

Hi-Fi, High End AUDIO

Июль-Август '97

# CLASS A

**DVD**

НЕСВОЕВРЕМЕННЫЕ МЫСЛИ

**Поющая  
легенда 50-х**

**UltraAnalog**овый  
взгляд на «цифру»



**ГЕРШВИН**

*и весь этот джаз*



# ПЕСНЬ О ТРАНСЕ

Начнем

с простенького,

как сказал

Воланд

коту Бегемоту,

начнем

с силициума.

Вот они стоят перед нами, большие и железные, то есть не совсем железные, а из трансформаторной стали с добавками кремния, и обмотки намотаны медным проводом. И все у них может быть различным. Количество железа (сечение сердечника) может быть различным, и кремния может быть больше или меньше, и толщина пластин магнитопровода может быть той или иной, и витков в обмотке может быть больше или меньше — конечно, при сохранении отношения количеств витков в обмотках, то есть коэффициента трансформации. А некоторые мотают обмотку серебряным проводом и с серьезным видом рассказывают, что все дело в том, что у меди и серебра разные магнитные свойства. Начнем с чего-нибудь простенького, как сказал Воланд коту Бегемоту, начнем с силициума. Чем больше содержание кремния в трансформаторной стали, тем выше магнитное сопротивление, меньше потери на вихревые токи и лучше характеристика в области высоких частот (эти потери увеличиваются с частотой). Но с увеличением содержания кремния уменьшается намагниченность насыщения и, стало быть, увеличиваются нелинейные искажения. Поехали дальше. Чем тоньше пластины магнитопровода, тем меньше потери на вихревые токи, но зато больше потери на перемагничивание. «Отлично, — думаем мы, — значит, есть оптимальная толщина?» Да, но она различна для разных частот. Ибо потери на вихревые токи для разных частот различны. Поэтому, вообще говоря, от диапазона частот, преобладающих в сигнале, зависит оптимальная толщина пластин магнитопровода. И, предчувствуя

приближение басов, надо ловким движением выдергивать из любимого усилителя транс и быстро вставлять туда другой. Казалось бы, количество витков — вот уж простой вопрос. Чем меньше — тем лучше: ведь при фиксированном токе в нагрузке и обмотках трансформатора чем меньше витков, тем меньше индукция и меньше искажения (так как кривая намагничивания нелинейна). Вдобавок, тем меньше омическое сопротивление и потери. Да, но с уменьшением числа витков падает индуктивность, и когда на нижней границе частотного диапазона индуктивное сопротивление становится недостаточным, трансформатор начинает нагружать источник сигнала, и низкие частоты заваливаются. Все знают, что чем трансформатор больше, тем лучше. Ну как же: больше сечение — меньше индукция — меньше искажения. Но и здесь не все просто. При малых индукциях уменьшается магнитная проницаемость железа, уменьшается индуктивность и ухудшается частотная характеристика. Правда, она ухудшается и при больших индукциях. Так что перед «фортиссимо» надо опять трансформатор это самое, быстрой рукой, язык не поворачивается... А если у магнитопровода есть углы, то из-за меньшей индукции в этих углах могут увеличиваться нелинейные искажения. Тороидальные сердечники — о радость! — не имеют никаких углов, но даже в тороидальном сердечнике индукция оказывается несинусоидальной при синусоидальном токе в обмотке. Точнее — синусоидален суммарный поток и индукция в среднем слое сердечника, а в остальной части сердечника индукция как раз и не синусоидальна.



Между прочим, технологи не любят высокого содержания кремния (такая сталь труднее обрабатывается) и не любят тонких пластин, которых, естественно, будет больше, сборка оказывается сложнее. И, быть может, заокеанским технологам, тем, кто издавна привык придавать значение экономике и считает, что она должна быть экономной, чисто психологически труднее сделать хороший трансформатор. То ли дело нам — мы сроду денег не считали. Но вернемся к технике. Обмотки — это отдельная эпопея. Разумеется, в двухтактной схеме они должны быть симметричны, в идеале — мотаться в два провода. Для уменьшения индуктивности рассеивания (и, следовательно, нелинейных искажений в режиме В) вторичную обмотку полезно разделять на две половины и располагать их по обе стороны от первичной.

Искажения, вносимые трансформатором, суть частотные, фазовые и нелинейные. Если трансформатор плохо экранирован и существенны индуктивные или емкостные связи с окружающими деталями, возникают помехи. Для импульсных трансформаторов отдельно рассматриваются искажения формы импульса — это удобнее для расчетов, хотя их можно вычислить по частотным искажениям. Если трансформатор не передает высокие частоты, у импульса будет затянут фронт, если не передает низкие — завалена вершина. Частотные искажения — это когда не слышно басов или входящего в пике комара. Комар подкрался незаметно... Тембр звучания зависит не только от спектра сигнала (содержания в нем колебаний различных частот, и вовсе не только гармоник), но и от того, как нарастает и спадает сигнал. При нарастании и спаде сигнал вообще не является периодическим. Значит, он разлагается не в дискретный спектр, а в непрерывный. Но так не хочется о страшном...

Фазовые искажения, то есть сдвиг фазы сигнала на выходе относительно фазы сигнала на входе, сами по себе не опасны. Но если фазовые сдвиги различны в левом и правом каналах, то источник сигнала съезжает вбок. Если фазо-

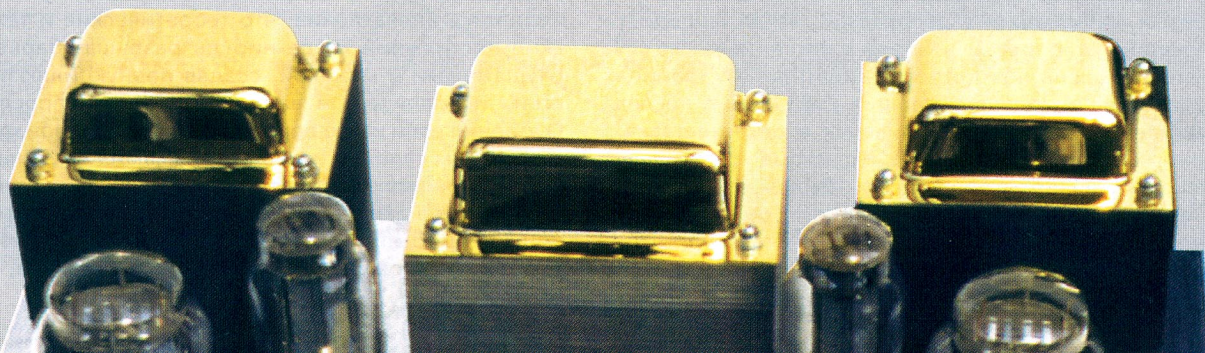
вый сдвиг зависит от частоты, то инструмент размазывается по сцене, а если от амплитуды — получается нечто такое, что представить себе так же сложно, как Василию Ивановичу из анекдота — квадратный трехчлен.

При наличии нелинейных искажений к синусоидальному сигналу добавляются гармоники. В неискаженном сигнале гармоники тоже есть, так что изменяется их количество, то есть искажается тембр инструментов. Но если звучат одновременно несколько источников звука на разных частотах, то из-за нелинейных искажений возникают сигналы комбинационных частот ( $nF_1 \pm mF_2$ ). Их, в отличие от гармоник, в исходном сигнале нет вообще. Поэтому считается, что они особо плохо сказываются на качестве звука. Генерация трансформатором гармоник зависит от режима его работы. При росте индукции четные гармоники имеют максимум, а нечетные просто монотонно растут. От подмагничивания же четные растут, а нечетные падают. Идеальный двухтактный усилитель не создает четных гармоник, поэтому, как считают некоторые, имеет неестественное звучание. Поэтому кое-кто предлагал вводить в трансформатор двухтактного усилителя подмагничивание. С другой стороны, это похоже на лечение цианистым калием в малых дозах. Кое-кто еще вроде бы делал в трансформаторах двухтактных усилителей воздушный зазор. Возможно, чтобы уменьшить подмагничивание, которое может возникнуть со временем из-за дрейфа параметров элементов схемы и возникновения разбаланса. Но вот в чем проблема — как этот зазор выбрать? При наличии подмагничивания индуктивность падает, а потери растут. Это нехорошо. Нелинейные искажения с увеличением зазора, как пишут в некоторых книгах, уменьшаются, а индуктивность (при наличии тока подмагничивания) изменяется хитро: сначала растет, затем падает. Казалось бы, это лучше всего — можно выбрать оптимальный зазор. Но он зависит от индукции, а та, в свою очередь, — от амплитуды и частоты. Нет, изменить зазор в такт музыке мы не советуем.

Разве что в рекламных целях. Трансформатор с адаптируемым зазором и сверхпроводящими обмотками — неплохо звучит?

