

ЯНВАРЬ

1998

CASSA

Hi-Fi, High End AUDIO

HIGH END
встречается с
HOME THEATER
в салоне
"КОЛИЗЕУМ"

...А ВОТ ЭТО-
ПРАВИЛЬНО !



РАЗМЫШЛЕНИЯ О КОНШЕЛТУАЛЬНОМ
И РЕАЛЬНОМ

РАЗМЫШЛЕНИЯ О КОНЦЕПТУАЛЬНОМ И РЕАЛЬНОМ (продолжение)

Как ранее было отмечено, орган слуха имеет 24 критические полоски, определяющие дискретную избирательность слуха и его разрешающую способность по частоте. И если среднее число ощущаемых градаций по частоте около 150, то максимальное может доходить до 620 при высокой интенсивности звука.

При уровне звукового давления $L_p = 70$ дБ на частотах менее 500 Гц слышны отклонения частоты тона на 1,8 Гц; выше же 500 Гц слышны отклонения порядка 0,35% от частоты тона. Частота тона является параметром раздражения органа слуха. Субъективным параметром ощущения частоты тона является высота тона. До частот 500 - 1000 Гц изменения частоты тона (раздражение) и высоты тона (ощущение) описываются логарифмическим зако-

ном, выше частоты 500 - 1000 Гц связь раздражения и ощущения все более отличается от логарифмической зависимости (см. Рис. 2.5). За единицу высоты тона как параметра ощущения выбран «мел». Тон частотой 131 Гц (нота «до» малой октавы) имеет высоту тона $z = 131$ мел. Более крупной величиной измерения высоты тона принят «барк»: 1 барк = 100 мел.

Из Рис. 2.5 следует, что между высотой тона и двадцатью четырьмя критическими полосками (правая шкала) существует тесная связь. Увеличению частоты на одну критическую полоску соответствует возрастание высоты тона на один барк.

Звуковое раздражение передается на базилярную мембрану, имеющую длину 32 мм. Вдоль мембранны в кортиевом органе в четыре ряда располагаются связующие волокна по 3500 в каждом. Раздражение тоном определенной частоты вызывает возбуждение некоторых волокон. При малых уровнях воздействия число возбуждаемых волокон меньше, при больших — больше. При изменении частоты тона изменяется локализация максимального возбуждения на базилярной мембране. На Рис. 2.6 показано соотношение и расположение различных шкал относительно протяженности базилярной мембранны.

1. Основная (базилярная) мембрана, мм
2. Число осязающих волокон в ряду, шт.
3. Число допустимых градаций высоты тона, шт.
4. Частота, Гц
5. Высота тона, мел
6. Высота тона, барк (число и нумерация критических полосок).

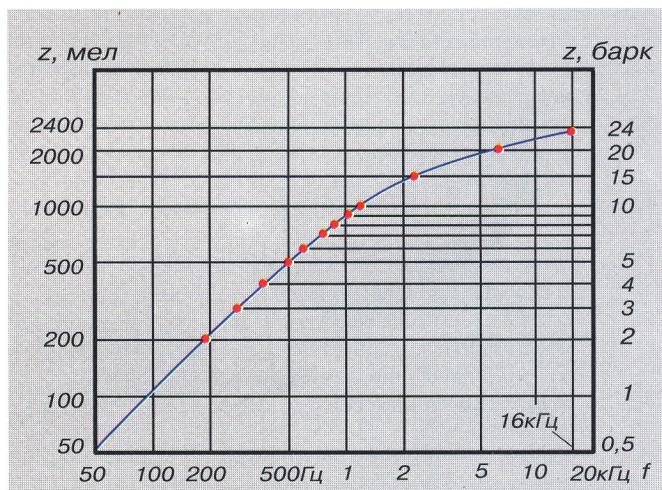
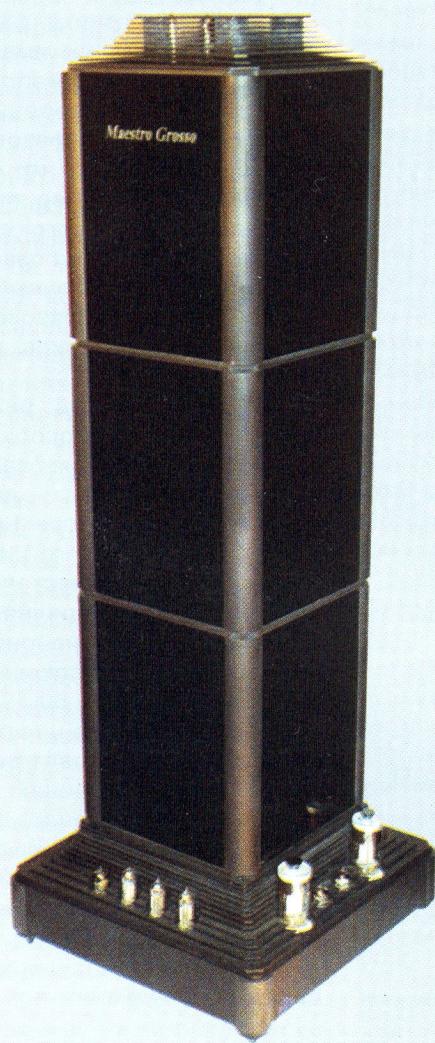


Рис. 2.5. Высота тона и шкала частотных групп (критических полосок) в зависимости от частоты

На Рис. 2.7 показана зависимость уровня возбуждения L_E на базилярной мембране при воздействии узкополосного шума со средней частотой 1 кГц и уровнем $L_{\text{Ш}}$. Из Рис. 2.7 следует, что сигнал другой частоты, обеспечивающий на несколько децибел меньший уровень возбуждения базилярной мембранны, не будет услышан. Это явление называется эффектом маскировки. Причем низкие тоны сильнее маскируют высокие, нежели наоборот. Громкие высокие тоны не маскируют низкие тоны даже малого уровня. Плавный спад кривых порога маскировки с повышением частоты имеет практическое значение: высокий тон, который при малой громкости отчетливо слышен одновременно с низким тоном, может оказаться полностью замаскирован низким тоном, если громкость увеличена чрезмерно, что следует, например, из Рис. 2.7. При $L_{\text{Ш}} = 100$ дБ почти все критические полоски выше восьмой «загружены» маскирующим сигналом, для преодоления эффекта воздействия которого на волокна базилярной мембранны потребуется такой уровень, который не свойственен натуральным звукам в высокочастотной области. Тонкие серебристые звуки треугольника, тарелок потеряют свою прозрачность и долгую непрерывную протяженность затухания отзвуков во времени. Разумеется, на Рис. 2.7 показано действие шума со средней частотой 1 Гц, что не равнозначно музыкальной программе, но тенденции и эффекты маскировки сохраняются при любых типах сигналов.

Это вторая причина (после увеличения субъективных гармоник), по которой громкие звуки не обязательно сопровождаются качественным звуком. Те, кому удавалось слушать музыку ночью (по необходимости тихо) в системе с эффективным и широким басовым регистром, несомненно уже оценили тонкость звуковых нюансов, теряемых при громком дневном прослушивании. Отсюда вытекает еще один вывод: следует понижать уровень шумов в помещении от любых внешних источников, чтобы звуки с уровнем громкости 30 дБ (пиано-пианиссимо, см. табл. 2.1, «СА» №12, 1997) не маскировались шумами. Тогда и форте-фортиссимо (100 дБ) может быть реализован на таких уровнях громкости без лишних проблем с соседями, чувствительностью АС, мощностью усилителей (прозрачный намек на ненужность «больших» мощностей).

