения α_{cp} , то в стационарном режиме такой источник сможет создать плотность энергии $\epsilon_{ст.}$ (при непрерывном режиме работы):

$$\epsilon_{ст.} = 4 P_a / C_0 \alpha_{cp} S \quad (3.8)$$

Процесс нарастания звуковой энергии во времени описывается в виде:

$$\epsilon_n = \epsilon_{ст.} \left[1 - \exp \left(- \frac{\ln(1 - \alpha_{cp}) C_0 S t}{4 V} \right) \right] \quad (3.9)$$

Процесс затухания звуковой энергии во времени описывается в виде:

$$\epsilon_n = \epsilon_{ст.} \exp \left(- \frac{\ln(1 - \alpha_{cp}) C_0 S t}{4 V} \right) \quad (3.10)$$

Из (3.9) и (3.10) следует, что процесс нарастания и спада звуковой энергии в диффузном звуковом поле происходит по экспоненциальной кривой. Скорость нарастания и спада увеличивается пропорционально росту α_{cp} и отношения S / V . Поскольку S / V является функцией формы и размеров помещения, постольку и скорость нарастания и затухания звуковой энергии в помещении определяется этими факторами.

Прежде, чем появится отзвук помещения, в ближней зоне сначала будет слышен прямой звук от источника. Время, необходимое для того, чтобы прямой звук источника достиг слушателя, находящегося от него на расстоянии $l_{пр.}$:

$$t_{пр.} = l_{пр.} / C_0 \{5,9 \text{ мс}\} \quad (3.11)$$

Числовые значения в фигурных скобках здесь и далее приведены для помещения прослушивания лаборатории «SAS».

В силу действия так называемого «закона первой волны» направление прихода звука определяется звуковым сигналом, поступившим к слушателю раньше других. Вслед за прямым сигналом придут его ранние отражения. Однако правильная локализация КИЗ сохраняется даже в том случае, когда энергия отражений в 10 раз превышает энергию прямого звука, если время запаздывания этих отражений не превышает 30 мс, что уже рассматривалось в разделе «Некоторые свойства слуха». При большом среднем коэффициенте поглощения ($\alpha_{cp} > 0,5$) в прямой волне заключается до 60% всей энергии. Именно этот фактор обеспечивает четкость резких и энергичных звуков и прозрачность звучания музыки. Среднее время свободного пробега волны до ограничивающих поверхностей помещения по статистической теории является величиной, полученной из вероятностных рассуждений:

$$t_{cp.} = 4V / C_0 S \{6,4 \text{ мс}\} \quad (3.12)$$

и равной среднему интервалу времени между двумя последовательными отражениями звука.

Средняя длина свободного пробега волны до ограждающих поверхностей составляет:

$$I_{\text{ср.}} = t_{\text{ср.}} C_0 = 4V / S \{2,2 \text{ м}\} \quad (3.13)$$

Среднее число отражений за единицу времени:

$$n_{\text{ср.}} = 1/t_{\text{ср.}} = C_0 S / 4V \{156 \text{ шт./с}\} \quad (3.14)$$

Формулы (3.12), (3.13), (3.14) не противоречат результатам экспериментов. Числовой коэффициент 4 существенно зависит от гармоничности (в смысле чисел Фибоначчи) размеров помещения, т.е. его формы.

Если значение $\alpha_{\text{ср.}} \ll 0,5$ (например $\alpha_{\text{ср.}} = 0,05$), то громкость звуков в помещении в установившемся режиме возрастает за счет интенсивных отражений, но этот процесс установления может оказаться более медленным, чем темп даже быстрой музыки, что способно нарушить четкость ее восприятия.

Через некоторое время после включения источника звука время $t_{0,5}$ или плотность звуковой энергии в помещении $\epsilon_{0,5} \equiv TR$ достигнет значения половины общей плотности звуковой энергии, возможной в стационарном режиме ($L\epsilon_{0,5} = -3 \text{ дБ}$):

$$TR \equiv t_{0,5} = 0,69 t_{\text{ср.}} / \alpha_{\text{ср.}} = 2,76 V / C_0 S \alpha_{\text{ср.}} \{22 \text{ мс}\} \quad (3.15)$$

Автор этой формулы В. Йордан называет это время TR характеризующим качество звучания музыки в студиях и залах. Фактически оно определяет соотношение энергий — прямой и отраженной от ограждающих поверхностей помещения.

Итак, мы вплотную приблизились к определению времени нарастания t_n звуковой энергии в помещении. Очевидно, что оно может быть получено из совместного рассмотрения формул (3.8) и (3.10). Но рассмотрим сначала рис. 3.5.

На рис. 3.5.а показан звуковой импульс, создаваемый источником звука. Этот импульс — прямой сигнал. Он начинается в момент t_1 и заканчивается в момент t_2 , имея максимальную плотность энергии $\epsilon_{\text{пр.}}$. Помещение вносит свой отзвук, и общая плотность энергии $\epsilon_{\text{общ.}}$ изменяется в соот-

ветствии с формулой (3.9) (рис.3.5б) от момента t_1 в течение времени нарастания t_n , пока $\epsilon_{\text{общ.}}$ не достигнет значения $0,9$ от $\epsilon_{\text{ст.}}$, определяемого из выражения (3.8).

Рис. 3.5 в отображает тот же процесс, но только в логарифмическом масштабе по оси ординат, т.е. в уровнях плотности энергии. Отличие $\epsilon_{\text{ст.}}$ от $0,9\epsilon_{\text{ст.}}$ составляет около $0,5 \text{ дБ}$, что не превышает порога чувствительности слуха (1 дБ) к изменению громкости. Поэтому традиционное определение времени нарастания импульса на уровне $0,9$ от максимального применимо и для времени нарастания t_n плотности звуковой энергии на уровне $0,9 \epsilon_{\text{ст.}}$, что не противоречит порогу слухового ощущения и составит при $d = 0,9 \epsilon_{\text{ст.}} / \epsilon_{\text{ст.}} = 0,9$:

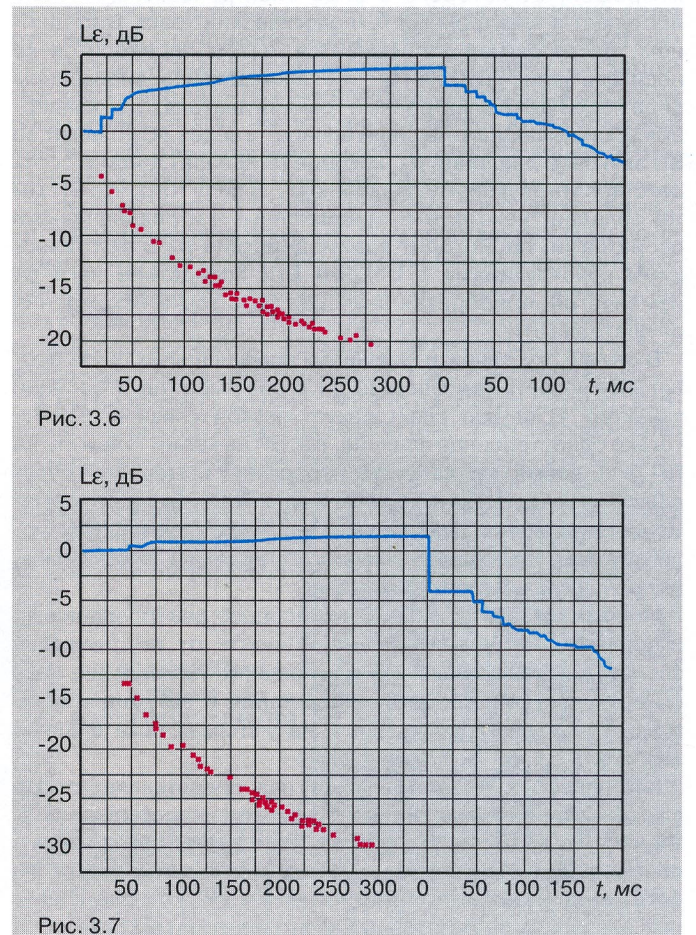
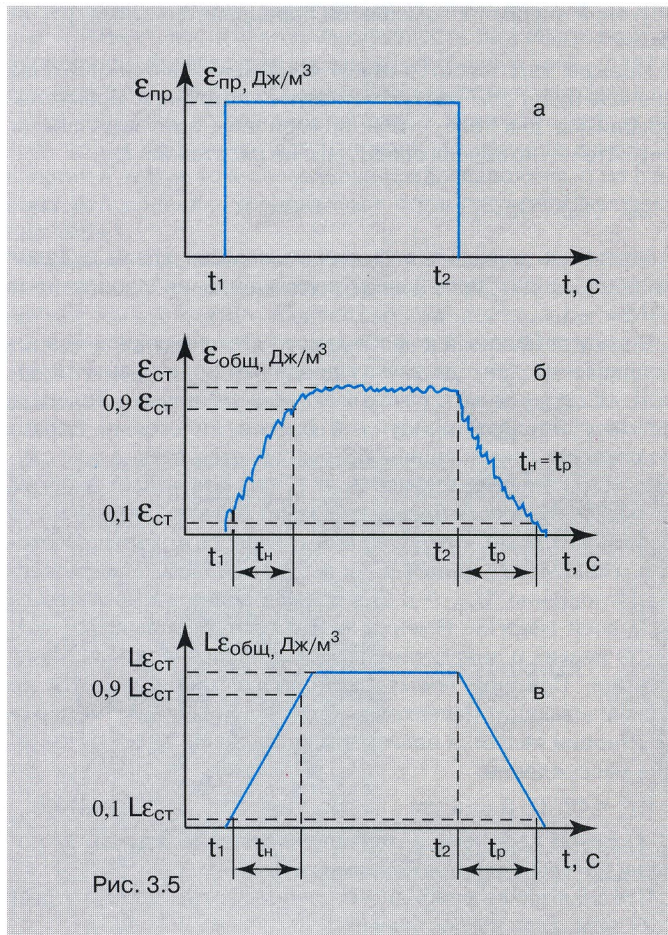
$$t_n = \frac{4V \ln(1 - d)}{C_0 S \ln(1 - \alpha_{\text{ср.}})} = 9,21 \frac{V}{C_0 S [-\ln(1 - \alpha_{\text{ср.}})]} \{66 \text{ мс}\} \quad (3.16)$$

Процесс затухания звуковой энергии (3.6) в помещении после прекращения в момент t_2 действия звукового импульса происходит также по экспоненциальной кривой (рис. 3.5.б) и длится в течение времени t_p , которое называется временем реверберации или отзвука. Определяется t_p по аналогии с t_n , но при $d = 0,1 \epsilon_{\text{ст.}} / \epsilon_{\text{ст.}} = 0,1$, т.е. на уровне $0,1$ от $\epsilon_{\text{ст.}}$:

$$t_p = \frac{4V \ln d}{C_0 S \ln(1 - \alpha_{\text{ср.}})} = 9,21 \frac{V}{C_0 S [-\ln(1 - \alpha_{\text{ср.}})]} \{66 \text{ мс}\} \quad (3.17)$$

В случае действительно диффузного звукового поля все описанные процессы нарастания и затухания звуковой энергии происходят по экспоненциальной кривой. Формула Эйринга (3.4) является частным случаем (3.17).

Практические наблюдения за процессами нарастания и затухания звуковых импульсов различной длительности представлены на рис. 3.6...3.8. Из рис. 3.6 и 3.7 видно, что



очень длинные импульсы (350 мс) и нарастают, и спадают далеко не по экспоненте. Особенно это заметно на процессе затухания, когда в первые 10...30 мс происходит резкий спад уровня: на 5 и 13 дБ в зависимости от удаления от источника звука. Аналогичное явление наблюдается и для импульса длительностью 50 мс. Очевидно, что в пределах начального участка реверберационного процесса нет идеальной изотропности звукового поля, поэтому иногда подобное явление называют нестационарной диффузностью. Позднее в работах А.Н. Качеровича было показано, что полная диффузность на начальном этапе реверберации вообще недостижима.

Радует то, что это и не требуется. Даже наоборот, необходимо некоторое преобладание прямого звука для правильной локализации КИЗ, а также выделения слухом ранних боковых отражений, определяющих пространственность звучания, чего не произойдет, если выполнить установку АС по ранее упомянутым рекомендациям «АМ». Исследования нестационарной диффузности приводят поэтому к необходимости привлечения методов геометрической теории акустики помещений.

Теперь вполне можно вернуться к самому интересному — электроакустически связанным помещениям (рис. 3.4). Очевидно, что через микрофон все (в идеале) акустические процессы нарастания и затухания звука в первичном помещении попадают на АС во вторичном помещении. Если считать электронный технологический тракт идеальным, то из АС должен быть воспроизведен сигнал p_3 , тождественный сигналу p_1 . Очевидно также, что реакция на действие сигнала p_3 на вторичное помещение будет происходить в соответствии с теми же закономерностями, которые уже нами рассмотрены, т.е. сигнал p_1 прежде, чем поступит к слушателю в виде p_4 , дважды претерпевает процессы нарастания и затухания.