Итак, котяра, что у нас в сухом остатке? Человек предъявляет к трансформатору множество требований: по частотным, фазовым, нелинейным искажениям, по стоимости, весу, габаритам. В зависимости от конкретных условий эксплуатации относительная важность требований изменяется. Поэтому «вообще оптимального» трансформатора не существует. В условия эксплуатации входит: что слушают, кто слушает, характеристики предыдущего каскада и нагрузки. И если мы хотим что-то оптимизировать, надо договориться, в каких условиях мы будем сравнивать изделия, или как будем оценивать различные параметры. Если этот вопрос решен, то большинство конструктивных параметров трансформатора (размеры, число витков, сечения и т.д.) имеет оптимальные значения. Понятно, что, варьируя двумя параметрами, можно добиться более высокого качества, чем варьируя одним. Варьировать тремя — еще лучше. Но сложность в том, что, подгоняя параметры понемногу, мы находим локальный оптимум, который может не совпадать с глобальным. Встав у подножия Дхаулагири и делая один маленький шаг в гору за другим, мы взберемся на 8221 м, но, сделав сначала относительно большой шаг, попав в окрестности другой горушки и далее делая опять маленькие шажки, можно взобраться и на 8848 м. Обе вершины — локальные максимумы, а Джомолунгма — еще и глобальный. Поэтому важны и кропотливая работа, и умение взглянуть на вопрос в целом. А это уже не совсем техника и не только наука, а еще и нечто похожее на... Поэтому мы в конечном итоге приходим к выводу, что в жизни всегда есть место искусству. А именно, в выборе зазора между наукой и радостью от звука. К счастью, этот зазор — не такой маленький, как в трансформаторе.

**Леонид Ашкинази**





# “Ищите простоту и

## Акустические системы, хорошие и разные

## Что такое АС?

Все мы уже привыкли к тому, что если в аудиопрессе появляется статья на конкретную тему и эта тема потенциально связана с вашими расходами (купите — не пожалеете), то такая статья — рекламная, т. е. заказная. Поэтому сразу необходимо отметить, что упоминание фирм-производителей, печатных изданий и конкретных образцов аудиотехники в данной статье рекламой не является. Предмет данной статьи знаком практически всем — это акустические системы (АС). Споры о том, какими они должны быть — как они должны звучать и каким требованиям их характеристики должны соответствовать — ведутся давно. Чаще всего они носят форму извечных вопросов — фазоинвертор или закрытый ящик, двухполосные или многополосные, узкая диаграмма направленности или широкая, фильтры первого или высоких порядков, динамические головки или нетрадиционные излучатели (электростаты, планары, плазменные и т. д.). Аналогичные дискуссии по набору альтернатив в возможных технических решениях применимы практически ко всем звеньям аудиотракта. Например, в схемотехнике усилителей наиболее часто споры разгораются на следующие темы: выходной каскад класса А или класса АВ, одноканальный или двухканальный, ламповый или транзисторный, с обратной связью или без нее. Создатели АС спорят друг с другом, эксперты — с создателями, слушатели — с экспертами и друг с другом. Обратная связь в этой цепочке осуществляется через стоимость рекламы в аудиоизданиях (часть суммы идет на оплату труда экспертов) и кошелек покупателя: акустические системы покупали, покупают и будут покупать. Но споры — спорами, а тысячи фирм выпускают каждый год новые модели АС. Лишь небольшая их часть попадает в руки экспертов аудиоизданий. В их отчетах описываются технические характеристики и субъективные впечатления от прослушивания АС в составе референсных аудиоконфигураций. Но вопрос, почему именно ТАК конкретный разработчик АС видит воплощение своих идей, остается обычно за пределами статьи о том, КАК они звучат. Возможно, это сознательная позиция: среди читателей лишь очень немногие являются специалистами по акустике. Поэтому глубокое внимание в технические подробности может отпугнуть многих. Да и экспертам необходимо поддерживать имидж людей, знающих все, но не обо всем говорящих. Ибо чем ближе вам факты, описываемые в печати, тем очевиднее ошибки в подаче этого материала. И чем дальше вы от этих фактов, тем более склонны верить написанному (почти закон правдивости в репортаже). Из-за молодости отечественной аудиопрессы читатели и потенциальные слушатели почти лишены возможности видеть на ее страницах отчеты экспертов о моделях, ставших классикой в последние десятилетия. Да, они упоминаются в ретро-вставках, посвященных той или иной фирме. Но, кроме ностальгических слов «как давно и здорово это было», там больше ничего нет. Может быть, это правильно — рынок требует продавать новые модели. Но, не зная классики, трудно адекватно воспринимать авангард.

Подобно всем людям, взявшимся за перо (в хорошем смысле), мы надеемся на взаимопонимание. Легче всего оно достигается при общении на одном языке. Поэтому нам придется повториться в терминах, описывающих предмет данной статьи и имеющих к ней самое прямое отношение. Для кого-то они хорошо знакомы, для других, возможно, будут полезны. Список понятий и терминов приведен в конце статьи.

Структура дальнейшего изложения материала не будет подчинена строгому следованию названий разделов. Ибо, как гласит закон Муира в вольной интерпретации, «Когда пытаешься вытащить что-нибудь одно, оказывается, что оно связано со всем остальным». Надеемся поэтому, что читатели проявят к авторам известную долю снисхождения.

Итак, АС — это пассивное электроакустическое устройство, содержащее головки (различных типов), необходимое акустическое оформление (АО), пассивные компоненты (фильтры, регуляторы) и прочие необходимые устройства. Влияние каждой из этих частей сложно переоценить. Научная и технологическая мысль направлены на совершенствование отдельных компонентов и более точное описание взаимодействия всех составных частей АС. За последние тридцать лет были написаны десятки трудов, посвященных работе головок в различных видах акустического оформления, разработаны новые типы фильтров (кроссоверов), появились совершенно новые методики измерения параметров АС. В результате мы сейчас используем наработки, фундамент которых был заложен в конце 60-х — начале 70-х годов (например, распространенные параметры Thiele-Small, фильтры Linkwitz-Riley и т. д.). Но, наверное, самым большим достижением последних лет стало широкое внедрение в область исследований и измерений цифровых методов обработки сигналов. Именно эти методы позволили лучше понять поведение АС на реальном сигнале и сделали доступными измерения в акустически неподготовленных помещениях. Системы на базе персонального компьютера и периферийного оборудования (платы АЦП/ЦАП, микрофоны, некоторые другие устройства и набор программ) используют в своей работе как фирмы — производители АС, так и многие любители рубанка и паяльника — DIY (Do It Yourself — «сделай сам»). Над совершенствованием программного обеспечения и разработкой все более передовых методик трудятся как отдельные энтузиасты, так и профессора самых известных университетов. Создается впечатление, что теоретические и технологические достижения когда-нибудь разрушат барьеры между слушателями и музыкой, создав полную иллюзию присутствия исполнителя в вашем помещении прослушивания. Особенно если свято верить экспертам аудиоизданий, консультантам салонов и создателям самих АС. Многие конструкторские решения разработчиков АС преподносятся как революция в акустике, и затем новые модели приносят неплохую прибыль. Но проходит время, и на смену одному революционному решению приходит другое, внимание



# СОМНЕВАЙТЕСЬ В НЕЙ”

Альфред Норт Уайтхед (математик, логик и философ)

пресса переключается на еще более новую конструкцию, а любители хорошего звука, даже не отягощенные профессиональными техническими знаниями, посетив салон и прослушав новые модели, отдают иногда предпочтение классическим. Со стороны может показаться, что, обладая солидным багажом знаний, приличным финансированием и огромным выбором высококачественных комплектующих, нетрудно разработать и выпустить на рынок АС, звучание которой удовлетворило бы вкусам большинства самых искушенных любителей звука. Однако такое происходит настолько редко, что становится настоящим событием в мире аудиофилов. Так что же это такое — удача? Результат многолетних исследований? Прорывы в технологиях? Результат случайных событий, не поддающихся вразумительным объяснениям? Что мешает происходить таким событиям чаще? На небольшую часть этих вопросов авторы попытаются ответить в данной статье.

В основе любой разработки обычно лежит концепция. Она может отражать те или иные взгляды разработчиков, а также достижения науки и технологии. Многие создатели АС тоже имеют свой взгляд на то, как должна звучать АС, какими характеристиками она должна обладать и какими средствами этого можно добиться. Например, Джон Данлэви (John Dunlavy, Dunlavy Audio Labs.) [4] считает самым важным критерием оценки параметров АС переходную характеристику. Она показывает поведение не только самих головок, но и кроссоверов. Этот ветеран индустрии High End является, пожалуй, единственным из разработчиков, кто начинает прослушивание разрабатываемой АС только после того, как результаты измерений покажут соответствие характеристик заданным требованиям. Другой гуру High End’a — Зигфрид Линквиз (Siegfried Linkwitz, Audio Artistry) [5], считает, что одним из главных требований к разрабатываемым АС является достижение максимальной равномерности АЧХ как на ее оси, так и при отклонении от нее. При этом, по его теории, АЧХ должна изменяться (в идеале) только по абсолютному уровню, оставаясь линейной для сохранения тонального баланса. Особенно важно, на его взгляд, обеспечить выполнение этого условия для воспроизведения в условиях реальной комнаты при многократных отражениях. В основе разработок Пола Хейлса (Paul Hales, The Hales Design Group) [13] лежат три принципа: кроссоверы Линквица-Райли четвертого порядка, акустическое оформление типа «закрытый ящик» с критическим затуханием и передняя панель из гипсобетона с фибerglassовым каркасом. Несмотря на различия во взглядах

на отдельные характеристики, все разработчики ставят целью достижение минимальной неравномерности АЧХ АС на оси излучения.

## Акустическое оформление

Известно, что существует несколько видов акустического оформления (АО). Их можно разделить на следующие типы:

- а) открытое — акустический экран, открытый ящик;
- б) закрытый ящик;
- в) фазоинвертор (ФИ) и его разновидность — пассивный радиатор;
- г) акустический лабиринт (вариант — фазоинвертор в конце лабиринта);
- д) рупор (вариант для домашнего использования — свернутый рупор).