Из Рис. 2.7 следует также, что два звука маскируют друг друга тем сильнее, чем ближе их основные частоты,

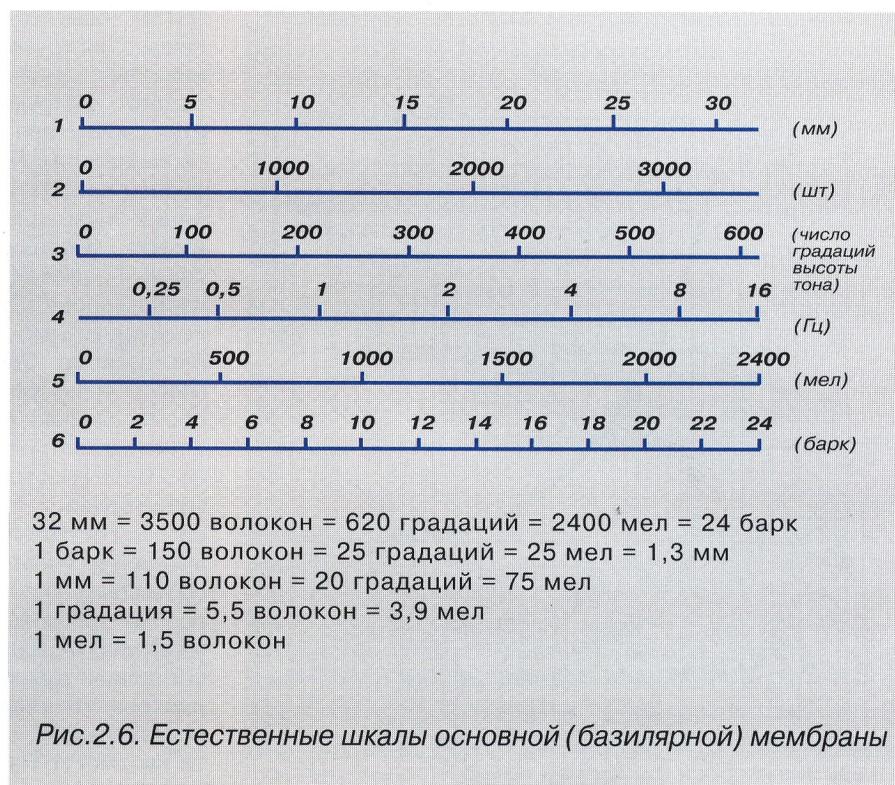


Рис.2.6. Естественные шкалы основной (базилярной) мембранны

например, в случае взятия одинаковых нот на разных инструментах. Слух различает в этом случае каждый инструмент раздельно лишь по признакам характерной окраски звука каждого инструмента (тембру), хранящимся в долговременной звуковой памяти сл�шателя. Полифоническая музыка звучит четче, прозрачнее при уровнях громкости 60...70 дБ, а при более высоких

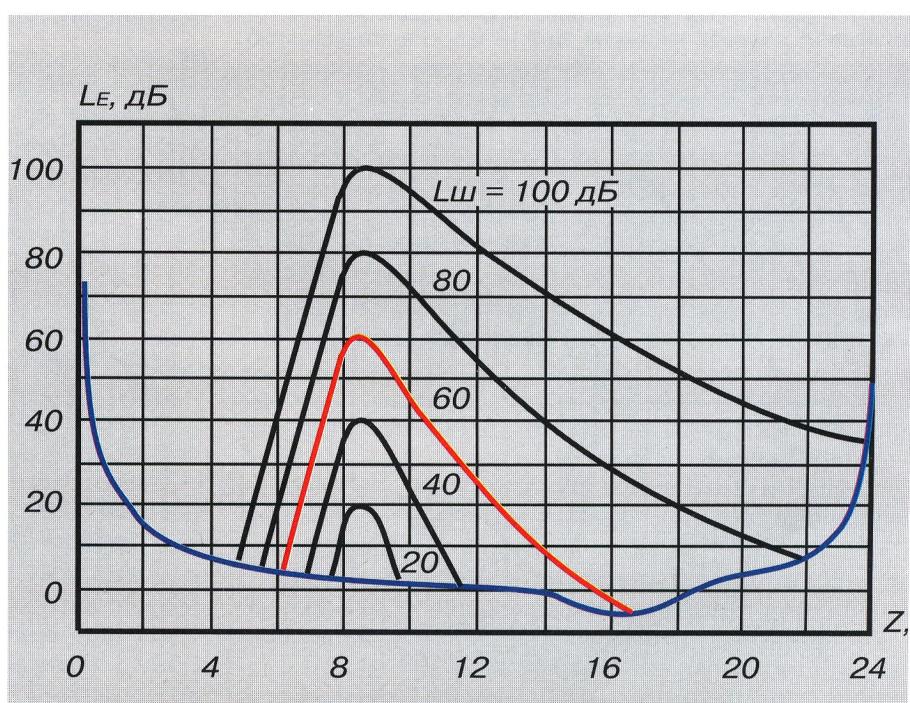


Рис.2.7. Зависимость уровня возбуждения L_E на базилярной мембрани от уровня шума $L_{\text{Ш}}$ со средней частотой 1 кГц

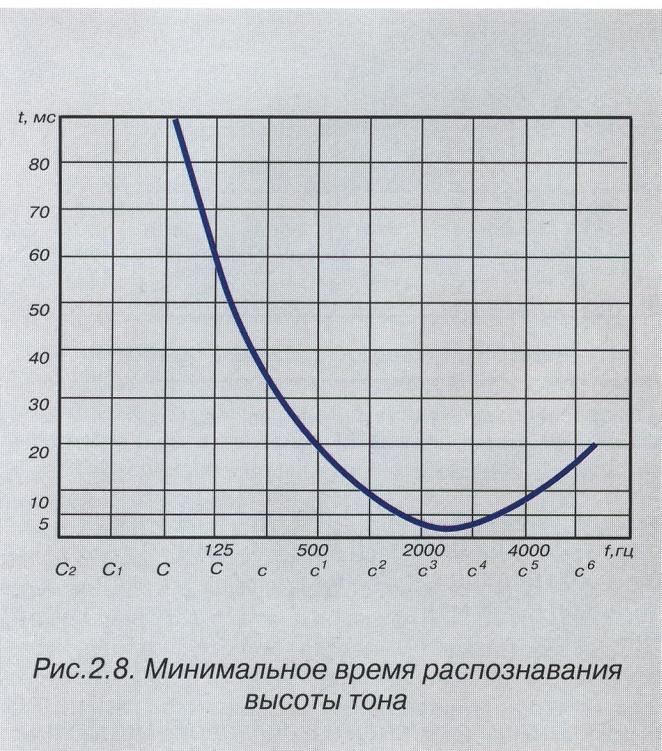


Рис.2.8. Минимальное время распознавания высоты тона

уровнях теряется разборчивость, четкость восприятия инструментов в ансамбле.

Кроме того, при уровне сигнала 100 дБ вторая и третья субъективные гармоники достигают уровней 85 и 70 дБ соответственно. Это делает музыкальный сигнал более «жестким», «грязным», агрессивным. Хотя слушателям некоторых психологических типов это может нравиться. Эволюция музыкальных вкусов и предпочтений, от грубого дотонкого, — это вопрос времени, менталитета, среды обитания, а также качественных параметров аудиосистем.

Итак, было отмечено, что слух дифференцирует различные инструменты при одновременном исполнении на них даже одинаковых нот по специфическим признакам каждого инструмента, называемых тембром. Тембр является субъективной характеристикой качества и сложности воспринимаемых звучаний, не имеет количественной оценки и характеризуется терминами качественного порядка. Музыкальные звуки, в отличие от чистых тонов, имеют, как правило, много компонент. Совокупность частотных составляющих с разными амплитудами, свойственных тому или иному инструменту, называют спектральными составляющими или спектром звука инструмента. Особенности спектров различных инструментов весьма важны, но будут подробнее рассмотрены позже. Сейчас же нас интересует процесс восприятия слухом высоты и тембра сложного (музыкального) сигнала. Ранее мы рассмотрели восприятие высоты звука применительно к чистым тонам. Высота звука сложного сигнала определяется самой низкой частотой, присутствующей в сигнале. Даже в случае преобладания в сигнале высоких частот существует всегда сравнительно медленный (низкочастотный) процесс изменения значений их амплитуд, называемый огибающей высокочастотного сигнала, который и будет восприниматься слухом в виде низкочастотного сигнала на фоне высокочастотных составляющих, которые даже при большой интенсивности не смогут маскировать низкочастотную компоненту малой интенсивности, как было определено ранее.

Различия в тембрах определяются преимущественно низко- и среднечастотными составляющими звучаний инструментов. Большое разнообразие и богатство тембров связано с сигналами, лежащими в нижней части частотного диапазона, тем более, что в музыке основные тоны выше 1 кГц используются редко. Итак, названы еще две причины (из трех обещанных) важности расширения басового диапазона.