В формулах (3.9) и (3.10) можно для удобства дальнейшего рассмотрения выделить показатель затухания звуковой энергии в единицу времени:

$$\delta = \ln(1 - \alpha_{cp}) \cdot C_0 S / 4V, [c^{-1}] \quad (3.18)$$

Процесс затухания плотности энергии во вторичном помещении будет осуществляться в виде:

$$\epsilon_{32}(t) = [\epsilon_{ст.2} / (\delta_2 - \delta_1)] [\delta_2 \exp(-\delta_1 t) - \delta_1 \exp(-\delta_2 t)] \quad (3.19)$$

где индексы «1» относятся к первичному, а индексы «2» — ко вторичному помещению, т.е. для (3.19): $\delta_1; S_1; V_1; \alpha_{cp.1}; \delta_2; S_2; V_2; \alpha_{cp.2}$ соответственно.

На рис. 3.9 показаны процессы затухания звуковой энергии во вторичном помещении, если звуковой импульс создан в нем без участия электронного тракта, т.е. без влияния первичного помещения (кривая 1). На том же рисунке показана кривая 2, отображающая процесс затухания звуковой энер-

гии во вторичном помещении с учетом влияния первичного, т.е. по формуле (3.19), когда звуковой импульс передается из ПП по идеальному электронному тракту. Обе кривые нормированы: $\epsilon_{32}(t) / \epsilon_{ст.2}$. Наибольшее отклонение (-3 дБ) кривых происходит на начальном участке до $1,5 \delta t$. Слух воспринимает это в виде увеличения времени результирующей реверберации за счет дополнительной задержки звука во вторичном помещении.

Итак, затухание звука во ВП определяется акустическими свойствами обоих электроакустически связанных помещений. Процесс затухания не отображается экспоненциальной кривой. В логарифмическом масштабе (рис. 3.10) результирующая кривая затухания 3 отзвука во ВП всегда расположена выше каждой кривой, отображающей процессы затухания в первичном (1) и вторичном (2) помещениях.

На рис. 3.10 показан случай, когда $T_{60(1)} < T_{60(2)}$ $\delta_1 > \delta_2$. В этом случае избыточная реверберация $T_{60(1)}$ во ВП может существенно исказить звук, поступающий из ПП. Такой случай имеет место в спортзале, в котором играет громкая музыка.

Для традиционных малых помещений обычно соблюдаются соотношения $\delta_2 > \delta_1$ и $T_{60(2)} < T_{60(1)}$, что обеспечивает преобладание прямой энергии на начальном участке реверберационного процесса. Это способствует четкости и ясности звуков музыки. Но при этом может нарушиться пространственное впечатление из-за того, что и прямая энергия, и реверберационные отклики ПП будут слышны только из зоны, находящейся за АС, но не будут поддержаны отзвуками ВП вокруг слушателя, что многим хорошо известно из практики.

Возвратимся к рис. 3.6...3.8, хорошо коррелирующим со слуховым опытом: влияние в начальном периоде реверберационного процесса прямой энергии источника звука обнару-

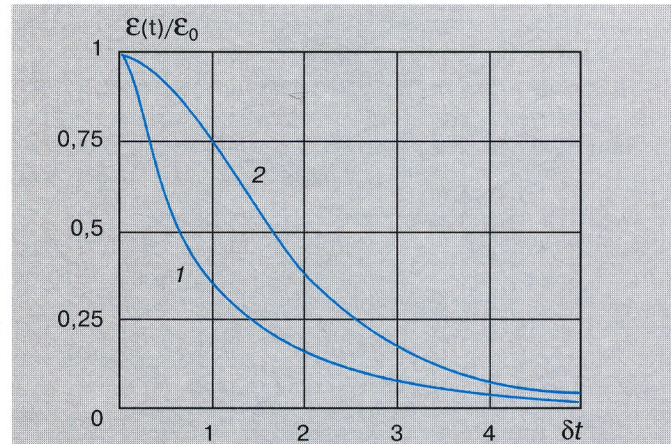


Рис. 3.9

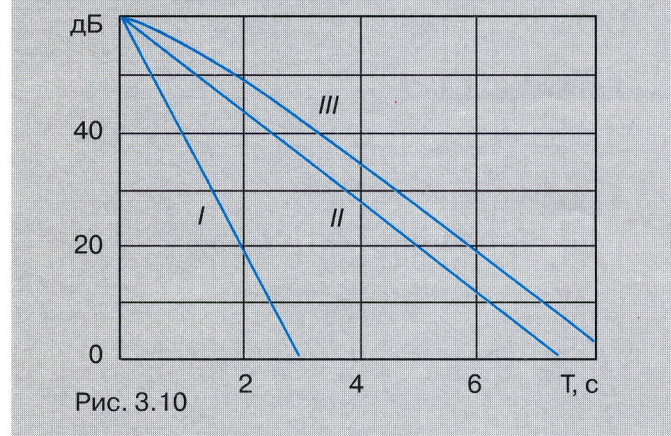


Рис. 3.10

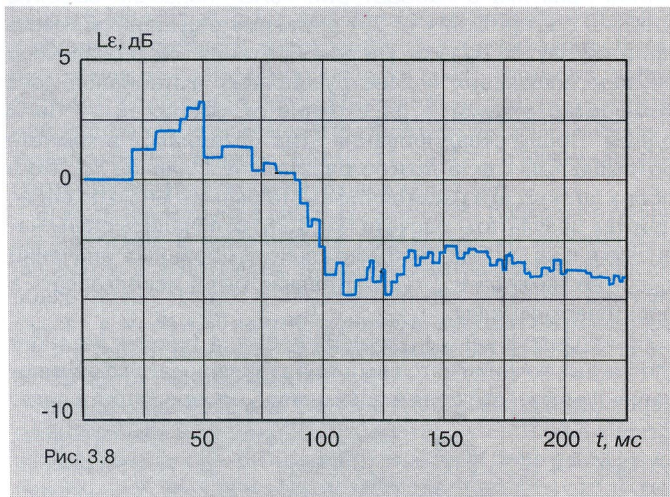


Рис. 3.8

живается слухом в виде расхождения восприятия реверберации с ее стандартным значением. Это особенно наглядно видно на рис. 3.7. Субъективно воспринимаемая реверберация носит название эквивалентной реверберации $T_{\text{экв.}}$. В академических учебниках она рассматривается с привлечением понятия акустического отношения R , введенного В.В. Фурдуевым:

$$R = \frac{\epsilon_{\text{отр.}}}{\epsilon_{\text{пр.}}} = \frac{16 \pi r^2}{S} \frac{1 - \alpha_{\text{ср.}}}{\alpha_{\text{ср.}}} = 306 r^2 T_{60} \frac{1 - \alpha_{\text{ср.}}}{V} \quad (3.20)$$

где $\epsilon_{\text{отр.}}$ и $\epsilon_{\text{пр.}}$ — соответственно плотности энергий отраженного и прямого звука, Дж/м³;

r — расстояние от источника звука до слушателя, м; остальные обозначения уже применялись ранее.