В силу объективных и субъективных причин широкое применение находят варианты б), в) и частично г). Вариант а) иногда применяется для среднечастотного тракта, вариант д) используется очень ограниченным числом фирм для создания АС с высокой чувствительностью. Вариант г) в классическом виде (длина лабиринта в метрах равна  $\lambda/2$ , где  $\lambda$  — длина волны, соответствующая резонансной частоте головки) применяется очень редко из-за требований высокоточной настройки и сложности изготовления. Не умаляя определенных достоинств вариантов а), г) и д), в дальнейшем рассмотрим наиболее широко применяемые типы АО.

**Закрытый ящик.** Является одним из самых простых в настройке и изготовлении типов акустического оформления низко- и среднечастотных головок. Характерная особенность — частота резонанса головки в ящике всегда выше ее резонансной частоты в свободном пространстве. Такой тип оформления характеризуется спадом частотной характеристики АС с наклоном 12 дБ/октаву ниже граничной частоты. Полная добротность головки <sup>1)</sup> в закрытом ящике ( $Q_{ts}$ ) зависит от соотношения эквивалентного объема головки и внутреннего объема ящика. От значения полной добротности зависит частотная и переходная характеристики АС. Например:

- при  $Q_{ts} = 0.5$  переходная характеристика носит апериодический характер (не имеет выбросов), а частотная характеристика на резонансной частоте АС имеет спад около 6 дБ (спад по мощности — в 4 раза);
- при  $Q_{ts} = 0.57$  АС имеет линейную фазовую характери-

1) — В области низких частот, где диффузор головки работает как поршень, для оценки потерь в процессе электромеханического преобразования используются несколько величин:

- коэффициент потерь —  $\eta$ ;
- логарифмический коэффициент затухания —  $D$ ;
- добротность —  $Q_t$ .

Взаимосвязь этих параметров осуществляется по формуле  $Q_t = 1/\eta = \pi/\delta$ . Механическая добротность —  $Q_m$  — служит оценкой механических потерь при преобразовании, электрическая —  $Q_e$  — является мерой тока противо-ЭДС в электрической цепи головки. Общая добротность головки  $1/Q_t = 1/Q_e + 1/Q_m$ . Она характеризует спад колебаний подвижной системы головки после прекращения воздействия электрического сигнала.



стику (аппроксимация по Бесселю <sup>2)</sup>) с небольшим выбросом на переходной характеристике;

- при  $Q_{ts} \leq 0.707$  АЧХ носит гладкий характер, на переходной характеристике появляются колебательные процессы;

- при  $Q_{ts} > 0.707$  на АЧХ появляется максимум, переходная характеристика носит колебательный характер;

- при  $Q_{ts} = 1.1$  достигается максимум КПД.

**Фазоинвертор.** Если в АО закрытого ящика сделать отверстие и настроить получившуюся резонансную систему на определенную частоту, то получим следующий вид акустического оформления — фазоинвертор. Отверстие излучает акустические волны, возникающие при сжатии и расширении воздуха внутри объема АС. На резонансной частоте это излучение совпадает по фазе с прямым излучением НЧ головки. За счет совпадения фаз увеличивается уровень звукового давления АС в области частоты настройки. По сравнению с закрытым ящиком у фазоинвертора больше вариантов аппроксимации частотной характеристики. В зависимости от добротности головки  $Q_{ts}$  (и желания получить гладкую АЧХ) этих вариантов может быть три [1, 3]:

- аппроксимация квазитретьего порядка <sup>3)</sup>. Наиболее часто применяется при полной добротности головки (включая сопротивление разделительных фильтров) меньше 0,383. Частота среза АС в этом случае выше собственной резонансной частоты головки. АЧХ носит гладкий характер;

- аппроксимация по Баттерворту четвертого порядка. Применяется при полной добротности головки (включая сопротивление разделительных фильтров) равной 0.383. При этом частота настройки фазоинвертора совпадает с резонансной частотой головки  $F_s$ . АЧХ носит гладкий характер;

- аппроксимация по Чебышеву четвертого порядка. Применяется при полной добротности головки (включая сопротивление разделительных фильтров) больше 0.383. Частота настройки фазоинвертора ниже собственной резонансной частотой головки. АЧХ носит колебательный характер с заданной неравномерностью.

Переходная характеристика для всех случаев аппроксимации носит колебательный характер.

Максимум КПД достигается при значении полной добротности  $Q_{ts}$  около 0.5 и неравномерности АЧХ около 0.2 дБ. Как и для АО типа закрытый ящик, максимум КПД не соответствует получению приемлемой переходной, а иногда и частотной характеристик.

Разумеется, что говоря о «гладкой» АЧХ, мы имеем в виду теоретически достижимую частотную характеристику. Влияние акустического оформления и характеристики помещения в расчетных соотношениях обычно не учитывается.

К достоинствам АО типа фазоинвертор (по отношению к закрытому ящику) можно отнести следующие [1]:

- при равных объемах корпуса и равных нижних граничных частотах АС с фазоинвертором имеет КПД на 3 дБ больше закрытой;

- при заданных одинаковых КПД и нижней граничной частоте АС с фазоинвертором имеет меньший объем корпуса;

- при заданных одинаковых КПД и объеме корпуса АС с фазоинвертором имеет в 1.26 раза более низкую граничную частоту;

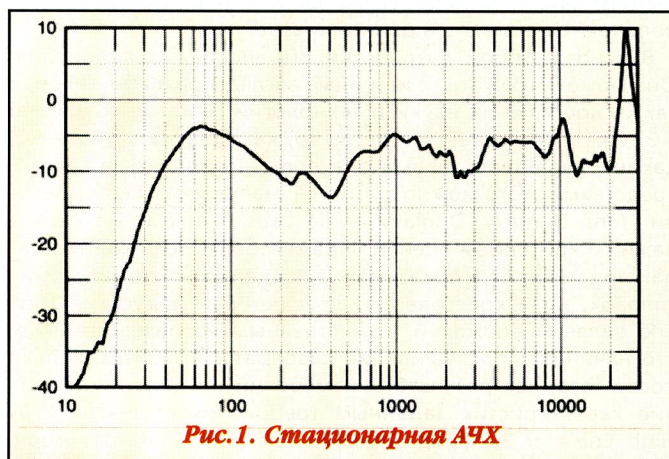
- при одинаковых требованиях к максимальной акустической мощности фазоинверсная система имеет меньшую величину максимального смещения диффузора (и величину объемного смещения) в области частоты настройки фазоинвертора;

- при равных объемах корпуса и равных нижних граничных частотах АС с фазоинвертором имеет более легкую подвижную систему и больший коэффициент электромеханической обратной связи  $Bl$  ( $B$  — плотность магнитного потока в воздушном зазоре магнитной системы,  $l$  — длина провода звуковой катушки в зазоре).

Достоинства и недостатки различных видов акустического оформления проявляются, конечно же, не только в сухих цифрах справочников и руководств. Эти различия мы можем понять, лишь оценив на слух результаты тех или иных конструктивных решений, которые нам предлагают разработчики АС.

Фазоинвертор стал всемирным бестселлером. Это — факт. Пожалуй, более 99% продаваемых АС имеют именно такой тип АО. Отверстие на задней или передней панели можно найти и у дешевых мониторов, и у систем, стоимость которых приближается к \$100000. Почему же тогда некоторые фирмы принципиально не применяют в своих разработках фазоинверторы? Вот мнения некоторых разработчиков по этому поводу:

- Джон Данлэви [4], например, считает, что добавление порта ФИ в акустическое оформление (видимо, это относится и к системам с пассивным радиатором — авторы) приводит к уве-



**Рис. 1. Стационарная АЧХ**

личению добротности системы. Порт, увеличивая эффективность головки на самых низких частотах, вызывает накопление энергии в объеме воздуха от одного полупериода колебаний к другому. В результате мы имеем плохое демпфирование подвижной системы головки. Это явление особенно заметно на импульсной и переходной характеристиках АС. Долгое время Д.Д. сам играл на контрабасе и, по его мнению, только АС с АО в виде закрытого ящика с низким значением добротности ( $Q_{ts}$ ) позволяют воспроизвести НЧ спектр корректно;

- Пол Хейлс [13] вообще считает фазоинвертор ошибкой: он добавляет в систему второй резонанс. Труба, поглоти-

<sup>2)</sup> — В электроакустике широко распространена практика применения электромеханических аналогий, при которых эквивалентная схема головки в акустическом оформлении представляется набором сопротивлений, индуктивностей и емкостей, соответствующих как акустическим, так и электрическим параметрам громкоговорителя. Номиналы элементов эквивалентной схемы соответствуют гибкости воздуха внутри АО, гибкости подвижной системы, ее полной массе и т. д. Анализ таких схем производится с применением теории линейных цепей. Оказывается, что АЧХ АС может быть описана при помощи уравнений фильтров порядков с большой степенью точности. Подобная аппроксимация нашла широкое распространение в теории анализа и разработки АС.

<sup>3)</sup> — Термин «квазитретий порядок» характеризует более плавный спад частотной характеристики АС на низких частотах, чем у фильтров четвертого порядка. Необходимо добавить, что полная добротность головки ( $Q_{ts}$ ) является величиной, зависящей от многих механических и электрических параметров. Они, в свою очередь, зависят от технологии и материалов, примененных при ее изготовлении. Поэтому добротность является такой же принадлежностью головки, как и номер паспорта у любого гражданина нашей страны.