Как было отмечено ранее при рассмотрении изофон, чувствительность слуха на разных частотах неодинакова,

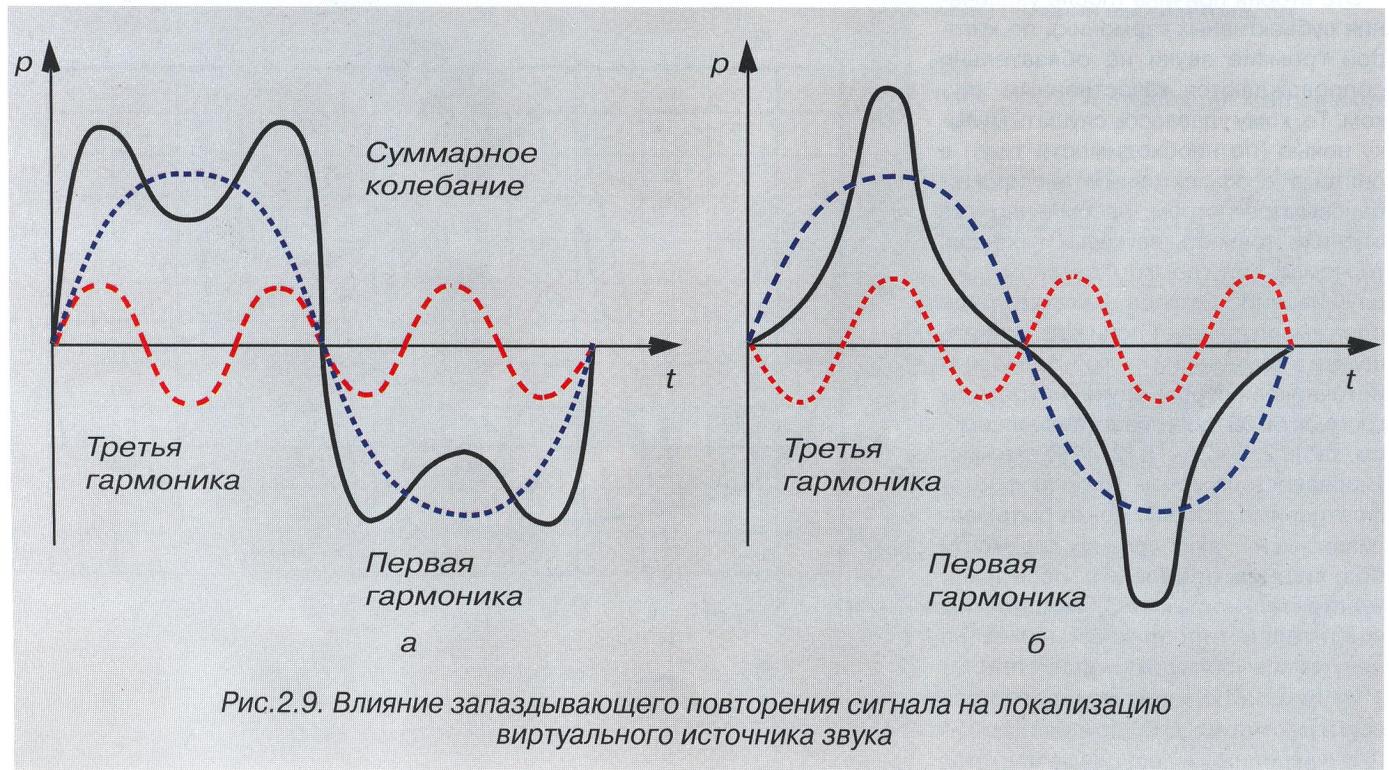


Рис.2.9. Влияние запаздывающего повторения сигнала на локализацию виртуального источника звука

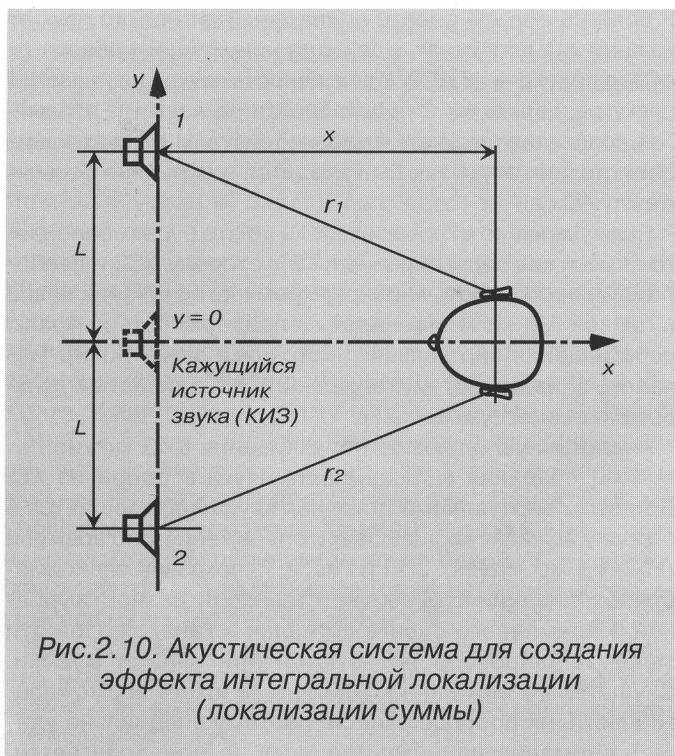


Рис.2.10. Акустическая система для создания эффекта интегральной локализации (локализации суммы)

что порождает изменение тембра звучания натуральных инструментов при изменении громкости звучания. Чем выше уровень громкости, тем лучше восприятие низко- и высокочастотных составляющих. Это, казалось бы, радостное явление хорошо до тех пор, пока не превышается естественный уровень громкости звучания натуральных инструментов и голосов. Регулятор громкости обеспечивает слушателю свободный доступ к изменению фактически не только тонального, но потому отчасти и музыкального баланса, определяемого композитором и исполнителем. Поэтому правильный выбор уровня громкости музыкальной программы в комнате прослушивания требует некоторых знаний и навыков, а также накладывает весьма сложные требования на все компоненты аудиосистемы.

Чтобы закончить рассмотрение особенностей частотных свойств слуха, необходимо упомянуть также гипотезу о том, что частоты ниже 50, 60 или 100 Гц (отличаются в разных источниках) воспринимается лишь по субъективным гармоникам. Однако вне зависимости от механизма ощущений и восприятий человек способен услышать частоты от 16 Гц до 20 кГц. В моей лаборатории SAS прекрасно слышны различия в характере звучания усилителей с нижней граничной частотой 10 Гц, 5 Гц, 1,5 Гц, 0,5 Гц (по уровню -3 дБ). Превосходно слышно также, если широкая полоса пропускания усилителя в области низких частот обеспечивается посредством отрицательной обратной связи (ООС). При сравнении, например, 130-ваттного усилителя в режиме 1% от максимальной выходной мощности с 3...6-ватными усилителями. Качественный проигрыш по динамическим параметрам и разрешающей способности 130-ваттного усилителя с глубиной ООС -6 дБ и частотой среза 1,5 Гц (-3 дБ) в сравнении с «Maestro Grosso» (ООС 0 дБ; частота среза < 0,5 Гц по уровню -3 дБ; 6 Вт) просто катастрофичен, что некоторые посетители выставки «Российский High End-1997» могли услышать при прослушиваниях «не для всех». Хотя по

традиционным критериям упомянутый 130-ваттный усилитель является профессионально сделанным весьма хорошим аппаратом. Но об усилителях состоится особый разговор — позже.

Еще одним свойством слуха являются его временные и фазовые характеристики, обусловленные наличием инертных масс и гибкостей в устройстве органа слуха, расположенных на пути звукового раздражения, прежде чем оно достигнет базилярной мембранны и превратится в ощущение, а затем в восприятие. При мгновенном исчезновении звукового раздражения слуховое ощущение исчезает не сразу, а постепенно уменьшается со скоростью около 10 фон за 150...300 мс. Этот эффект называют слуховым впечатлением, а время, в течение которого происходит спад уровня громкости на 8,7 фон, называют постоянной времени слуха.