На рис. 3.11 показана зависимость R от объема помещения (кинотеатра) для первого (3), среднего (2) и последнего (1) рядов. Видно, что при уменьшении объема помещения R растет, несмотря на то, что расстояние до источника звука для всех трех случаев становится меньше. Это свидетельствует о том, что диффузная энергия $\epsilon_{\text{отр.}}$ при уменьшении объема помещения растет значительно быстрее, чем прямая энергия $\epsilon_{\text{пр.}}$.

С учетом (3.20) выражение для эквивалентной реверберации выглядит так:

$$T_{\text{экв.}} = 1,2 T_{60} / [1,2 + T_{60} \lg[(1 + R)/R]] \quad (3.21)$$

При $R > 3$ отличие $T_{\text{экв.}}$ от T_{60} незначительно.

Для связанных помещений результирующая эквивалентная реверберация определяется по эмпирической формуле М.А.Сапожкова:

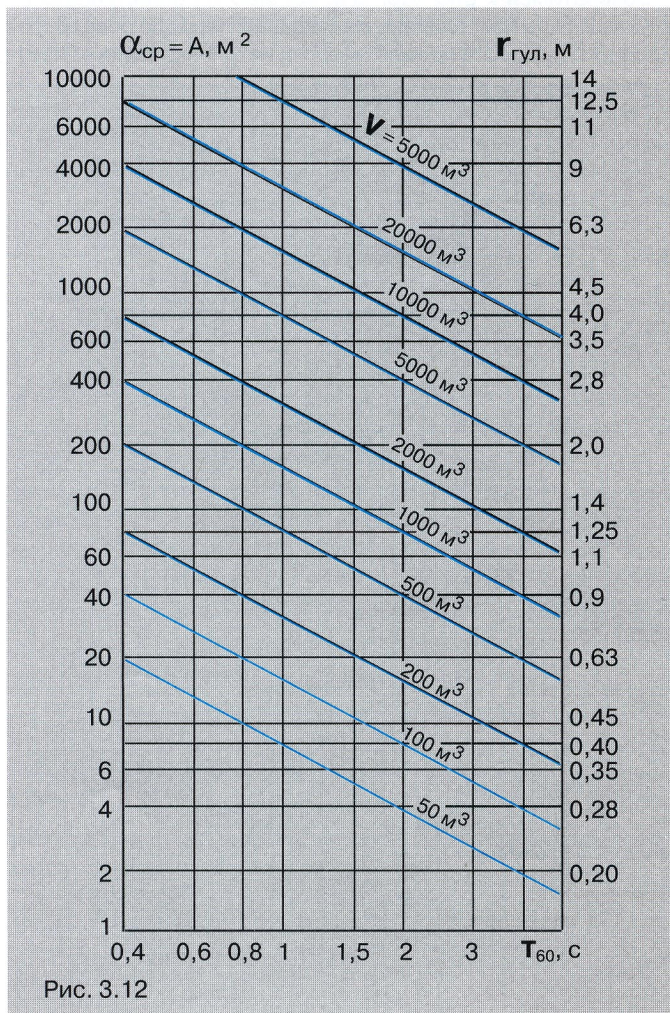


Рис. 3.12

$$(T_{\text{р.экв.}})^{5/2} = (T_{1\text{экв.}})^{5/2} + (T_{2\text{экв.}})^{5/2} \quad (3.22)$$

где индексы «1» и «2» относятся к значениям реверберации соответственно ПП и ВП. Поскольку, слушая музыку, записанную в различных условиях, мы не знаем $T_{1\text{экв.}}$, то можно ориентироваться лишь на типовые значения времени реверберации для студий и концертных залов.

Плотность прямой энергии при ненаправленном источнике звука определяется в виде:

$$\epsilon_{\text{пр.}} = P_a / 4\pi r^2 C_0 \quad (3.23)$$

где P_a — акустическая мощность источника, Вт.

Плотность отраженной энергии

$$\epsilon_{\text{отр.}} = 4P_a (1 - \alpha_{\text{ср.}}) / C_0 \alpha_{\text{ср.}} S \quad (3.24)$$

Если решить (3.23) и (3.24) совместно и относительно r , то окажется, что на некотором расстоянии $r = r_{\text{гул.}}$ прямая и диффузная энергии $\epsilon_{\text{пр.}} = \epsilon_{\text{диф.}}$. Это расстояние называют радиусом гулкосты:

$$r_{\text{гул.}} = \sqrt{\frac{\alpha_{\text{ср.}} S}{16 \pi}} = \sqrt{\frac{0,164 V / T_{60}}{16 \pi}} = 0,057 \sqrt{\frac{V}{T_{60}}} \{0,58 \text{ м}\} \quad (3.25)$$

На рис. 3.12 показана номограмма для определения тенденции изменения $r_{\text{гул.}}$ для различных объемов помещений V и видов звукопоглощения $\alpha_{\text{ср.}}$.

Формулы (3.23) и (3.25) выведены в предположении применимости для этого статистической теории акустики помещений. Однако такое предположение приводит на практике к существенным ошибкам, поскольку сам логический принцип четкого проведения границы между прямой и отраженной энергиями в диффузном (!) поле невозможен. Или это поле не диффузно. Вероятно, поэтому $r_{\text{гул.}}$ используется преимущественно в учебных изданиях.

Для практического применения рекомендуется формула (3.26), определяющая расстояние $r_{\text{диф.}}$ от источника звука, на котором начинается преобладание отраженной энергии:

$$r_{\text{диф.}} = 0,35 \sqrt{\frac{\alpha_{\text{ср.}} S}{1 - \alpha_{\text{ср.}}}} \{1,52 \text{ м}\} \quad (3.26)$$

На этом расстоянии при полной диффузности отраженного звука уровень звукового давления должен оставаться постоянным, а при неполной диффузности — может меняться в разных зонах помещения. По формуле (3.26) можно более точно судить о выполнении условия применимости методов статистической теории реверберации, нежели по (3.25).

Моя практика в лаборатории «SAS» показала высокую степень соответствия (3.26) слуховым ощущениям и восприятию звуков музыки. До приобретения мною различных звукопоглощающих и конструкционных материалов зона комфортного звука — расстояние от «Миражей» — было одним. После складирования этих материалов в комнате оптимальным стало другое расстояние. Главное то, что в обоих случаях эти расстояния выставлялись мною по слуху, причем результаты расчета по (3.26) отличались очень незначительно от экспериментально выбранных значений $r_{\text{диф.}}$, но никогда $r_{\text{гул.}}$ (3.25) нельзя было использовать в практических целях.