ли — все работает на этот резонанс. Свое отношение к фазоинвертору он кратко формулирует следующим образом: «только через мой труп».

Каким бы ни был вариант акустического оформления, существуют общие требования к конструкции корпуса АС. Излучения от корпуса, явления дифракции на углах и панелях являются (в той или иной мере) неотъемлемой составной частью звучания любой АС. Механические колебания конструкций корпуса АС, являющиеся причиной паразитных излучений, возникают по двум причинам [1]:

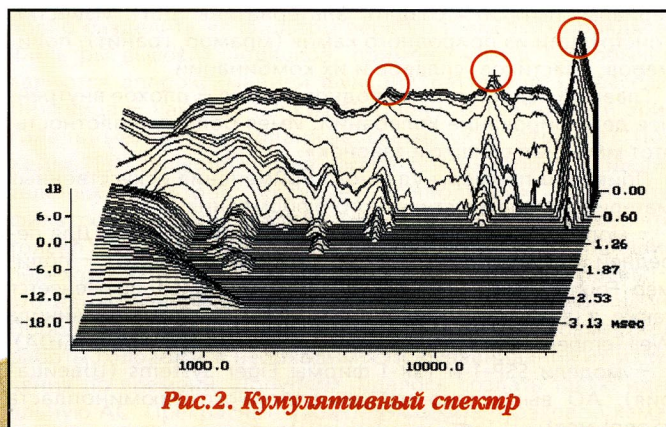
- колебания внутреннего объема воздуха из-за излучения тыльной поверхности диффузора;
- прямая передача колебаний от диффузородержателя на поверхность, где установлена головка.

В силу первой из этих причин можно сделать вывод о том, что к конструкции корпуса закрытой АС предъявляются более жесткие требования на предмет отсутствия паразитных излучений.

Дифракция на углах и панелях АО, а также собственные резонансы заключенного в объем АС воздуха, влияют и на АЧХ в достаточно широкой полосе частот. Это явление известно разработчикам АС сравнительно давно [2]. Основным способом борьбы с ним является применение по возможности тупых углов между панелями, прилегающими к головке, и узкой передней панелью. Наихудшими характеристиками обладают традиционные прямоугольные ящики. Лучшими — сферы и многогранники. Технологические затраты на создание АО с «плавными обводами» существенно влияют на конечную стоимость АС. Поэтому очень редко можно встретить АС с АО НЧ головки в виде сферы. Такой тип АО более распространен у СЧ звена.

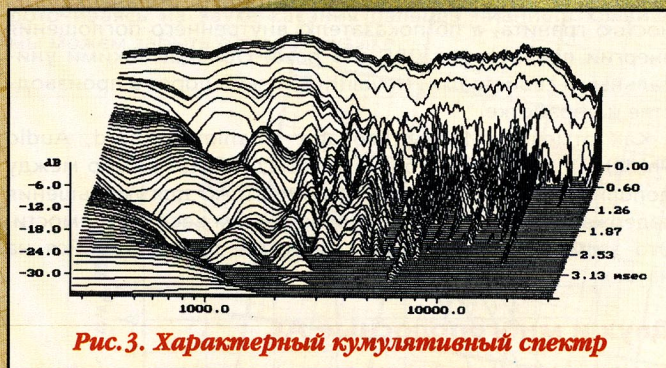
Отражения звуковых волн от задней панели и углов ящика внутри АС и конструктивные особенности самих головок приводят к возникновению задержанных резонансов <sup>4)</sup> (ЗР) [1]. Особенно сильно они проявляются в плохо задемпфированных корпусах, имеющих небольшую глубину. Термин ЗР стал часто применяться после внедрения в технику измерений аналого-цифровых измерительных систем. В литературе отмечено [1], что по графику стационарной АЧХ и ФЧХ выявить их практически невозможно. Однако, как показывают результаты измерений, это не совсем так. Невозможно определить абсолютный уровень ЗР и время их спада. А вот их наличие определяется по стационарной АЧХ с большой вероятностью. Любой резкий излом АЧХ приводит к возникновению задержки спада энергии излучения. Например, на рис. 1 и 2 видно, что изломы на частотах 4, 10 кГц и 22 кГц приводят к накоплению энергии. На рис. 3 и 4 приведены примеры характерного и «чистого» кумулятивного спектра <sup>5)</sup>.

Для корпусных АС стоимость акустического оформления может составлять более 60%. Парадокса здесь нет — современные технологии и материалы требуют очень больших затрат. Основная часть производителей продолжает применять ДВП для всего корпуса. Для устранения паразитных вибраций толщину панелей делают переменной, применяют

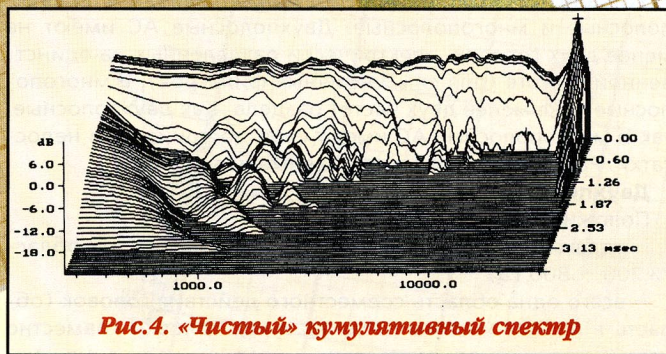


**Рис. 2. Кумулятивный спектр**

распорки, ставят ребра жесткости, используют поглощающие энергию звуковых частот материалы. Эти меры позволяют свести к минимуму вибрации, передаваемые от диффузородержателя НЧ головки на корпус АС, и увеличить жесткость конструкции для уменьшения резонансов от стоячих волн внутри корпуса. Но возможности ДВП не бесконечны. К тому же, нельзя не сказать и об экологическом фа-



**Рис. 3. Характерный кумулятивный спектр**



**Рис. 4. «Чистый» кумулятивный спектр**

кторе — большинство производителей ДВП делают их на основе составов, содержащих фенол (прямая аналогия с дешевой мебелью). Поэтому в последнее время конструкторы и технологи, кроме попыток применять уже известные ма-

<sup>4)</sup> — Акустическое оформление и объем воздуха внутри него, динамические головки и кроссовер можно представить как набор резонаторов, имеющих собственные частоты и добротности (постоянные затухания). Спектр излучения АС во время затухания колебаний будет функцией интервала времени, прошедшего с момента прекращения воздействия электрического сигнала. Поэтому это явление и получило название задержанных резонансов. Практически все эксперты и современные авторы трудов по акустике связывают термин ЗР с современными цифровыми измерительными комплексами, которые позволяют представить это явление с помощью построения графика кумулятивного спектра (см. далее в статье). Однако уже в середине сороковых годов нашего века сотрудники британской компании BBC опубликовали работу, посвященную проблеме ЗР. Для исследований в этой области использовались только аналоговые приборы (Shorter D. Издание BBC, октябрь 1946 г.).

<sup>5)</sup> — Кумулятивный спектр (от латинского *sumulo* — собираю, накапливаю) вычисляется из импульсной характеристики АС. Он характеризует накопление энергии в головках, фильтрах и т. д. Смысл КС заключается в представлении АЧХ АС в виде трехмерного графика, по осям которого расположены амплитуда, частота и время. График КС при нулевом значении времени соответствует стационарной АЧХ АС. Приращение координаты времени показывает изменение спада АЧХ излучения после прекращения воздействия тестового сигнала.



териалы, пытаются создать альтернативы ДВП. Известны конструкции из природного камня (мрамор, гранит), полимеров, пластиков и их комбинаций.

Главный недостаток природного камня — плохое внутреннее демпфирование колебаний. Имея большую плотность, этот материал слишком «звонок».

Приведем примеры удачного применения искусственных материалов для акустического оформления:

- модель Jaguar фирмы Dzurko Acoustics (США). Для передней и задней панелей АС используется минерал — полимер Fountainhead. Этот уникальный материал применяется также в антивибрационном шасси проигрывателей винила Well Tempered Classic & Super фирмы Transparent Audio (США);

- модели SSP-1 и TSP-1 фирмы Eiger Systems (Швейцария). АО выполнено из многослойного алюминопласта «SonoLam»;

- три модели Performance 8XX фирмы Mordaunt — Short (США), АО которых выполнено из патентованного материала Resinrock(R);

- модель Kingston фирмы Celestion (Великобритания). АО выполнено из минерал-полимера AlphaCrystal(R);

- модель Aerial 10T фирмы Aerial Acoustics (США). Для отдельного блока СЧ/ВЧ головок применен корпус из Novalith(R). Этот патентованный материал обладает плотностью гранита, а по показателю внутреннего поглощения энергии превосходит ДВП в 3 раза. Обладая такими уникальными свойствами, Novalith(R) очень дорог в производстве и обработке.

Как отмечает Иохим Герхард (Joachim Gerhard, Audio Physic) [11], «... (у разработчика) всегда будет выбор между дополнительным усилением жесткости АО для уменьшения заданных резонансов и увеличением веса и стоимости. Это элемент дизайнерского искусства, базирующийся на науке».