Как и в любой инерционной системе, мгновенное проявление тонального звукового раздражения вызывает в органе слуха не мгновенное ощущение, а с некоторой усредненной постоянной времени нарастания, составляющей 50...100 мс. Однако известно, что длительность установления высоты звука на низких частотах (в контрактаве) составляет 80 мс, в шестой октаве — около 30 мс, а во второй, третьей и четвертой октавах — порядка 13...18 мс, что совпадает с областью максимальной чувствительности слуха. На Рис. 2.8 изображена зависимость времени определения слухом частоты тона. Если бы динамические свойства слуха формировались только двумя рассмотренными постоянными временем слуха, то человек не мог бы воспринимать короткие звуковые сигналы. Однако из практики мы знаем, что это не так. Следовательно, орган слуха устроен сложнее и тоньше, чем предполагалось ранее, так как способен различать особенности протекания звуковых процессов длительностью всего 0,25 мс (250 мкс). Это означает, что влияние всех элементов уха, предшествующих базилярной мембране, оказывается в области еще меньших времен. Нельзя не удивляться совершенству человеческого слуха!

Это свойство слуха является, пожалуй, решающим в восприятии тембров музыкальных инструментов, пространственных и иных характеристик саундстейджа.

Фазовые соотношения установившихся во времени сигналов, соотношения тонов сложного звука ухо не различает, если только эти соотношения не меняются во времени. Классический пример, когда периодические колебания имеют различные несинусоидальные формы, но при этом воспринимаются ухом как идентичные, приведен на Рис. 2.9.

Итак, мы кратко (в смысле не исчерпывающее) рассмотрели амплитудные, частотные и временные свойства слуха. С временными свойствами тесно связаны процессы восприятия слухом импульсных сигналов, спектральных и фазовых составляющих сложных сигналов, характерных для музыкальных программ.

Наличие у человека двух ушей, разнесенных друг от друга на расстояние порядка 21 см, позволяет определять направления на источники звука, их удаленность, размеры. В обычных условиях слух способен определять угловое перемещение источника звука в горизонтальной плоскости с точностью около 3...4 градусов. При неподвижном источнике звука слух способен определить направление на него не точнее 12 градусов, а по вертикали — 17...20 градусов. В частности, поэтому на

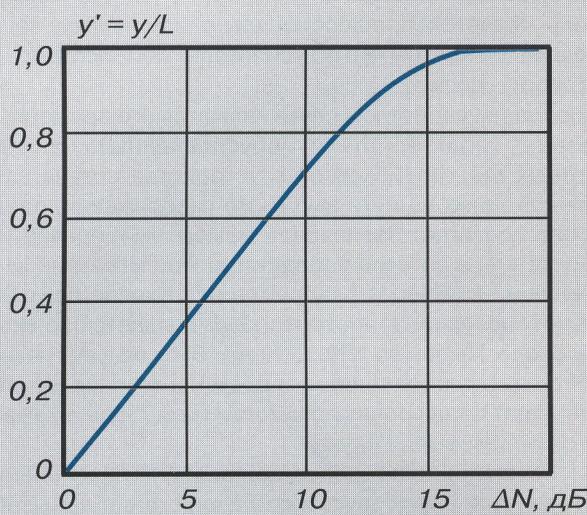


Рис.2.11. Зависимость локализации от разных уровней звуковой энергии сигналов в каналах

демонстрационных записях помещают фрагменты с движущимися животными, людьми, механизмами. Во-первых, их звучание легко узнаваемо, во-вторых, — лучше локализуются движущиеся источники звука, что приятно радует слух неофитов.

Такие локационные способности слуха, развившиеся, как полагают, у человека в процессе эволюции, называют бинауральным эффектом и объясняют неодновременностью достижения звуковыми волнами каждого уха, неодинаковым уровнем звуковых давлений в слуховых проходах, особенностями тембров знакомых источников звуков и их изменений.

Всем, вероятно, знаком пример с проходящим мимо наблюдателя поездом, непрерывный и объективно не изменяющийся по частоте звук гудка которого меняет не только свое положение, но и субъективно ощущаемую тональность. Этот эксперимент каждый может осуществить на железной дороге неподалеку от какой-либо малозначительной станции, где поезда не останавливаются, но гудком оповещают об опасности своего приближения. В приведенном примере положение слухового объекта (гудка поезда) совпадает в пространстве с источником звука. В дополнение ко всему, и визуальное положение источника звука и слухового объекта совпадают в отличие от примера со сверхзвуковым самолетом, приведенном в самом начале этого раздела («Class A», N12, 1997), где слуховой объект отставал от визуально наблюдаемого источника.

Нас интересует случай, когда положение источника и слухового объекта не совпадают, но имеется аппаратурно созданная иллюзия расположения слуховых объектов (кажущихся источников звука — КИЗ) в комнате прослушивания, когда не ощущается работа АС. Для этого используются уже упомянутые ранее локационные способности слуха.

На Рис. 2.10 показаны два одинаковых громкоговорителя (АС) 1 и 2, расположенные на расстоянии $2L$ один от другого. На расстоянии X от базы АС на оси симметрии расположен слушатель, уши которого находятся на расстоянии r_1 и r_2 от соответствующих АС.

Если на обе АС подать одинаковый сигнал, то звук от каждой АС достигнет ушей одновременно: правого от АС1, а левого — от АС2. Идентичность звуков не позволит слуху разделить их в пространстве на левый и правый. Так создается слуховая иллюзия: визуальный (кажущийся) источник звука как бы находится в середине базы — между АС.

Если уменьшить громкость АС1, то это будет воспринято слухом как перемещение КИЗ в сторону АС2 и наоборот. Таким образом, варьируя громкость звучания левой и правой АС, можно вызывать и поддерживать иллюзию перемещения виртуального источника звука (КИЗ). Это явление называют интегральной локализацией (или локализацией суммы).

Аналогичную иллюзию перемещения КИЗ можно получить, создавая запаздывание звука в одной из АС. При этом виртуальный источник звука перемещается в сторону АС, излучающей звук с опережением по времени $\Delta t > 1,1$ мс. На Рис. 2.11 и Рис. 2.12 показаны зависимости локализации КИЗ соответственно от разности уровней и временного сдвига сигналов в каналах. Оба эти эффекта широко используются при записи музыки. Слушатель, к сожалению, обычно не имеет возможности влиять на процесс записи, поэтому специально уделять внимание данному процессу не предполагается. В конце цикла статей будет опубликован список использованной и рекомендуемой литературы, которая позволит желающим подробнее ознакомиться с любой из изложенных тем.

Мы же продолжим разговор о диалектическом методе подхода к явлениям реальности и попробуем выяснить не только положительные, но и отрицательные стороны эффекта локализации.

Итак, при одинаковых уровнях основного и задержанного сигналов виртуальный источник звука ощущается на месте физически существующего источника, излучающего опережающий сигнал. Таким образом, источник звука, излучающий задержанный сигнал, не ощущается вообще, но его присутствие проявляется в виде повышения