По исследованиям Л.Кремера время, в течение которого (после выключения источника звука) завершается формирование диффузного поля в помещении, определяется в виде:

$$t_{\text{диф.}} \approx 2 \cdot 10^{-3} \sqrt{V} \{12,8 \text{ мс}\} \quad (3.27)$$

За время $t_{\text{диф}}$ звуковые волны отражаются столько раз, что на интервал времени длительностью 10 мс приходится не менее 20 отражений. Значение $t_{\text{диф}}$, как мне представляется, хорошо коррелирует со временем $TR \equiv t_{0,5}$ (3.15), которое тоже характеризует временную границу между прямой и диффузной энергиями. За время 12 мс в лаборатории «SAS» наблюдаются по крайней мере две группы ранних отражений от потолка, которые увеличивают так называемый индекс ясности C_{80} . Положение АС, выбранное по слуху, хорошо коррелирует по этому времени с $r_{\text{диф}}$. Потолочные отражения не увеличивают пространственного впечатления, но и не оказывают маскирующего действия на отражения от боковых стен, первые две группы отражений от которых в лаборатории «SAS» доходит до места прослушивания за 9 мс, т.е. немного раньше потолочных, и поэтому не маскируются ими, благоприятствуя богатому пространственному эффекту, поскольку приходят с направлений максимальной чувствительности ушей слушателя ($\pm 120^\circ$ относительно нормали к слушателю). Все эти эффекты изменяются при изменении положения АС с различной скоростью. Существуют эффекты, пороговое значение слухового восприятия которых при перемещении АС составляет 0,5 см; есть эффекты, порог слухового ощущения которых составляет 2...5 см; встречаются эффекты и с еще более грубым порогом порядка 20...40 см.

Если бы Миражи в лаборатории «SAS» были бы установлены параллельно длинной стене по упомянутым рекомендациям «АМ», то, во-первых, «умерли» бы все боковые отражения и саундстейдж стал бы вырожденно плоским; во-вторых, не были бы оптимальны отражения от потолка, в результате чего, кстати, усугубилась бы проблема с возвышением базисного уровня расположения саундстейджа (для этого есть и иные причины); в-третьих, невозможно было бы одновременно обеспечить оптимальное значение $r_{\text{диф}}$ и расстояния от АС до стены позади них, а также от слушателя до тыльной стены; в-четвертых, возникло бы дисгармоничное, не соответствующее реальности ощущение басового регистра: размеры саундстейджа по басу не соответствовали бы таковым по средним и высоким частотам, что привело бы к гипертрофии КИЗ барабанов, литавр и чрезмерному размыванию их по фронту, в то время как остальные инструменты казались бы непропорционально малыми в сравнении с ними, продолжая быть плоскими.

В отличие от экспертов «АМ», я не собираюсь абсолютизировать указанные результаты экспериментов в лаборатории «SAS» и возводить их в ранг рекомендаций, т.к. мы работаем с принципиально разными АС и, что особенно важно, разными электронными трактами. АС «Migage-M1» весьма удачно имитируют пульсирующую сферу от самых низких до самых высоких частот, что недоступно другим типам АС (даже более дешевые «Миражи», а потому менее низкочастотные и уже не биполярные на низких частотах, не способны столь же качественно передать пространство и энергию басового регистра музыки). Широкополосность всех элементов аудиосистемы, особенно в басовой области — это, если хотите, мой второй «категорический императив». Первый изложен в журнале «Hi-Fi & Music», №№10, 11, 1996 г., и называется он «категорический энергетический императив».

Электронный тракт в лаборатории «SAS» благодаря обоим императивам и высочайшей разрешающей способности (вследствие этого) всех его компонентов не раз успешно обнаруживал «блеск и нищету» многих изделий, стоящих высоко в мировом рейтинге рекомендуемых компонентов. То, что терпит бумага во многих конкретных изданиях, часто оказывается нетерпимо для слуха.

Как и декларировалось в начале этого цикла статей, я лишь предоставляю информацию лаборатории «SAS», не настаивая на безоговорочной ее применимости в любых других условиях, поскольку при убогом качестве электронного тракта

и т.д. мои выводы никогда не смогут быть проверены путем повторения моих экспериментов. Однако это, конечно, всегда возможно в лаборатории «SAS».

Я не излагаю особенностей интроспективных аудиоэкспертиз — процессов ощущений, восприятий и эвристического анализа, посредством которых проводится оптимизация акустических свойств лаборатории и оценка качества привнесенных в тракт и собственных электронных компонентов, т.к. многим читателям этот процесс кажется вообще надуманным, занудным и позерским. Что ж, до изобретения микроскопа многие не верили, что у них во рту в любой момент времени можно обнаружить миллионы живых существ.

Мое изложение не религиозная догма, но я отсылаю терпеливого читателя к вводной части цикла, где обозначены цель и метод концепции «SAS» на уровне известных мне сегодня теоретических и практических знаний. Я пишу свои статьи в режиме реального времени без стилистической правки, без попытки академизации. Пусть тот, кто сможет, сделает и скажет лучше. Постараюсь выполнить все данные в этой и предыдущих частях цикла обещания и исчерпывающе обо всем написать. В нужное время.

Юрий Макаров

(продолжение следует)

P.S. Многие читатели интересуются продолжением моей статьи в журнале «Вестник А.Р.А.» №2, 1997 г. («Опыты и метаморфозы аудиодизайна») и судьбой статьи «Трансцендентная функция саундстейджа» («Hi-Fi & Music», №2, 1997 г.). Последняя должна выйти в феврале, хотя сначала планировалась на декабрь прошлого года. В ней вы сможете проследить дальнейшую судьбу моей хайэндной кисы Мары, попавшей в Храм Хайэндных Дискуссий. Фотограф запечатлел ее в тот момент, когда она туда спешила, закончив помогать мне в очередном интроспективном погружении в бессознательное, в процессе которого мне удалось выйти на солитонной волне в ноосферу и войти в контакт с бессознательным К.Г. Юнга и Сальвадора Дали. Диалоги с К.Г. Юнгом позволили мне написать указанную репортажную статью, а художнику редакции по эскизам С. Дали — визуализировать процедуру нашей встречи. Работа художника — длительный эвристический процесс, это вам не статью написать.

Предыдущие хайэндные похождения и рассуждения Мары под псевдонимом «Alter Ego» запечатлены в «Вестнике А.Р.А.», поскольку ни один другой прогрессивный журнал не взялся тогда печатать кошкины мысли. Очень они пушистые, даже скорее, топорщащиеся до колкости. А у рекламодателей такая нежная шкурка, пардон, кожа. Они, как и кошки, лобяют, когда глядят по шерсти. Очень нервничают, когда против. Поэтому киса Мара — наш первый диссидент — возможно, будет писать для иностранной прессы. Недавно она долго лежала на словаре Мюллера — расширяет словарный запас (эта ее способность описана в «Опытах»...).

По-прежнему, нет пророка...