## Двух и многополосные АС

Условно все существующие АС можно разделить на двухполосные и многополосные. Двухполосные АС имеют не менее двух головок, электрически разделенных на единственную частоту (для симметричных фильтров), а многополосные — не менее двух частот раздела. Как двухполосные, так и многополосные АС имеют свои достоинства и недостатки. Рассмотрим коротко основные из них:

### Двухполосные

Положительные стороны:

- удается избежать раздела частот в критической области 200 — 800 Гц;

- всего одна область совместного действия головок (область в районе частоты раздела, когда головки совместно излучают сигнал одной частоты и уровнем излучения каждой нельзя пренебрегать);

- обычно небольшое соотношение диаметров головок и небольшое расстояние между ними (лучшая согласованность). Соотношение диаметров головок обусловлено требованием обеспечения линейной АЧХ и приемлемой диаграммой направленности на частоте раздела. Диаметры динамических ВЧ головок обычно составляют от 19 до 38 мм ( $3/4"$  —  $1\frac{1}{2}"$ ). НЧ/СЧ головка подбирается из расчета получения хорошей согласованности по указанным выше параметрам. Применение низкочастотных головок большого диаметра — 200 мм и более — может привести к неравномерности АЧХ и плохой диаграмме направленности при отклонении от оси АС;

- обычно меньшие размеры акустического оформления (легче обеспечить требуемую жесткость, уменьшить дифракционные эффекты на плоскостях и гранях корпуса, большая гибкость в выборе места и высоты установки АС).

Недостатки:

- требование небольшого соотношения диаметров головок не позволяет (в общем случае) получить необходимую отдачу в низкочастотном диапазоне;

- большая нагрузка на НЧ/СЧ головку в диапазоне частот настройки акустического оформления (и фазоинвертор, и закрытый ящик) может приводить к возникновению многих видов линейных и нелинейных искажений.

Выбор частоты раздела головок в двухполосной конструкции является серьезным компромиссом. Так, сдвиг частоты раздела в сторону низкочастотного диапазона отрицательно сказывается на режимах работы ВЧ головки. При приближении частоты раздела к ее резонансной частоте увеличивается значение смещения звуковой катушки. Линейная величина этого смещения обычно не превышает 0.3 мм, поэтому в звучании головки может возникнуть определенная жесткость. Большинство современных ВЧ головок, находящихся применение в АС класса High End, имеют резонансные частоты, лежащие в диапазоне 500 — 1500 Гц, хотя встречаются экземпляры, у которых этот параметр лежит в пределах от 350 Гц до 8 кГц. Смещение частоты раздела в сторону высоких частот приводит к тому, что НЧ/СЧ головке приходится воспроизводить звуковые сигналы в очень широкой полосе частот. Во многих АС ее частотный диапазон может перекрывать 5 — 6 октав. Из литературы [1] известно, что частотный диапазон НЧ/СЧ головок можно разделить на четыре поддиапазона:

- НЧ область поршневого действия диффузора (от нижней воспроизводимой частоты до критической частоты  $f_{кр}$ . [2]);

- СЧ область формирования симметричных радиальных колебаний (от  $f_{кр}$  до 1–1.5 кГц);

- СЧ область первого резонанса диффузора (от 1 до 2 кГц);

- область резонансов с окружающими узловыми линиями (свыше 1.5 кГц).

Конструкторы НЧ/СЧ головок ищут пути улучшения характеристик в увеличении жесткости материала диффузора, снижении плотности и увеличении собственных механических потерь (сами по себе эти требования являются достаточно противоречивыми), поэтому все большее распространение получают новые материалы — кевлар, алюминий, сплавы и окислы магния, керамика. Они позволяют расширить область поршневого действия диффузора, но порождают резонансы в области частот выше 2 кГц. А это близко к частоте раздела типичных двухполосных АС. С резонансами, имеющими к тому же высокую добротность, можно бороться с помощью фильтров и специальных корректирующих цепей. Часто это приводит к серьезному усложнению конструкции кроссовера и большой неравномерности импеданса АС по частоте. Усилия технологов сосредоточены на уменьшении амплитуды резонансов и обеспечении гладкого спада АЧХ за верхней частотой воспроизводимого диапазона. Естественно, что выбор НЧ/СЧ головок с параметрами, удовлетворяющими всему приведенному выше комплексу требований, крайне ограничен. Это заставляет фирмы — производители АС тесно сотрудничать с производителями головок или применять в кроссоверах фильтры высоких порядков.

### Многополосные

Теоретически на количество полос АС ограничений нет. Чаще всего можно встретить трех- — пятиполосные конструкции. Такие системы предоставляют большую гибкость в создании для каждой из головок оптимального режима нагрузки по мощности и частотному диапазону. Но одновременно возникает несколько проблем:

- большие габариты (сложнее обеспечить достаточную для отсутствия резонансов прочность, проблемы с дифракцией);

- более сложные кроссоверы;

- несколько областей совместного действия головок;

- необходимость выравнивания звукового давления головок в частотных полосах.



## Фильтры и корректирующие цепи

*Лучший кроссовер — это его отсутствие.  
Иохим Герхард [10, 11].*

Основная функция разделительных фильтров в АС — создание оптимальных условий для работы головок в частотных полосах и устранение недостатков головок за их пределами. Однако влияние кроссоверов на многие характеристики АС трудно переоценить. Достаточно упомянуть, что от них зависит [1]:

- равномерность характеристик направленности в области совместного действия головок, на которую влияют ФЧХ кроссовера и физическое расстояние между головками (вывод № 1 — располагать головки возможно ближе друг к другу, вывод № 2 — располагать их в вертикальной плоскости для получения более равномерной АЧХ в горизонтальной плоскости.);

- ослабление пиков и провалов на АЧХ АС;

- обеспечение допустимой входной электрической мощности СЧ и ВЧ головок, ограниченной максимальным смещением подвижной системы (теоретически рекомендуется крутизна спада фильтра для ВЧ головки не менее 12 дБ/октаву), а также снижение искажений, вызываемых эффектом Доплера <sup>6)</sup>.

На практике применяются несколько видов фильтров, а иногда и их комбинации. Все их многообразие можно ус-

ловно разделить на фильтры первого и высоких порядков. Фильтры высоких порядков, применяемые в АС, обычно являются аппроксимацией функций Баттерворта, Бесселя, Линквица — Райли <sup>7)</sup> (Linkwitz — Riley). Встречаются и оригинальные, запатентованные схемы. Как отмечает Пол Хейлс [13], существуют два лагеря конструкторов разделительных фильтров: «крутые» и «пологие». Апологеты фильтров первого порядка («пологие») утверждают, что только такое решение дает возможность получить хорошие переходную и импульсную характеристики. Они правы — это единственное средство для достижения данной цели. Проблема — в протяженном частотном участке совместной работы головок и в необходимости выравнивания их излучения по времени. Допустим, удалось создать такую идеальную АС. Прекрасные характеристики в безэховой камере. Но поместите ее в реальную жилую комнату со стенами, полом, потолком, и излучаемая мощность не будет линейна по частоте. При отклонении от оси АС с фильтрами первого порядка обладают неприятным свойством — появляются пики в области частот раздела кроссовера. И это слышно очень хорошо. Пол Хейлс признает полное превосходство фильтров первого порядка в возможности воспроизводить малейшие нюансы фонограмм. Но, по его мнению, сосредоточиваясь на звуке касания пальцев пианиста клавиш, мы можем забыть о самой музыке.

<sup>6)</sup> — При излучении колебаний звуковой частоты электроакустические преобразователи (в том числе и динамические головки) вносят в сигнал различного рода искажения, среди которых не последнее место занимают интермодуляционные. Такого рода искажения вызывают как амплитудную, так и фазочастотную модуляцию полезного сигнала. Амплитудная модуляция связана с нелинейностью механических характеристик подвижной системы и нелинейностью электромагнитных параметров. Фазочастотные искажения связывают с эффектом Доплера — изменением частоты излучения источника, движущегося с некоторой скоростью относительно неподвижного приемника колебаний (помните школьный пример с мчащимся мимо гудящим паровозом?). Применительно к динамическим головкам это явление можно объяснить тем, что в процессе излучения низкочастотных колебаний амплитуда смещения диффузора максимальна. Таким образом, его поверхность, излучающая и на более высоких частотах, приближается и удаляется от слушателя. Высоко-частотные колебания оказываются промодулированными низкочастотными составляющими. Нормы на допустимый коэффициент искажений такого рода пока не приняты.