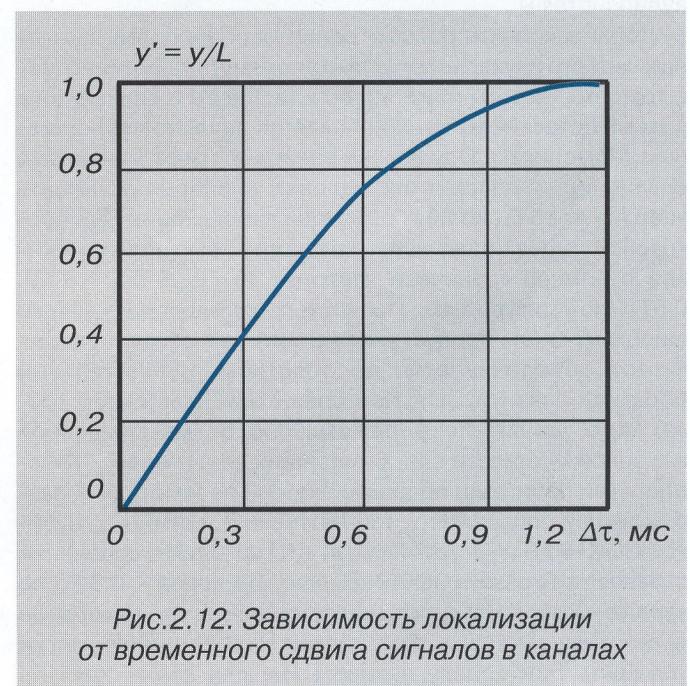


Рис.2.12. Зависимость локализации от временного сдвига сигналов в каналах

общей гулкости звучания. При задержках одного из сигналов на время более 50 мс наличие запаздывающего сигнала ощущается как помеха в виде эха, хотя положение КИЗ остается неизменным. Отсюда следует, что опережающий сигнал при одинаковом уровне с задержанным полностью подавляет (маскирует) последний. Повысяя уровень запаздывающего сигнала, можно добиться того, что оба источника звука будут восприниматься раздельно даже при запаздывании менее 50 мс. На Рис. 2.13 показано необходимое превышение уровня (L) запаздывающего сигнала в зависимости от временной задержки. При $\tau = 15\ldots20$ мс уровень задержанного сигнала должен быть повышен на 11 дБ, чтобы оба источника звука воспринимались раздельно. При $\tau < 5$ мс для этого эффекта достаточно превышение уровня всего на 6 дБ. При $\tau = 65$ мс запаздывающий сигнал ощущается как эхо. При $\tau < 5$ мс наблюдается неустойчивый режим: виртуальный источник звука как бы перепрыгивает из одной АС в другую, совпадая то с источником опережающего, то с источником задержанного сигнала.

Если источники звука резко различаются по тембру, это может привести к раздельному ощущению двух звуковых объектов даже при равных уровнях интенсивности обоих сигналов.

Заметим, что за $\tau = 5$ мс звуковой сигнал преодолевает расстояние около 1,7 м, т.е. в пределах традиционного расстояния до слушателя, живущего в обычной квартире. За время от 15 до 20 мс звуковой сигнал преодолевает расстояние от 5 до 7 м. Констатация этих фактов пригодится нам впоследствии при рассмотрении разделов «Электроакустика», «Акустика помещений» и «Акустические сигналы и их источники».

Для тех, кому затруднительно и скучно следить за графиками, формулами и числами, как всегда, приготовлена гуманитарная приправа — физико-психологическое эссе о саундстейдже.

В предыдущем номере журнала внимание читателей было сосредоточено, в том числе, на оценке закона О.Клемма, как существенно важного для комфорта

аудиовизуального прослушивания музыки. Я уже предвижу кажущиеся справедливыми возражения, что это, мол, важно для автора, но не для многих других слушателей, которые не ценят в аудиосистемах их способности к визуализации саундстейджа, удовлетворяясь вполне тем, что инструменты и голоса звучат из неопределенного откуда-то. Важно, мол, как звучат, а глубина, ширина, пространственное расположение инструментов — это второстепенно. Подобной точки зрения придерживается и Сергей Маслов — известный многим хайэндщик, постоянный и активный слухач-эксперт моей лаборатории SAS. Для него важнее общее эмоциональное впечатление от звучания музыки без обременения пространственными деталями. Так ему (и, возможно, многим другим) кажется.

Поставим вопрос: изменятся ли в лучшую сторону эмоциональные оценки восприятия музыки, если улучшится точность передачи пространственного положения виртуальных образов музыкальных инструментов (КИЗ) в саундстейдже? Поищем ответ в реальной пространственной расстановке инструментов, скажем, симфонического оркестра. Обычно расположение групп инструменталистов регламентировано традицией, основанной на предшествующем опыте. Музыканты, знающие об этом, конечно, больше меня, смогут поведать, что в некоторых случаях композиторы намеренно изменяют не только количество исполнителей в группах, но и расположение групп в попытке достичь нетрадиционного воздействия на слух слушателей, а тем самым и создать особые условия восприятия музыкального материала. Иначе зачем менять расстановку музыкантов? Пусть вообще сидят, где им удобнее — по взаимным симпатиям. Однако ни композитор, ни дирижер такой анархии не допускают.

Теперь сделаем допущение, что аудиосистема передает расположение инструментов оркестра искаженно, как бы пересаживает музыкантов. Сможет ли тогда неискаженно быть воспринят музыкальный материал?! Думайте сами, решайте сами...

Предвижу выпад музыкантов: А.Тосканини, мол, добивался слитности звучания оркестра как единого глобального инструмента. Парию: если аудиосистема неточно

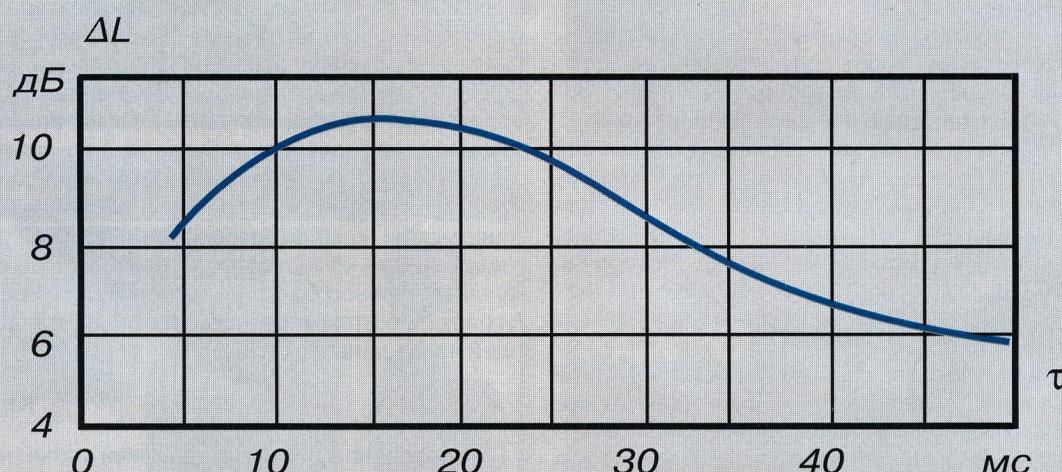


Рис.2.13. Влияние запаздывающего повторения сигнала на локализацию виртуального источника звука

передает пространственное расположение инструментов, то и глобальность будет нарушена — какие-то инструменты обязательно «вылезут» из общего целого, пытаясь «высказать» свое «частное мнение» немного выразительнее и впереди всего оркестра. Поэтому тесно взаимосвязанные физиологически и эволюционно аудиовизуальные ощущения, восприятие и мышление не столь уж ненужны для адекватного замыслу композитора психодинамического синтеза музыкальных образов в поле сознания слушателя...

Сразу сделаю оговорку: не для всех. Сколько бы убедительно я не доказывал важность (для многих, и для меня тоже) точной передачи расположения КИЗ в пространстве, всегда будет существовать равновесная отрицающая значимость этого общности людей.

Среди посетителей «живых концертов» выделяются две группы людей: первая группа предпочитает прозрачность звучания — четкое слуховое различие одновременно звучащих инструментов, возможность прослеживания отдельных мелодических линий, голосов; вторая группа предпочитает пространственное впечатление — слитность и полноту звучания оркестра, оставляя без внимания возможность выделения отдельных музыкальных инструментов.

Если бы они заранее знали, что каждая точка зрения априорно справедлива. Если бы они знали, что специальными исследованиями установлено, что обе группы людей примерно равновесны, что именно их психологическая типизация предопределяет различия вкусов. Может быть, и споров было бы меньше?

Позволю себе предположить, что каждая из этих групп не имеет абсолютно четких очертаний, подобно тому как и психологическая типизация по К.Г.Юнгу не исчерпывается, конечно, только интровертами и экстравертами, но имеет множество градаций, с чем можно познакомиться на 700 страницах текста первоисточника.

Спорить о вкусах не имеет смысла. Однако имеет смысл обратить еще раз внимание читателя на то, что для удовлетворения вкусов обеих основных групп объективно требуется как можно большее число КИЗ, образующих трехмерное пространство саундстейджа, непрерывно изменяющееся в четвертом измерении — во времени.

Только тогда те, психологическому типу которых важна слитность звучания, смогут ее услышать: ни один инструмент для них не «вылезет» в солисты; глобальное пространство звуков будет необозримым, но лишь протяженным во времени.

Только тогда те, психологическому типу которых импонирует ощущать и воспринимать голоса отдельных инструментов, найдут их адекватно расставленными как в оркестровом пространстве, так и в музыкальном времени.