В предыдущих частях цикла допущены опечатки:

№ 12, 1997

с. 27, левая колонка, 14 строка снизу: «Для плоской волны Z_0 равно его модулю Z_0 », следует читать «Для плоской волны Z_0 равно его модулю Z_0 »; с. 28, формула (1,9): $\varepsilon = I / \rho_0 C_0$ [Дж/м³], следует читать $\varepsilon = I / \rho_0 C_0^2$ [Дж/м³].

№ 1, 1998

с. 25, левая колонка, 25 строка снизу: «1 Гц», следует читать «1 кГц»;

с. 26, рис. 2.9: «Влияние запаздывающего повторения сигнала на локализацию виртуального источника звука», следует читать «Колебание, полученное в результате сложения двух гармоник: а) при совпадении начальных фаз; б) при смещении начальных фаз на 180° »;

с. 29, 11 строка сверху: «(L)», следует читать «(ΔL)».

АКУСТИЧЕСКИЕ СИСТЕМЫ НА ДИНАМИЧЕСКИХ ГОЛОВКАХ ФИРМЫ VIFA

В этой статье я попытаюсь поделиться опытом по расчету и изготовлению недорогих АС, для повторения которых в домашних условиях не потребуются высокой квалификации и сложных измерительных приборов.

Я остановил свой выбор на головках фирмы VIFA потому, что на мой взгляд ее изделия имеют наилучшее соотношение цена/качество. Я приобрел комплект головок по случаю, так как не знаю ни одной российской компании, которая бы торговала продукцией фирмы VIFA. В АС используются динамики с параметрами, указанными в таблице 1.

Как показывает практика, реальные параметры F_s , Q_{ts} , V_{as} могут существенно отличаться от указанных в паспорте или каталогах фирм-изготовителей. Это связано как с технологическим разбросом, так и с изменением параметров в процессе эксплуатации.

Поэтому целесообразно до начала расчетов акустического оформления НЧ-головок провести их тренировку. Для тренировки понадобятся простейший звуковой генератор и любой усилитель мощности. Подключив головку к усилителю, подайте на его вход сигнал от генератора частотой $15 \div 20$ Гц такой величины, чтобы амплитуда колебаний диффузора была максимальной, но при этом не должно быть слышно призвуков. Тренировку желательно проводить не менее 30 часов. В процессе тренировки, как правило, снижается резонансная частота.



Таблица 1

Наименование параметра	Обозначение	НЧ-СЧ M18WO-09-04	B4D27-TG-06
Номинальный импеданс, Ом	Z	4,0	6,0
Сопrotивление звуковой катушки, Ом	R_e	3,15	4,6
Индуктивность звуковой катушки, мГн	L_e	0,2	—
Номинальная мощность, Вт	P_{nom}	70	100
Чувствительность, (1Вт, 1м) дБ	Sens	87,5	90
Эффективная площадь диффузора, см ²	S_d	132	7,1
Подвижная масса, г	M_s	17,5	0,3
Ход диффузора, мм	X_{max}	4,0	—
Резонансная частота без акустического оформления, Гц	F_s	35,5	650
Эквивалентный объем, л	V_{as}	28,5	0,014
Механическая добротность	Q_{ms}	—	0,95
Электрическая добротность	Q_{es}	—	0,77
Общая добротность	Q_{ts}	—	0,43

Таблица 2

№	F_s Гц	V_{as} л	Q_{ms}	Q_{es}	Q_{ts}	V_b л	F3 Гц	Fb Гц
1	35,5	29,4	6,6	0,280	0,269	7,33	66,5	47,7
2	34,9	30,0	5,6	0,280	0,268	7,21	66,0	48,0
3	34,6	29,5	6,6	0,305	0,283	8,94	59,5	44,0
4	34,8	30,0	6,2	0,283	0,271	7,47	65,4	47,4

Таблица 3

Q_{ts}	V_b	F_b	$F3$	V_b/V_{as}	F_b/F_s	$F3/F_s$
0,29	9,01	44,7	60,6	0,303	1,277	1,73
0,30	9,78	43,4	58,3	0,326	1,240	1,66
0,31	10,60	42,1	56,2	0,353	1,202	1,60
0,32	11,70	41,0	53,6	0,390	1,171	1,53
0,33	12,70	39,9	51,1	0,423	1,140	1,46
0,34	14,34	38,8	48,7	0,478	1,108	1,39
0,35	15,80	37,9	46,5	0,526	1,082	1,32

В моем распоряжении было четыре экземпляра головок, прошедших 30-часовую тренировку. После тренировки были измерены их параметры и с помощью компьютерной программы Bass Vox 5.1 рассчитаны параметры фазоинверсного акустического оформления для каждого экземпляра. Результаты измерения и расчета сведены в таблицу 2.

В таблице 2 используются следующие обозначения:

V_b - объем ящика ,

$F3$ - частота среза амплитудно-частотной характеристики АС на низких частотах по уровню -3 дБ,

F_b - частота настройки фазоинвертора.

Приведенные в таблице данные показывают, что общая добротность Q_{ts} головок не позволяет получить $F3$ ниже 60 Гц, в то время как для приемлемого воспроизведения низких частот требуется значение $F3$ порядка 50 Гц. Для снижения $F3$ требуется увеличение Q_{ts} . Поэтому следующий этап проектирования АС состоит в определении такой величины Q_{ts} , при которой $F3$ не будет превышать 50 Гц. С помощью программы Bass Vox 5.1 было рассчитано несколько вариантов фазоинверторов для ряда значений Q_{ts} . Для расчета была принята добротность ящика $Ql = 7$ (определяется суммарными потерями в корпусе АС, тоннеле фазоинвертора и головке). Результаты расчета сведены в таблицу 3, в которой приведены данные для головки №1 и данные в относительных единицах, которые можно использовать для головок с другими значениями параметров.

Для практической реализации был выбран вариант фазоинвертора, соответствующий $Q_{ts}=0,34$ с объемом ящика $V_b= 14,34$ л, частотой настройки $F_b=38,8$ Гц и частотой среза $F3= 48,7$ Гц.

Увеличение общей добротности головки достигается очень просто путем включения резистора последовательно с ее звуковой катушкой. Это приводит к некоторому уменьшению чувствительности АС, что не является слишком большой ценой за расширение частотного диапазона в сторону низких частот.

Величину дополнительного резистора, необходимого для увеличения общей добротности, можно рассчитать по формуле (справедлива при условии, что суммарная величина выходного сопротивления усилителя и сопротивления колоночного кабеля не превышает 0,15 Ом):

$$R = R_e \frac{Q_{ts} Q_{ms}}{(Q_{ms} - Q_{ts}) Q_{es}} - 1$$

где

Q_{ts} - требуемое значение общей добротности,

R_e — сопротивление звуковой катушки постоянному току,

Q_{ms} — механическая добротность,

Q_{es} — электрическая добротность.