<sup>7)</sup> — Краткая характеристика фильтров, применяемых в АС. На рис. I, II, III и IV изображены соответственно амплитудно-частотная, переходная, группового времени задержки и фазовая характеристики:

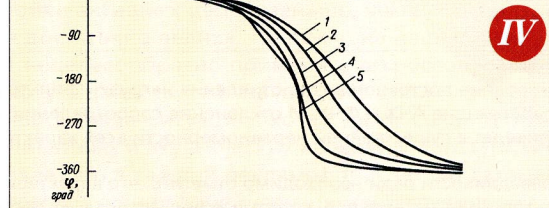
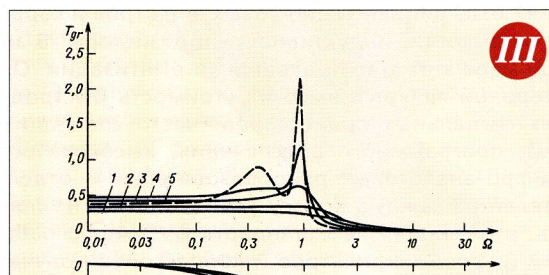
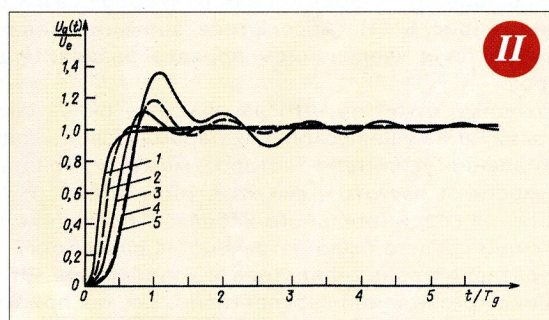
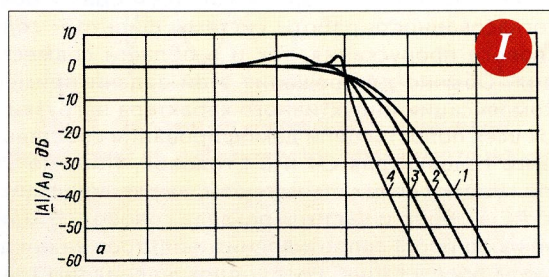
- фильтры с критическим затуханием. АЧХ фильтра линейна в полосе пропускания и имеет плавный спад за ее пределами. Переходная характеристика не имеет выбросов (кривая 1);

- фильтры Баттерворта. АЧХ фильтра линейна в полосе пропускания и имеет резкий спад за ее пределами. Переходная характеристика носит колебательный характер. С повышением порядка фильтра колебательные процессы возрастают (кривая 3);

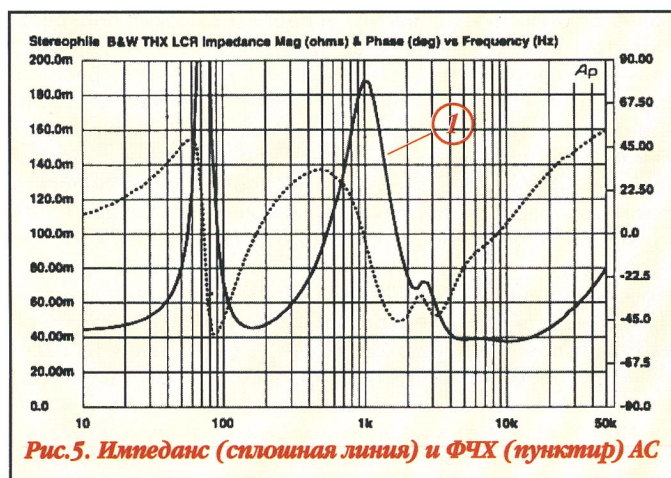
- фильтры Бесселя. АЧХ фильтра линейна в полосе пропускания и имеет относительно резкий спад за ее пределами. Переходная характеристика имеет небольшой выброс, но не содержит колебаний. Это объясняется линейной зависимостью фазового сдвига от частоты (кривая 2);

- фильтры Чебышева. АЧХ фильтра имеет волнообразный характер в полосе пропускания и очень резкий спад за ее пределами. Переходная характеристика носит выраженный колебательный характер. С повышением порядка фильтра колебательные процессы возрастают (кривая 4 — неравномерность 0.5 дБ, кривая 5 — неравномерность 3 дБ);

- фильтры Линквица-Райли. АЧХ фильтра линейна в полосе пропускания и имеет резкий спад за ее пределами. Отличительной особенностью фильтров данного типа является линейность АЧХ АС как на оси, так и при отклонении от нее. Именно это требование было реализовано при их разработке.







Одним из главных условий работы пассивного фильтра является постоянство сопротивления нагрузки <sup>8)</sup> Только при этом условии он способен обеспечить заданную АЧХ и ФЧХ. К сожалению, головки громкоговорителей не обладают линейной зависимостью импеданса от частоты. Это связано с тем, что, помимо обладания собственным резонансом подвижной системы на частоте  $F_s$ , головка является сложной комбинацией линейных и нелинейных (на реальном звуковом сигнале) сопротивлений, емкостей и индуктивностей. Задача конструктора — обеспечить согласованность работы системы фильтр — головка как в полосе пропускания, так и в области совместного действия. Обычно для решения этой задачи применяют цепи компенсации индуктивного характера нагрузки (для головок всех полос) и цепи демпфирования собственного резонанса головки для СЧ и ВЧ головок. Помимо этого, часто применяют специальные цепи, выравнивающие импеданс АС в области частоты раздела головок. Это необходимо из-за роста сопротивления фильтров за пределами полосы пропускания. Рост сопротивления ФНЧ и ФВЧ фильтров приводит к формированию «горба» на входном импедансе, рис 5 (1). Абсолютное значение величины «горба» растет с увеличением порядка разделительных фильтров.

Необходимо отметить, что на практике очень сложно оценить влияние еще нескольких параметров: выходного сопротивления усилителя (которое может изменяться в зависимости от частоты), емкости, индуктивности и сопротивления соединительного кабеля. В последние годы много сил и средств было потрачено на разработку цифровых разделительных фильтров и корректоров. Это направление чрезвычайно перспективно, так как при их создании подбираются (в алгоритмах программного обеспечения) коэффициенты цифровых фильтров и корректоров, а не емкости, индуктивности и резисторы. В значительной мере этот этап поддается автоматизации. Обратной стороной является высокая стоимость быстродействующих сигнальных процессоров (часто специализированных), программного обеспечения, высококачественных цифро-аналоговых преобразователей и отдельных усилителей на каждую полосу усиления. Можно предположить, что с принятием стандарта DVD Audio работы в области цифровых фильтров и корректоров получат новый стимул.

Конструкторы АС класса High End предоставляют хорошую возможность заработать немалые деньги производителям кабелей, разъемов, звукопоглощающих материалов. Также не остаются в накладе и производители пассивных компонентов разделительных фильтров. В кроссоверах применяются конденсаторы с полипропиленовым диэлектриком (и аналогичные им по характеристикам), катушки индуктивности с воздушным сердечником (провод, разумеется, из бескислородной меди), высококачественные резисторы. Стоимость каждого компонента может быть сопоставима с ценой хорошей динамической головки. Общая стоимость кроссовера может превышать стоимость всех головок АС. Насколько же необходимо применение столь дорогих комплектующих в кроссоверах? Во-первых, качество звучания большинства высококачественных головок напрямую зависит от качества элементов кроссовера. Во-вторых, производитель должен быть уверен в долговременной стабильности параметров элементов кроссовера. Разумеется, что только создатели бескомпромиссных АС применяют очень дорогие R, L, C комплектующие во всех цепях кроссовера. Чаше можно встретить дорогие пассивные компоненты только в сигнальных цепях, через которые сигнал поступает на головки. В цепях коррекции и эквализации обычно присутствуют менее дорогие комплектующие, но тоже достаточно высокого качества. Иногда можно встретить кроссовер, выполненный в виде отдельного блока. Преимущество такого типа решения очевидно — удается избежать воздействия вибраций на пассивные элементы фильтров.

Мы не упомянули священное слово — серебро. Действительно, серебро находит применение в обмотках трансформаторов, акустических кабелях, катушках индуктивности и обкладках конденсаторов. Вопрос в том, какой материал для проводника аудиотракта лучше — медь или серебро, обсуждается давно. Довод в пользу серебра — лучшая электропроводность; против — высокая цена. Однако Роджер Скофф (Roger Skoff — XLO Electric) [15] отмечает, что утверждение о лучшей электропроводности серебра справедливо только для постоянного тока. На переменном же (в аудиодиапазоне) оно теряет это преимущество. Поэтому, считает он, нет оснований говорить об объективных преимуществах серебра, используемого в вышеперечисленных изделиях <sup>9)</sup>.

#### Переходная и импульсная характеристики.

Переходная и импульсная характеристики (ПХ, ИХ) АС являются, возможно, одними из самых важных. Для других частей звуковоспроизводящего тракта (например, для всех видов линейных усилителей, в какой бы части тракта они не применялись, — предварительных, мощности, устройствах звукозаписи, CD-плеерах и т. д.) параметры этих характеристик измерялись давно. В отношении АС такие измерения стали нормой сравнительно недавно. Что же они могут сказать о характеристиках АС? При правильной интерпретации переходной и импульсной характеристик можно узнать:

- о синхронности работы головок;
- о порядке применяемых разделительных фильтров;
- о степени задержки (накопления) энергии в разделительных цепях;
- о линейности частотной и фазовой характеристик;
- о наличии или отсутствии задержанных резонансов.

По импульсной характеристике можно рассчитать АЧХ и

<sup>8)</sup> — Требование постоянства сопротивления нагрузки фильтра можно объяснить очень просто — его значение входит в расчетные формулы, определяющие АЧХ и ФЧХ. И отклонение сопротивления нагрузки фильтра от расчетного как в полосе пропускания, так и за ее пределами приведет к существенной неравномерности всех характеристик.

<sup>9)</sup> — Справедливости ради необходимо отметить, что характеристики кабелей, трансформаторов, конденсаторов и катушек индуктивности зависят не только от материалов, которые используются в их производстве, но и, подчас в большей степени, от топологии, конфигурации и т. д.