«Субъективизм» в действии! Самое любопытное состоит в том, что и та, и другая психологически типизированная группа слушателей смогут удовлетворить свои аудиальные и визуальные потребности (семантические, эстетические и т.д.) в одном и том же саундстейдже, если разрешающая способность аудиосистемы превышает разрешающую способность слуха и натуральных источников звука.

Итак, мне представляется, что получен ответ на ранее поставленный вопрос, если читатель еще не забыл о нем. И ответ этот, безусловно, положительный: субъективные эмоциональные оценки восприятия музыки улучшатся при объективном увеличении точности передачи пространственного положения виртуальных источников звука саундстейджа, к какому бы психологическому типу ни относились слушатели. Каждый увидит и услышит свое сокровенное.

Термины «прозрачность» и «пространственное впечатление», частично определенные ранее, характеризуют способность слуха определять местоположение КИЗ саундстейджа. Эта способность слуха подобна стереоскопической способности зрения, когда мы наблюдаем объемность окружающих нас предметов и пространства. Поэтому при бинауральном слушании закон О.Клемма проявляется в том, что и виртуальные образы музыкальных инструментов представляются нам зримо объемными и находящимися в некотором пространстве — помещении, где происходит музыкальное действие: эту способность слуха поэтому и называют стереофоническим (стереоакустическим) эффектом.

При рассмотрении субъективного восприятия человеком акустических сигналов (например, звуков музыки) мы неизбежно сталкиваемся с восприятием их пространственных признаков. Поэтому правильнее свойства слуха называть свойствами пространственного слуха. Здесь уместно заметить, что пространство, в котором находятся реальные источники звука и образуемое ими звуковое поле, называют первичным, а пространство, в котором происходит аппаратурный синтез (аудиосистемой) саундстейджа (звукового поля) — вторичным. Иногда употребляются термины «первичные и вторичные помещения». Мне представляется, что помещение — это лишь частный случай пространства. «Музыка на воде» — для какого помещения она написана? Надо полагать, Гендель задумывал адекватное ее восприятие возможным лишь на воде Темзы. Вероятно, звукозапись этого произведения в условиях открытого пространства с водяным «полом» будет отличаться от записи, сделанной в концертном зале, т.е. в закрытом помещении.

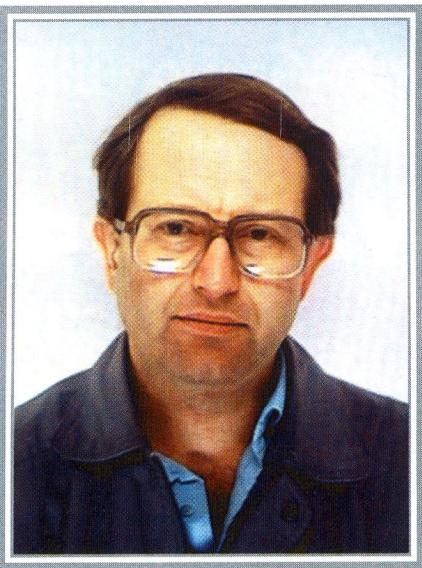
Нас более всего интересуют вторичное пространство, вторичное звуковое поле (саундстейдж), вторичное помещение, в котором обычно и находятся слушатель и аудиосистема. Говоря о свойствах пространственного слуха, которые все еще не исчерпаны, мы постоянно упоминаем о помещении прослушивания, иногда о помещении, в котором производится звукозапись. Физические свойства этих помещений не менее важны, чем свойства остальных компонентов аудиосистемы: обычно слушатель упускает из виду, что комната прослушивания — это самый дорогой компонент в аудиосистеме, причем существенно влияющий на качество и точность передачи звука, а потому на качество и точность передачи музыки.

Раздел физики, именуемый архитектурной акустикой, описывает процессы возникновения, установления, распространения, отражения, поглощения и затухания звуковых полей в закрытых помещениях.

Оркестр, играющий музыку в первичном пространстве (помещении), очевидно, будет звучать по-разному, если свойства этого помещения изменять: размер, форму, гулкость. Какова реакция слуха на эти вариации? Какие параметры компонентов аудиосистемы и вторичного помещения — комнаты прослушивания — влияют на виртуальный перенос большого концертного зала в домашний уголок? Об этом и многом другом Вы узнаете в следующей части данного цикла.

Юрий Макаров

Примечание: в первой части данной статьи («Class A» №12, 1997 г.) допущены следующие опечатки:
стр. 29, правая колонка, 3-я строка снизу: вместо «107»
следует читать «107»;
стр. 30, левая колонка, 5-я, 11-я, 14-я строки сверху: вместо «Ле» следует читать «Ле».



ЧЕТЫРЕ ДАМПЫ ЖИДИ ДОЛЬШЕ

«Всему, чему было начало, будет конец».

Как отдалить конец срока службы, увеличить надежность и долговечность электронных ламп при конструировании, переделке и эксплуатации ламповой техники?

Посмотрим сначала, почему лампа может выйти из строя. Возможностей, как это ни странно, не так уж много. Внутри лампы может что-то оборваться. Или замкнуться. И, наконец, катод может перестать эмиттировать электроны в должном количестве.

А. де Сент-Экзюпери сказал: «Все неисправности в радиотехнике делятся на два класса: отсутствие контакта там, где он нужен, и присутствие там, где он не нужен». Философ, писатель, пилот и инженер (обладатель нескольких патентов в области авиации) в своем высказывании отметил только две из трех вышеуказанных причин, но для своего времени он был прав: медленное ухудшение эмиссии катодов электронных ламп в его области деятельности неисправностью не считалось. Неисправность — это то, из-за чего погибал летчик, а не то, из-за чего аэродром начинал хуже его слышать.

Почему что-то обрывается? Потому, что уменьшилась прочность и/или дернули. Почему что-то одно касается другого? Потому, что изменились размеры частей лампы при нагреве и/или уменьшилась прочность и дернули. Почему уменьшается прочность материалов в электронных лампах? Потому что долго и сильно нагревали или много раз нагревали и охлаждали, то есть включали и выключали. Итак, все сводится к двум призывам: не перегревайте и не дергайте, то есть не трясите. Не подвергайте аппаратуру воздействию вибрации, особенно когда она включена (лампы горячие, прочность элементов их внутренней конструкции понижена). Лампы из панелек вынимайте аккуратно. И вставляйте тоже бережно. И не мешайте усилителю охлаждаться — не устанавливайте его плотно в мебельную стенку: он будет перегреваться, и лампы тоже. Лучше приобрести для него специальную стойку.

Для тех, кто отважится, как говорят компьютерщики, на апгрейд, к этим рекомендациям хочу добавить следующие. При модернизации усилителя не нагромождайте вокруг ламп детали, обеспечьте свободную циркуляцию воздуха, не закрывайте отверстия в кожухе, а если вы делаете новый кожух, позаботьтесь о том, чтобы отверстия в нем были достаточно-го размера. Иногда для обдува выходных ламп устанавливают вентилятор, но это выливается в хоть и небольшую, но проблему — нужен бесшумный, а если такого нет, то приходится подводить к нему пониженное напряжение. Понизьте накальное напряжение до нижней границы допуска, например, с 6,3 В до 5,7 В, т.е. на 10%. Это увеличит срок службы ламп в несколько раз. И не только потому, что все в лампе станут холodнее и прочнее, как отмечено выше, но еще в связи с одной (и более важной) причиной, о которой будет сказано ниже.

Для тех же, кто изготавливает усилители своими руками, к этим рекомендациям добавляется еще две. Первая: не за-кладывайте в схему при ее проектировании предельные или

близкие к предельным электрические режимы работы ламп. Вторая: если для конкретного типа лампы в выбранном режиме ее изготовителем предусмотрено принудительное охлаждение, обеспечьте его. А если никак нельзя, снизьте нагрузку на лампу.

Идеальное техническое устройство должно быть сконструировано так, чтобы все его узлы и детали выходили из строя одновременно. Но нет таких ботинок, чтобы подошва истиралась, шнурки рвались, верх рассыпался и нитки сгнивали в одночасье. И в электронных лампах выходит из строя не все сразу, а что-то одно. Как правило, это катод. Это единственная часть лампы, которая неизбежно выходит из строя, остальные теоретически могут работать вечно.

Как же устроена и работает эта несчастная деталь?