Для головок №1 и №2 величины дополнительных резисторов, рассчитанные по этой формуле, составляют соответственно 0,88 Ом и 0,91 Ом. Резисторы, увеличивающие добротности динамиков, на практике будут состоять из двух частей: омического сопротивления катушки индуктивности, входящей в состав разделительного фильтра, и включенного последовательно дополнительного резистора. В фильтре изготовленных мною АС сопротивление катушки индуктивности постоянному току составляет 0,6 Ом, дополнительный резистор имеет величину 0,3 Ом*.

Корпуса АС, разделенные перегородкой на две части, изготовлены из мебельной ДСП толщиной 16 мм. Верхний отсек служит акустическим оформлением головок, в нижнем размещается фильтр. Объем акустического оформления несколько больше расчетного с учетом объема, занимаемого головками, рейками для крепления передней и задних панелей и распорки. Эскизы корпуса приведены на рис. 4.

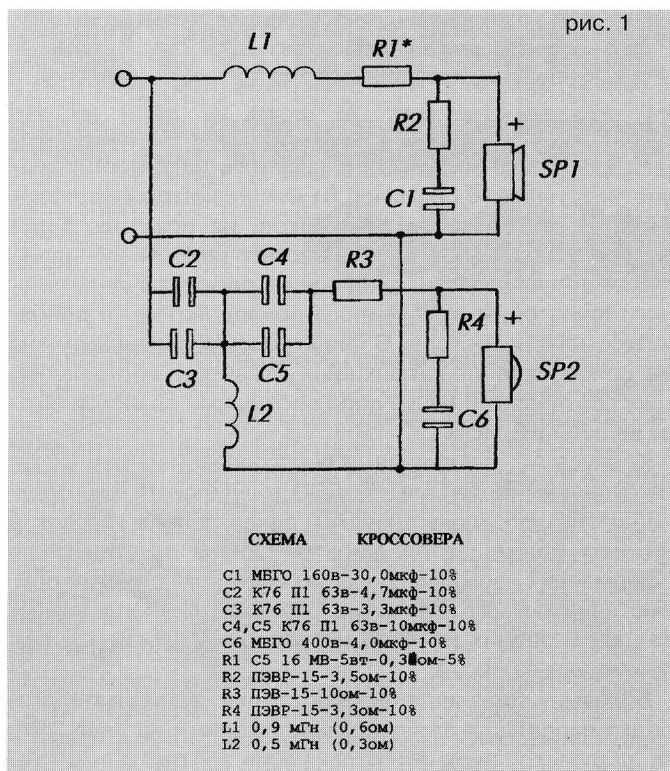
Боковые, верхняя и нижняя стенки, а также перегородка скреплены деревянными нагелями на клею ПВА. По периметру верхнего отсека и по вертикальным сторонам нижнего приклеены рейки сечением 20 x 20 мм. Между боковыми стенками в середине верхнего отсека вклеена распорка. Передняя панель с отверстиями для крепления головок и трубы фазоинвертора приклеена к рейкам полиуретановым герметиком. Задняя панель верхнего отсека съемная. Она крепится к рейкам шурупами через уплотнение из плотного полиуретана. Задняя панель нижнего отсека, на которой укреплена чашка с клеммами для подключения кабеля, крепится аналогичным образом, но без уплотнения.

Труба фазоинвертора длиной 140 мм, внутренним диаметром 50 мм и толщиной стенок 5 мм склеена из бумаги. Она плотно вставлена в отверстие передней панели. Место стыка трубы и панели промазано полиуретановым герметиком. Внутренние поверхности верхнего отсека оклеены синтетическим мехом с длиной ворса 15 мм. В перегородке между отсеками установлены 4 латунных винта М4 длиной 30 мм. Каждый винт крепит через шайбы по два лепестка, расположенные по разные стороны перегородки. К лепесткам, находящимся внутри верхнего отсека, припаяны провода от головок. Лепестки, выходящие в нижний отсек, используются для соединения с фильтром.

После сборки корпуса и установки головок была проверена частота настройки фазоинвертора. Для этого была определена зависимость модуля полного входного сопротивления НЧ-головки от частоты.

Частота настройки фазоинвертора 38 Гц соответствует минимуму кривой между горбами, полное сопротивление на этой частоте не должно (без дополнительного резистора) превышать 5,3 Ом. Если модуль полного сопротивления на частоте настройки фазоинвертора превышает 5,3 Ом, следует принять меры по повышению герметичности акустического оформления.

*При работе АС совместно с усилителем, имеющим отличную от усилителя автора статьи величину выходного сопротивления, и другим типом кабеля, для получения гладкой АЧХ НЧ головки потребуется подбор номинала дополнительного резистора — прим. редакции



При проверке АЧХ НЧ-звена по звуковому давлению был обнаружен выброс величиной приблизительно 5 дБ на частоте 1,6 кГц. Выброс на АЧХ удалось устранить с помощью куска плотной ткани, перегораживающего по середине объем акустического оформления. Ткань закреплена на боковых стенках тонкими рейками и приклеена к распорке. Край ткани, обращенный к передней панели корпуса АС, свободно лежит на НЧ-головке.

Принципиальная электрическая схема фильтра показана на рис. 1. Для компенсации увеличения модуля комплексного сопротивления головок с ростом частоты параллельно их звуковым катушкам подключены RC-цепочки. Резистор R3 служит для выравнивания чувствительности головок.

Для ВЧ-головки применен фильтр третьего порядка с частотой среза 3 кГц. Фильтр третьего порядка хорошо защищает ВЧ-головку от перегрузки низкочастотными

сигналами. При выбранной частоте среза он обеспечивает совместно с ВЧ-головкой спад АЧХ АС, по звуковому давлению близкий к 18 дБ, на октаву почти до частоты 800 Гц. На более низких частотах спад становится круче в результате уменьшения отдачи самой ВЧ-головки. НЧ-головка обладает существенным спадом АЧХ на частотах выше 3 кГц, который в области совместной работы головок АС является определяющим.

Для НЧ-головки применен фильтр первого порядка, для которого по критерию минимальной неравномерности АЧХ по звуковому давлению экспериментальным путем была подобрана величина индуктивности 0,9 мГн.

На рис. 2 показана АЧХ по звуковому давлению изготовленной АС, снятая в комнате площадью 18 м² с высотой потолков 2,5 м. Зависимость величины модуля полного сопротивления АС от частоты показана на рис. 3.

При прослушивании самодельной АС мною было отмечено ее заметное превосходство в качестве воспроизведения музыкальных программ (особенно классической музыки) по сравнению с АС R-515 фирмы Sound Dynamics.

Литература.

Class A, ноябрь 1997, сс. 24-30

Виноградова Э.Л. Конструирование громкоговорителей со сглаженными частотными характеристиками. М., «Энергия», 1978.