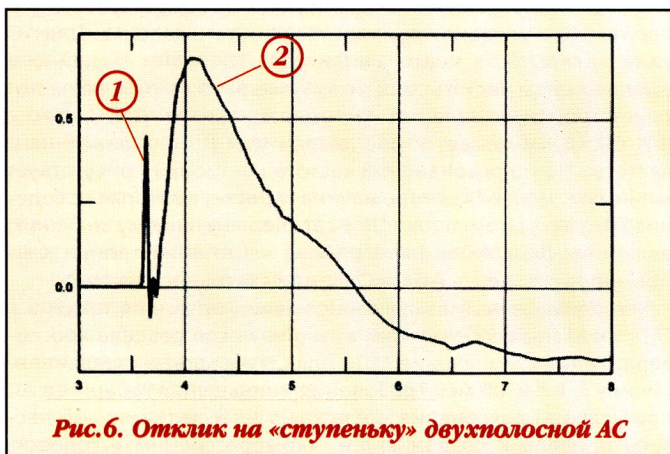


ФЧХ АС. Такую возможность предоставляют практически все измерительные системы, применяющие цифровую обработку сигналов.

Как было показано выше, существует множество вариантов формирования переходной характеристики АС. Для закрытых систем она зависит от добротности головки в акустическом оформлении (Qtс). Для систем с фазоинвертором — от типа аппроксимации, выбранного для конкретной головки. На наш взгляд, здесь уместно провести аналогию с теорией усилителей, охваченных обратной связью, из которой известно, что переходная характеристика содержит очень много информации о свойствах устройства как во временной, так и в частотной областях. По наклону фронта можно оценить скорость нарастания выходного сигнала, по выбросам — запас устойчивости, по колебаниям на вершине импульса — время установления.

В отношении АС все гораздо сложнее. Во-первых, резонансы головок лежат в звуковом диапазоне, во-вторых, имеется по крайней мере две системы (головки), имеющие различные переходные характеристики (рис. 6. 1 — отклик ВЧ головки, 2 — отклик НЧ/СЧ головки). Поэтому, если разработчик ставит перед собой задачу получения приемлемой ПХ АС, он обязан всеми доступными средствами обеспечить согласование головок во временной и фазовой областях. На общую ФЧХ основное влияние оказывают тип кроссовера, специальные корректирующие цепи и фазочастотные свойства самих головок.

Теоретически, только системы на основе фильтров первого порядка позволяют получить приемлемую ПХ (на оси АС). Например, на рис. 7 и 8 приведены ПХ времякогерентной четырехполосной АС (отклик головок синхронный) и типичной трехполосной с фильтрами Линквица-Райли (1,2,3 — отклики соответственно ВЧ, СЧ и НЧ головок). Однако на практике бывают исключения. Например, модель TC-60 фирмы Spica Loudspeakers имеет хорошую переход-



**Рис. 6. Отклик на «ступеньку» двухполосной АС**

ную характеристику при ФНЧ четвертого порядка (аппроксимация Бесселя). В высокочастотном же ее звене применен фильтр первого порядка.

Временное согласование головок (time coherence) разумно с точки зрения здравого смысла. Центры излучения у ВЧ, СЧ, НЧ головок, закрепленных на вертикальной плоскости, находятся на разном расстоянии от слушателя. Для ВЧ и НЧ головок разность хода звуковых волн может достигать 15 см и более (считается, что центр излучения головки приблизительно совпадает с местом расположения звуковой катушки). С теоретической точки зрения существуют несколько способов по временному выравниванию излучений головок разных частотных полос:

- смещение ВЧ и СЧ головок от вертикальной плоскости в глубину (вариант — наклон передней панели);

- применение фазовых фильтров с линейной ФЧХ (ли-



**Рис. 7. Реакция четырехполосной времякогерентной АС на «ступеньку»**



**Рис. 8. Отклик на «ступеньку» типичной трехполосной АС с фильтрами четвертого порядка**

ний задержки). Их реализация возможна на основе пассивных элементов RLC в кроссовере или с помощью активных кроссоверов, реализованных на ОУ и RC цепях;

- применение цифровых технологий (цифровые фильтры, корректоры и линии задержки для каждой из полос АС);
- комбинация приведенных выше методов.

Реализация аналоговых линий задержки (АЛЗ) в звуковом диапазоне частот возможна с помощью пассивных и активных схем. Пассивные АЛЗ можно реализовать на основе Т-образных фазовых звеньев второго порядка с линейной ФЧХ [17]. Однако расчеты показывают, что для обеспечения времени задержки порядка 150 — 300 мкс (типичное значение для двухполосных систем с фильтрами первого порядка) и выполнения требования малой неравномерности ФЧХ в диапазоне до 25 кГц необходимо 6 — 8 таких звеньев. Общее число пассивных компонентов может быть более полусотни. Кроме точной настройки такой цепи, требующей огромных затрат труда, на пути сигнала придется поместить несколько десятков пассивных элементов. Это не может не сказаться на качестве звука. Требование высокого качества пассивных цепей может увеличить стоимость АС более чем в несколько раз. При попытке реализовать АЛЗ в виде активных цепей (на ОУ и RC элементах) [18] можно столкнуться с теми же проблемами. Количество ОУ и пассивных компонентов фазовых фильтров превысит все разумные пределы. И хотя трудоемкость настройки активных цепей меньше, чем пассивных, но она также достаточно велика. Поэтому, на наш взгляд, практически нецелесообразно применять в кроссоверах АС АЛЗ. Можно утверждать, что на сегодня сложилась довольно противоречивая ситуация, когда даже создатели цифровых, линейных и акустических кабелей (Monster Cable подчеркивает это в каждой рекламе) производят свои изделия с учетом получения линейного времени групповой задерж-



ки (ГВЗ)<sup>10</sup>), в то время как большинство конструкторов АС совершенно не озабочены этой проблемой (временное сглаживание и линейная ФЧХ).

## Динамические головки

Размеры данной статьи не позволяют рассказать обо всех типах электроакустических преобразователей. Поэтому здесь мы рассмотрим лишь один тип преобразователей — динамические головки. Тем более, что в нашей стране у 99,9% слушателей АС укомплектованы именно таким типом излучателей. Частотная «специализация» головок явилась вынужденной мерой в ответ на желание получить приемлемые характеристики АС (направленность, КПД, уровень нелинейных и линейных искажений и т. д.) в широкой полосе частот. В настоящее время существует сложившийся международный рынок динамических головок, на котором представлена продукция фирм как Старого, так и Нового света.

### ВЧ головки

Производители АС отдают предпочтение продукции фирм Focal (Франция), Dynaudio (Дания), Scanspeak (Дания), Seas (Норвегия), Vifa (Дания), Eton (Германия). Продукция этих фирм укладывается в ценовые рамки от \$30 до \$2000. Средняя цена лежит в диапазоне \$70 — \$200. При этом головки часто подвергаются доработке (вручную производят юстировку подвижной системы, дорабатывают магнитную систему и т. д.). Приведенные выше фирмы используют в качестве материала куполов головок различные, часто патентованные материалы. Обычно это текстиль, полимеры, алюминий, титан. В магнитных системах применяют как феррит, так и сплавы редкоземельных металлов (кобальт, самарий, неодим). Экзотические сплавы используют для уменьшения габаритов головок, что позволяет размещать их как в составе подвижной системы НЧ/СЧ головок (коаксиально), так и вне корпуса АС. Уменьшение физических размеров ВЧ головки способствует снижению дифракционных явлений на ее конструктивных элементах и АО. Важным отличием головок с мягким куполом (текстильным и полимерным) является отсутствие резонансов в ультразвуковой области частот. Диафрагмы, изготовленные из сплавов и окислов металлов, обладают выраженным резонансом на частотах от 16 до 40 кГц. У лучших моделей он не превышает уровня нескольких децибел. Эксперты считают, что такие резонансы практически не сказываются на качестве воспроизведения. Необходимо отметить, что не все производители отдают предпочтение магнитной жидкости, охлаждающей звуковые катушки. Многие применяют в своих конструкциях системы воздушной вентиляции. Явного лидера среди производителей нет. Хорошего звучания от головок добиваются, применяя оптимально рассчитанные разделительные фильтры, корректирующие цепи и используя высококачественные пассивные компоненты (конденсаторы, катушки индуктивности и резисторы).

### СЧ головки

В настоящее время рынок среднечастотных головок испытывает серьезное давление со стороны производителей двухполосных систем. Среди основных поставщиков головок можно назвать следующие фирмы: Focal, Scanspeak, Dynaudio, Seas, Eton, Audax (Франция), Vifa. Производители применяют как купольные, так и конусные конструкции диффузоров. Материалы — бумага (с различными типами пропитки), полимеры, алюминий, магнетиз (окись магния), кевлар, текстиль, аэрогели, керамика и т. д. Применение высокотехнологичных материалов способствует снижению массы подвижной системы, увеличивает жесткость диффузора, но одновременно приводит к появлению собственных резонансов на верхней границе воспроизводимого диапазона и за ее

пределами. Если в рекламных материалах отмечено, что жесткость диффузора (из металла, кевлара и т. д.) головки настолько высока, что собственных резонансов не возникает, обычно это не так. Достаточно узнать количество пассивных элементов в разделительном фильтре, и если оно составляет несколько десятков штук при первом порядке кроссовера, то немалая часть этих элементов используется именно для подавления резонансов головок. Основным типом АО для СЧ головок является закрытый ящик. Иногда встречаются варианты фазоинвертора и открытого оформления.