Вокруг нас полно всякого железа, и почему-то из него электроны пачками не сыплются. Для того, чтобы проводник эмиттировал электроны, нужны два условия: определенный состав поверхности и достаточно высокая (для каждого состава своя) температура. Нагрев посильнее, можно заставить эмиттировать и кочергу. Но возникают две проблемы.

Первая проблема — сама по себе необходимая температура довольно высока, а чем температура выше, тем нагреть сложнее. Вторая — при температурах, необходимых для возникновения эмиссии, все вещества окисляются. Решение второй проблемы очевидно: в лампе вакуум. У лампы есть вводы — металлические проволочки, впаянные в стекло баллона. А у стекла и металла, хотя их специально подбирают, коэффициенты линейного расширения при нагреве все же различаются. И при каждом включении-выключении в месте их механического контакта возникают механические напряжения. Со временем образуется микротрешина, в лампу попадает воздух, катод окисляется, химический состав его поверхности изменяется, эмиссия начинает уменьшаться. Вот еще одна причина, по которой не следует перегревать лампы.

У всех металлов при нагреве увеличивается сопротивление. Поэтому когда напряжение накала подается на холодную лампу, то в первое мгновение ток накала превышает установившееся значение в несколько раз. Это может вызвать локальный перегрев. Желательно, чтобы ток накала возрастал при включении аппарата не броском, а плавно. Для плавного увеличения тока накала применяются схемы, подающие напряжение накала не сразу, а хотя бы в два приема. Отчасти снижает бросок тока при включении и сопротивление, включенное последовательно в цепь накала (оно же может применяться для уменьшения напряжения накала).

При высоких температурах все вещества испаряются. Если это проволока прямонакального катода, рано или поздно она разрушится или, как говорят в быту, перегорит, как в обычной лампе накаливания. А если катод изготовлен не из чистого металла, а из сплава, или тем паче содержит сложный окисел (оксидный катод), то изменяется его состав. И, увы, в худшую (в смысле эмиссии) сторону. Теперь становится понятно, почему надо уменьшать напряжение накала и почему нельзя допускать лавинного разогрева катода. Потому что, чем катод горячее, тем быстрее он выйдет из строя. К сожалению, намного уменьшить температуру катода тоже нельзя: прекратится эмиссия. Но до нижней границы поля допуска вполне

можно. Срок службы электровакуумных приборов при этом увеличивается в 5÷10 раз, а надежность возрастает также раз в 10 (то есть во столько же раз уменьшается частота внезапных отказов).

Существует относительно простой способ проверки допустимых пределов снижения напряжения накала. Понижайте его до тех пор, пока анодный ток не начнет заметно уменьшаться. Затем увеличьте напряжение на 0,1÷0,2 В для восстановления рабочего режима лампы и зафиксируйте полученное значение напряжения накала. Если напряжения питания вашей схемы не стабилизированы, то проделывать эту процедуру надо при минимальном напряжении сети. Кроме того, нужно проследить, чтобы перед этой процедурой схемаостояла часок включенной и прогрелась — температура катода немножко зависит и от выделяющейся на аноде мощности и температуры окружающей среды. А окружающая лампы среда в работающем усилителе имеет более высокую температуру, чем температура в помещении.

Какие катоды применяются в электронно-усилительных лампах и как они работают? Лампы выпускались миллионами, поэтому в них могли применяться только самые дешевые катоды.

Из чистых металлов в качестве термоэлектронных эмиттеров применяется практически только вольфрам, обладающий наименьшей скоростью испарения (наибольшим сроком службы) при температурах, обеспечивающих необходимую эмиссию. Заметим, что по этому параметру наилучшим оказался элемент периодической таблицы Менделеева, имеющий наибольшую работу выхода, т.е. работающий при наибольшей температуре. Это прямонакальный катод: ток накала нагревает нить, она же служит эмиттером. Срок службы катода теоретически определяется испарением, однако, если катод является прямонакальным, он перегорает из-за лавинного процесса — испарения и разогрева, взаимно ускоряющих друг друга. Происходит это за время примерно равное 0,1 отношения толщины проволоки катода к скорости испарения, т.е. в течение 0,1 теоретического срока службы.

Первоначально в катодной технологии применяли только вольфрам (W). Одним из путей улучшения параметров катода оказалось добавление к вольфраму окиси тория (Th). Механизм действия этой присадки несложен: торий дифундирует на поверхность вольфрама, образует на нем монослой (слой толщиной в один атом), увеличивающий эмиссию, а затем испаряется. Поддержание монослоиной (наиболее эффективной с точки зрения эмиссии) концентрации зависит от соотношения скорости испарения монослоиного покрытия и скорости диффузии. Скорость диффузии зависит в свою очередь от коэффициента диффузии и от распределения диффузанта (в данном случае частиц окиси) в матрице (в данном случае в вольфраме).

Энергия связи монослоя тория на вольфраме такова, что и испаряется он быстрее, чем хотелось бы, и плохо работает в условиях ионной бомбардировки, разрушающей монослои. Между тем в период изобретения WTh-катодов вакуум в лампах был невысок. Для увеличения энергии связи было применено карбидирование WTh-катода путем выдержки катода при нагреве в углеродсодержащем газе, при этом на некоторую глубину вольфрам переходит в карбид вольфрама, и энергия связи тория с подложкой увеличивается.

В этом случае причина сокращения срока службы катода иная. Он выходит из строя из-за декарбидизации — окисления углерода остаточными газами. Увеличить же содержание карбида не удается, ибо хрупкость проволоки при этом возрастает и катод теряет прочность. Заметим, что в более высоком вакууме, когда процесс декарбидизации становится несущественным, срок службы катода вновь начинает определяться расходом тория.

Принято считать, что в низком вакууме срок службы катодов уменьшается. Как правило, эта зависимость косвенная. Низкий вакуум в лампе вынуждает увеличивать рабочую

температуру катода, чтобы противостоять его отравлению, а это в свою очередь уменьшает срок его службы. На примере WCTh-катода видно, что бывают ситуации, когда вакуум влияет на срок службы непосредственно (через декарбидацию и последующее быстрое удаление тория). Считается, что в некоторых случаях даже при постоянной температуре с ухудшением вакуума уменьшается и срок службы оксидного катода.

Со временем вольфрамовый катод был почти полностью вытеснен из ламп так называемым оксидным катодом.

Оксидный катод — это слой кристаллов тройного или (реже) двойного оксида на металлической подложке — керне. Слой имеет толщину от 1 до 100 мкм, размер кристаллов — от 0,1 до 10 мкм. Металлический керн, как правило, изготовлен из никеля с присадкой (порядка сотых или десятых долей процента) активатора, чаще всего кальция, магния, иногда кремния. В случае катода косвенного накала во внутренней полости керна расположен подогреватель.

Оксиды на воздухе гидратируются. Поэтому просто взять кристаллы оксида, насыпать тонким слоем и как-то их соединить (склеить, спечь) можно только в инертной среде или вакууме. Поэтому был избран другой, технологически более простой путь. Стали наносить слой кристаллов, легко разлагающихся до оксидов с выделением только газов соединения (карбоната, гидроксида) с некоторой добавкой kleящего вещества, скрепляющего кристаллы. Потом этот полуфабрикат помещали в электровакуумный прибор и нагревали. Соединение разлагается, газообразные продукты откачиваются, клей испаряется либо разлагается и откачивается, а кристаллы слегка спекаются, т.е. дифундируют друг в друга в местах контактов.

Выбор конкретного металла или сплава для керна, выбор состава кристаллов, их размера и толщины покрытия — необъятная и сложная оптимизационная задача. О физике и технике катодов вообще и оксидного катода в частности написаны десятки книг и тысячи статей. И неспроста: в течение почти полувека к проблеме долговечности оксидного катода приводила почти любая дорога, начинавшаяся с вопроса, как увеличить срок службы радиоприемников, телевизоров, радиостанций, самолетов, ракет, ускорителей... Много десятилетий было потрачено на поиск оптимальных размеров кристаллов, толщины и плотности покрытия, состава соединения щелочноземельных металлов, вида клея, режима нагрева и откачки (скорость нагрева, давление остаточных газов). Достигнутые в итоге оптимальные характеристики примерно таковы: толщина слоя 20÷30 мкм, размер кристаллов 2÷3 мкм, состав — твердый раствор тройного оксида ($BaSrCaO$) (бария и стронция примерно поровну, кальция — единицы процентов), клей — полибутилметакрилат.