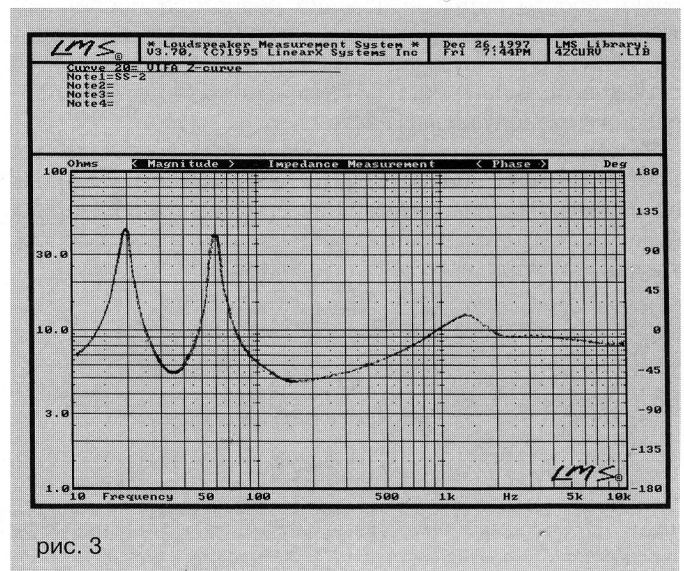
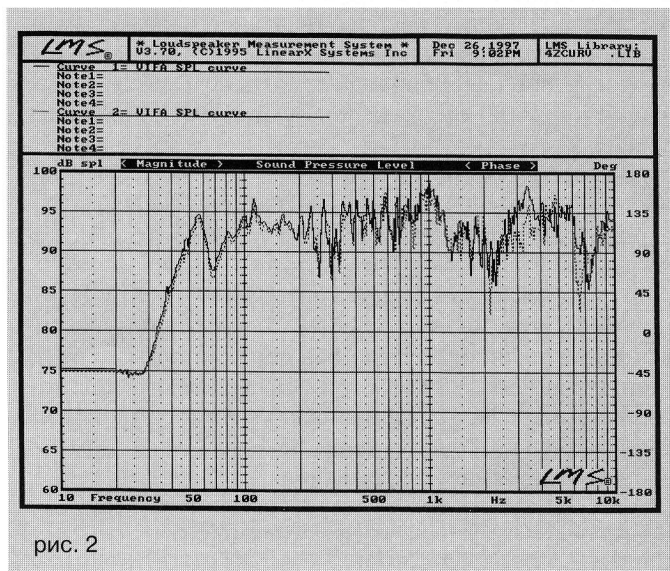
Dickason V. The loudspeaker design cookbook. Audio Amateur Press.

Сергей Бать

От редакции.

К сожалению, у нас не было возможности провести корректную экспертизу качества звучания предлагаемых самодельных АС. В ближайшее время такая экспертиза будет проведена. О ее результатах вы сможете узнать в одном из ближайших номеров журнала.

Что касается используемых динамических головок, то в случае заинтересованности читателей мы можем оказать содействие в их приобретении.



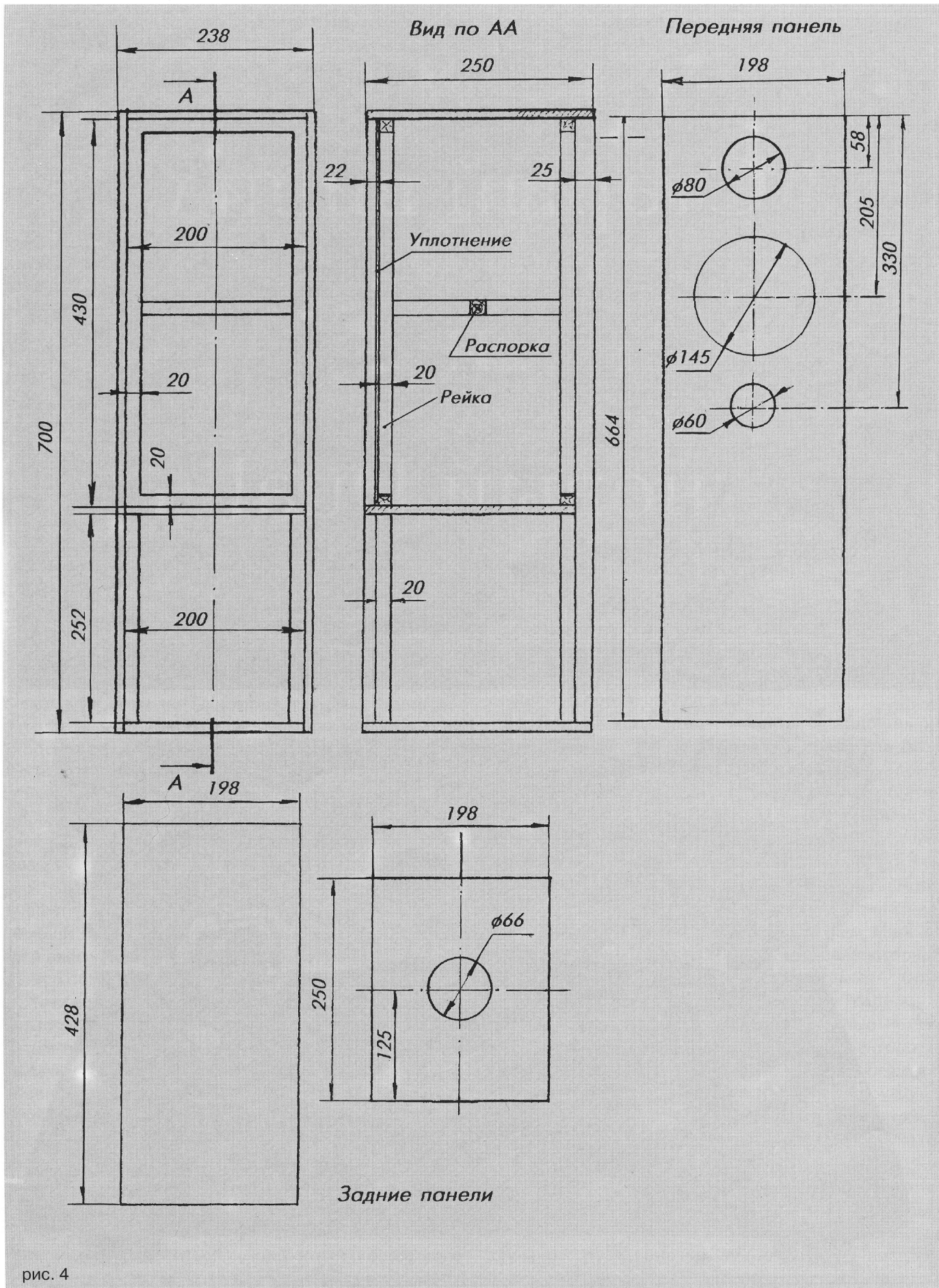


рис. 4