### НЧ головки

Низкочастотные головки в акустическом оформлении АС являются, пожалуй, самой спорной и сложной их составной частью. Спорной — в смысле количества мнений и суждений о том, каким должен быть бас. Сложной — в смысле количества вариантов возможного акустического оформления и требований, которые к головкам предъявляются. Среди фирм-фаворитов рынка — Vifa, Peerless (Дания), Focal, Dynaudio, Scanspeak. Самая большая номенклатура у фирмы Dynaudio. Для изготовления диффузоров применяют бумагу (с соответствующей пропиткой), полимеры, сплавы алюминия, аэрогели (HD-A, Audax), кевлар, графитовые композиты и т. д.

Одна из самых больших проблем НЧ головок — большое значение коэффициента нелинейных искажений (КНИ) на нижней границе диапазона. Уровень искажений зависит как от собственных свойств головки, так и от особенностей АО. В немалой степени КНИ зависит и от значения максимального линейного смещения (МЛС) подвижной системы. Для типичных головок эта величина не превышает значения  $\pm 4$  мм. У лучших по этому параметру образцов значение МЛС может достигать  $\pm 6 + 12$  мм. А у специализированных головок, предназначенных для применения в сабвуферах — нескольких сантиметров. Произведение значения МЛС на эффективную площадь диффузора головки ( $S_d$ ) дает величину максимального объемного смещения ( $V_d$ ). Чем больше величина отношения значения  $V_d$  к объему АС, тем в более тяжелых условиях приходится работать головке. Для АО типа «закрытый» ящик амплитуда ЛС растет линейно с уменьшением частоты, достигая максимума в районе частоты настройки, и далее от частоты не зависит. Для систем с ФИ также наблюдается рост амплитуды ЛС с уменьшением частоты. Но на резонансной частоте настройки присутствует минимум. Далее ЛС вновь начинает расти, повторяя поведение ЛС в закрытом ящике [1]. Благодаря меньшему значению величины ЛС у АС с ФИ в районе частоты настройки КНИ обычно ниже, чем у АС с АО в виде «закрытого» ящика.

Все приведенные выше соображения относятся также и к СЧ головкам, особенно при низкой частоте раздела кроссовера. Типичное значение МЛС для СЧ головок составляет величину  $\pm 0,5 + 1,5$  мм. Требование уменьшения габаритов АС при условии сохранения достаточно низкой граничной частоты привело к созданию т.н. «компрессионных» головок. Они характеризуются большой гибкостью подвижной системы и очень низкой частотой собственного резонанса. Разумеется, что сама по себе головка не может быть компрессионной. Таковой ее делает АО. Если величина отношения эквивалентного объема головки к объему АС больше трех, то головка работает в компрессионном режиме. Если же эта величина меньше, то нет. В условиях компрессии можно заставить работать любую головку. Но также и компрессионную головку можно использовать в режиме без компрессии.

Иохим Герхард утверждает [11], что будущее — за жесткими диффузорами. Но сейчас это — серьезный компромисс между внутренним демпфированием колебаний диффузора и его жесткостью, ровной частотной характеристикой и на-

<sup>10</sup>) — Наиболее информативной мерой фазовых искажений является понятие группового времени задержки (ГВЗ). Оно характеризует временную неравномерность прохождения сигналов разных частот через исследуемое устройство.



туральным тональным балансом, чувствительностью и безжизненностью звука. По его мнению, есть пути улучшения характеристик подвесов. Жесткий подвес обеспечивает ровную АЧХ головки, но порождает т. н. динамическую нелинейность: упругость подвижной системы различна при движении диффузора вперед и назад.

## Активные сабвуферы

Производители АС предлагают нам два варианта сабвуферов: активные (АСВ) и пассивные (ПСВ). ПСВ принципиально ничем не отличаются от низкочастотного звена широкополосной АС. Поэтому все приведенные выше соображения по АО, кроссоверам и головкам применимы и к этим изделиям аудиоиндустрии. Гораздо интереснее поговорить об АСВ. Интерес к ним не случаен. В их конструкции помимо АО, динамических головок и усилителей мощности присутствуют активные разделительные фильтры и корректоры (АРФК). С их рассмотрения, наверное, и стоит начать.

Основным преимуществом АРФК является простота формирования заданных АЧХ, ФЧХ и ПХ АС. Их схемотехника обычно строится на основе операционных усилителей и RC цепей. Можно реализовать фильтры любого типа и порядка. Также появляется возможность регулирования основных параметров кроссоверов как в процессе настройки, так и в эксплуатации. Перечислим положительные свойства АРФК:

- хорошая повторяемость характеристик;
  - отсутствие влияния сопротивления нагрузки;
  - возможность выравнивания чувствительности головок электронным способом;
  - гибкость в выборе типа аппроксимации фильтра, его порядка и частоты среза;
  - возможность подстройки частоты среза и вида ФЧХ под заданные условия эксплуатации;
  - ограничение подводимой электрической мощности к НЧ головкам на частотах максимального смещения подвижной системы, что позволяет увеличить подводимую мощность в пределах рабочей полосы и значительно снизить нелинейные искажения. Так, для ФВЧ первого и второго порядков и АО в виде фазоинвертора увеличение подводимой мощности может составлять величину 6 и 16 раз соответственно [1];
  - отсутствие разделительных фильтров между УНЧ и головкой (что, в принципе, справедливо и для многополосных систем с активными разделительными фильтрами);
  - относительная простота апгрейда.
- Среди отрицательных свойств можно отметить следующие:
- большое число пассивных и активных элементов на пути прохождения сигнала;
  - стоимость пропорциональна возможностям;
  - дополнительная стоимость УНЧ на каждую полосу раздела;
  - необходимость сложной настройки (часто с применением измерительной аппаратуры) на месте эксплуатации.

Некоторые производители двухполосных АС поставляют за дополнительную плату АРФК для согласования характеристик своих систем с сабвуферами других производителей.

Гибкость в формировании заданных АЧХ, ФЧХ и переходной характеристики позволяет уже на стадии проектирования определить основные требования к головкам, АРФК и УНЧ. Располагая этими исходными данными, можно электронным способом принудительно изменять добротность головки в АО и влиять на характеристику аппроксимации. Для этих целей чаще всего используют положительную обратную связь по току в комбинации с отрицательной обратной связью по напряжению. Гораздо реже используют устройства с датчиками динамического слежения за перемещением подвижной системы. Теория таких систем разработана довольно полно (теория автоматического регулирования

применяется и в радиоприемниках, и в системах управления крылатыми ракетами), но на практике далеко не всем разработчикам удается добиться приемлемого результата.

Несмотря на потенциальные преимущества АСВ лишь немногие аудиофилы применяют их в своих системах. Причиной является сложность временного согласования, большая трудоемкость настройки (иногда с помощью компьютера). Но главной проблемой является то обстоятельство, что многие создатели видят в АСВ большие «бум-боксы» — устройства для воспроизведения большого количества баса. На наш взгляд, это может быть справедливо для систем домашнего кинотеатра, в которых звуковые эффекты являются неотъемлемой частью сюжета. Нам не с чем сравнить эти звуки — они являются искусственными. Поэтому обычно неважно, правильно или нет они воспроизводятся аудиосистемой.

Насколько трудно выбрать хороший сабвуфер, можно судить по скудному списку рекомендованных компонентов журнала *Stereophile* (апрельские и октябрьские номера).

(Продолжение следует)

*Дмитрий Карпунин, Георгий Соколов, инженеры*  
dimaudi@orc.ru

## Список основных терминов

Итак (почти по ГОСТу):

**громкоговоритель** — устройство для излучения звука в окружающее пространство в воздушной среде, содержащее один или несколько пассивных акустических излучателей (головок громкоговорителей), необходимое акустическое оформление и необходимые электрические устройства (фильтры, трансформаторы, регуляторы);

**головка громкоговорителя** — пассивный электроакустический преобразователь, предназначенный для преобразования электрических сигналов звуковой частоты в акустическую энергию;

**акустическая система** — громкоговоритель, предназначенный для использования в качестве компонента бытовой радиоэлектронной аппаратуры;

**звуковая колонка** — громкоговоритель с отличающейся направленностью звукоизлучения в различных плоскостях, содержащий, по крайней мере, одну линейную цепочку однотипных головок и предназначенный для озвучивания помещений и открытых пространств;

**акустическое оформление** — самостоятельный конструктивный элемент громкоговорителя, не участвующий в преобразовании сигналов из электрической формы в акустическую, но обеспечивающий эффективное излучение звука;

**собственная резонансная частота головки** ( $F_s$ ) — частота, при которой значение модуля полного электрического сопротивления головки имеет свой первый максимум;

**полная добротность головки** ( $Q_{ts}$ ) — добротность головки, обусловленная суммарным влиянием механических потерь и тока противо-ЭДС в электрической цепи головки;

**эквивалентный объем головки** ( $V_{as}$ ) — закрытый объем воздуха, имеющий акустическую гибкость, равную гибкости подвижной системы головки;

**переходная характеристика** — реакция линейной системы (в данном случае — АС) на воздействие ступенчатого импульса, пакетов тональных сигналов, прямоугольных импульсов с синусоидальным заполнением и т. д.;

**импульсная характеристика** — реакция линейной системы на прямоугольный импульс очень малой длительности (в идеале — нулевой длительности и бесконечной амплитуды).