Низкой работой выхода обладает, по-видимому, монослой BaO на кристалле двойного оксида ($SrCaO$). Наиболее быстро из оксидного катода испаряется BaO . На поверхности каждого кристалла образуется слой ($SrCaO$). Через этот слой из сердцевины кристаллов дифундирует барий, встраивается в поверхностный слой и образует эмитирующую структуру с низкой работой выхода. Если поток диффузии превышает собственное испарение эмитирующими структурами, то избыточный барий испаряется, а если потока диффузии недостаточно, то поверхность обедняется барием и работа выхода возрастает.

С «активаторами» — присадками к керну, ($BaSrCaO$) до металла было связано множество научно-исследовательских и опытно-конструкторских работ. Активная присадка увеличивает испарение и уменьшает срок службы катода. Однако сложилось мнение, что совсем без активатора катоды не работают. Поэтому множество работ было посвящено выбору вида активатора (элемента, его соединения), способу введения и геометрии расположения его в керне (сплав, отдельные частицы, равномерно или неравномерно по глубине) и концентрации. Одновременно появлялись работы, доказывавшие, что оксидный катод в достаточно высоком вакууме может работать и без

активатора — на керне, не содержащем заметных примесей и вообще пассивном, например, из особо чистой платины.

Оксиды элемента-активатора накапливаются на границе «керн — оксид» и образуют высокоомную прослойку, ухудшающую работу лампы. Поэтому, очевидно, лучшие активаторы — барий и стронций. Однако их применение не получило широкого распространения ввиду технологических проблем. Наиболее широко в настоящее время применяются кремний (когда-то применявшаяся почти монопольно), магний и кальций.

Чем на больший срок службы катода мы рассчитываем, тем глубже должен быть вакуум и тем меньше должна быть концентрация активатора. Соответственно, с углублением вакуума можно уменьшать рабочую температуру, что увеличивает срок службы катода, лампы и всего устройства.

Для иллюстрации сложности и «детективности» катодной техники упомяну о случае, когда высокоомная прослойка с кремнием, ухудшавшая параметры катода, была обнаружена в катоде, керн которого не содержал кремния и, более того, выпускался с хорошими параметрами много лет. Исследования показали, что кремний попадал из подогревателя. Но в подогревателе нет кремния — это вольфрамовая проволока, покрытая алюндом (оксидом алюминия). Однако алюнд спекается при высокой температуре, и для уменьшения температуры спекания (с целью экономии электроэнергии в процессе производства) к нему добавляли оксид кремния. Он испарялся из подогревателя, оседал на керн, кремний дифундировал через керн и взаимодействовал с покрытием. Почему же этого не происходило раньше? Потому что коэффициент диффузии в никеле зависит от наличия дефектов. Раньше, когда выдавливали из листа никелевый колпачок — керн, эту операцию производили с промежуточным отжигом, при этом дефекты частично отжигались, восстановливаясь равновесная структура металла. Позже для экономии электроэнергии промежуточный отжиг был исключен, дефектов стало больше, кремний стал проникать сквозь керн.

Испарение с катода плохо не только тем, что уменьшает срок его службы. Продукты испарения, попадая на другие электроды, отрицательно влияют на параметры электровакуумного прибора, увеличивая токи утечки и уменьшая электропрочность. При попадании на электроды, находящиеся вблизи катода, продукты испарения катода могут затем возвращаться на катод и «отравлять» его (уменьшать эмиссию). Они влияют на паразитную эмиссию, если, попадая на другой электрод, уменьшают его работу выхода, и если температура этого электрода достаточно высока для возникновения эмиссии. Стандартный случай — напыление бария с оксидного катода или тория с WTh-катода на сетку. Поскольку сетка часто бывает горячей (из-за нагрева излучением катода), а анод находится под большим положительным потенциалом относительно сетки, то возникает эмиссия с сетки. Свечение второй сетки в пентодах с оксидным катодом — это, по-видимому, люминисценция BaO, напыленного на нее с катода.

Последствия испарения зависят от состава продуктов испарения, от материала электродов или изоляторов, на которые попадают эти продукты, и от температуры этих электродов или изоляторов. Благоприятной является, например, ситуация, когда материал катода и температура таковы, что напыляющиеся продукты растворяются в нем, не понижая работы выхода электрона. Так действует золотое покрытие на сетках ламп с оксидным катодом или покрытие с цирконием на сетках мощных ламп с WTh-катодом. Другой вариант — поддержание температуры электрода на таком уровне, чтобы продукты испарения на электроде не конденсировались.

Прежде всего на катод влияют металлы и газы, поступающие с анода в результате воздействия на него потока электронов с катода. Причем во многих случаях удаляемые с анода вещества — это продукты испарения катода. Почему же они влияют на катод, если они и есть вещества катода? Дело в том,

что если с катода испаряются вещества А и В в соотношении 1:1, и если они оседают на аноде в том же соотношении, и даже если они испаряются (десорбируются) с него все в том же соотношении 1:1, то совсем не обязательно, что они в том же соотношении сорбируются в итоге катодом. Например, если катод испаряет почти поровну барий и кислород, то обратный поток сорбируется не целиком. Коэффициент сорбции бария на катоде намного меньше, чем кислорода, и в результате катод сорбирует кислород и выходит из строя.

Во многих случаях на катод поступают не атомы (газов и металлов), а ионы. Это происходит, если атомы ионизируются электронами или с окружающих катод электродов десорбируются ионы. Как правило же ионная бомбардировка ухудшает эмиссию, поскольку ионы внедряются в поверхность катода и изменяют его состав, а также сокращают срок службы катода, распыляя его материал.

Большинство газов так или иначе влияет на работу катодов, либо слегка увеличивая эмиссию (водород), или сильно ее уменьшая (O_2 , CO_2 , Cl_2). Собственно, последнее и называют «отравлением катода». Особенно страшен хлор: хлорид бария, образующийся в процессе отравления, прочно оседает на катоде и значительно ухудшает его эмиссионную способность. Интересная подробность: принимая на работу девушек в сборочные цеха заводов электровакуумных приборов, японские работодатели подвергали их испытанию на потливость пальцев: в поте содержатся хлориды! Не влияют на работу катодов инертные газы: гелий (He), аргон (Ar) и азот (N_2). Влияние газов (как принято говорить, остаточных газов, хотя это иногда и не собственно остаточные газы, а натекание) проявляется в изменении состава и структуры поверхности и, следовательно, эмиссии катодов.

Отбор тока с катода приводит к его охлаждению, поскольку эмиттируются электроны, обладающие большой энергией под воздействием ускоряющего напряжения электродов лампы, находящихся под положительным потенциалом (когда лампа заперта или отбор тока с катода отсутствует при выключенном ускоряющем напряжении, энергия электронов меньше). Однако для обычных электронных ламп этот эффект незначителен. С другой стороны, слой кристаллов оксида имеет сопротивление, намного большее, чем сопротивление металла. Поэтому при отборе больших токов он разогревается, а это сокращает срок службы катода. Особенно опасен такой разогрев, когда катод только что включен, и вот почему. Если катод достаточно горячий, то малые колебания температуры катода на ток не влияют, потому что ток зависит не от температуры, а от анодного и сеточного напряжений. И катод работает устойчиво. Если катод недостаточно горячий, то ток определяется температурой катода, и если температура катода чуть-чуть возрастет, то ток резко увеличивается. Этот ток разогревает катод. Ток еще сильнее возрастает и начинается лавинный процесс. Катод в каком-то месте сильно нагревается и выходит из строя.

Поэтому иногда предусматривают раздельные выключатели накала и анода или, если два тумблера перекидывать трудно, схему, которая подает анодное напряжение через несколько десятков секунд после накального. Плавный подъем анодного напряжения происходит сам собой, если в блоке питания установлен кенотрон. Но применение кенотрона снижает надежность усилителя в целом.

В качестве курьеза можно вспомнить об успешной попытке сделать оксидный катод с саморазогревом, т.е. использовать для накала выделение тепла при прохождении тока сквозь оксидное покрытие. А как вы думаете, почему это решение не получило распространения?

Александр Ашкинази,
дипл. инж., заслуженный энергетик РСФСР