

Об искажениях частотных характеристик малогабаритных акустических систем и «глубоких басах»

Игорь Алексеев, г.Архангельск

Каждый радиоловитель, кто хоть раз самостоятельно строил акустические системы (АС) знает, что даже точное исполнение проекта, рекомендаций авторов конструкции не всегда приводят к получению желаемого результата. При всей сложности или просто невозможности оценки качества самодельных АС в домашних условиях, кроме как «на слух», авторы конструкций часто не приводят ни методик оценки своих проектов, ни рекомендаций по их применению (размещению и подключению АС). Бывает, что после повторения очередного «шедевра», когда проходит радость от окончания работ над ним, наступает период мучительных оценок и выводов. Энтузиазм и минутная эйфория часто сменяются почти разочарованием. Действительно, сложно уже в готовой конструкции искать причины неудовлетворительной работы, когда делалось «все как надо». А может быть конструкция хорошая, но усилитель «не такой» или другое... Знакомо?

Посмотрите в радиоловительских журналах прошлых лет статьи, посвященные конструированию акустических систем. Уважаемые авторы создавали свои варианты практически вслепую, без учета физики электромеханических преобразований и акустики как таковой. Бесспорно, ряд конструкций самодельных АС, приемов доработок промышленных АС и динамических головок - являются удачными и заслуживают внимания. Многие конструкции стали для любителей высококачественного звуковоспроизведения хорошей «школой» в бесконечном циклическом процессе создания или переделки АС по принципу: «Вот-вот и станет совсем хорошо...». Но, заметьте, что авторы сравнивали свои разработки (максимум) с промышленными образцами АС заводов бывшего СССР. Попробовали бы они сравнить свои проекты с продукцией таких фирм как BOSE или JBL...

Возражение против покупки АС импортного производства нижней и средней ценовой категории следующее: «А кто Вам сказал, что такая АС в Вашей жилой комнате будет звучать, а не излучать сладкоголосые звуки?». Мотивы типа: «Все равно так не сделать» - не убеждают. Конечно, есть образцы фирменной акустики, которые бесподобны по своей конструкции и звучанию, но и стоимость их (как и всего ноу-хау) очень высока.

Даже сейчас, когда появилась реальная возможность использования качественных современных динамических головок, продолжают встречаться описания самодельных АС (уже на новой элементной базе), наследующие ошибки конструкций предыдущих лет. Такое впечатление, что в нынешнем многообразии выбора исходного материала мы можем рассчитать и грамотно построить только корпус АС (ящик). На самом деле, не только объем АС является определяющим показателем качества. Иногда и правильно рассчитанный с точки зрения равномерной АЧХ корпус не звучит. При снижении основного недостатка существующих динамических головок - значительной неравномерности АЧХ в средне-высокочастотном диапазоне, они мало чем будут уступать доброй трети импортных и на них можно построить АС, которая будет удовлетворять взыскательного слушателя.

Вся прелесть процесса самостоятельного создания АС заключена в свободе выбора конструкции и получении *желаемого* результата независимо (или почти независимо) от затрат, чего нельзя достичь в массовом производстве. А значит, был и остается смысл попытаться пополнить свои знания и начать сначала. Несмотря на то, что в этом материале конкретная конструкция акустической системы не приводится, некоторые аспекты работы низкочастотного звена АС излагаются с практической точки зрения и доступны для повторения или самостоятельного анализа с достаточной точностью.

Первое. Акустика помещения, а проще говоря жилой комнаты, далека от совершенства. Если Вы не можете улучшить

акустику помещения по всем правилам (пропорции «золотого сечения» 0,618 : 1 : 1,618», разумного использования звукопоглощающих материалов, выбора места размещения АС, выбора точки прослушивания и т.д.), то Вам, действительно, стоит присмотреть мини-комплекс и успокоиться. В противном случае - идем дальше. С одной стороны, каждая комната звучит по-своему даже после внесения в обстановку всех разумных изменений. С другой стороны, каждый из нас знает особенность своего жилища, мы привыкли к «домашней» окраске звуков. Наш мозг подсознательно начинает трансформировать слышимое к его первоначальному колориту. Поэтому, что действительно необходимо попытаться сделать в комнате - это минимизировать стоячие волны, привести в приемлемое значение уровень реверберации, убрать или задемпфировать резонирующие предметы (поверхности) и организовать правильную зону прослушивания.

Второе. Появление новых источников звука, основанных на цифровых технологиях, таких как видео Hi-Fi (с ЧМ записью звука) магнитофоны, ПК (MP3), компакт- и мини-диски, предъявляет к АС новые требования: повышенная равномерность фазо-частотной и амплитудно-частотной характеристик, широкий динамический диапазон, минимальные интермодуляционные искажения. Природа искажений в АС обусловлена физической процессом звуковоспроизведения и настолько многогранна, что все виды искажений вряд ли можно устранить на практике. Однако, часть из них хорошо изучена в радиоловительском мире, а значит и поддается контролю в процессе конструирования. Главное правило должно быть таким: каждый вид искажений уменьшается *индивидуально и тщательно*.

Третье. Стоимость работ. В любом случае стоимость материалов и комплектующих, затраченных на изготовление хорошей «домашней» АС, будет несоизмеримо меньше стоимости АС, которую бы Вы приобрели, будь такая возможность. Значит, вкладывать в конструкцию свои знания, что называется «для себя» - очень выгодно.

Последнее. При покупке фирменной АС никто, кроме производителя, не даст Вам рекомендаций по ее размещению и правильной «настройке» под конкретную обстановку. Этой информации ни у продавцов, ни в Интернете нет - только субъективные мнения «экспертов» из тех же магазинов. За исключением некоторых моделей АС, к которым приложены распечатки измеренных АЧХ и коэффициента гармоник в рабочей полосе частот - практически любую фирменную акустику мы вынуждены покупать по принципу «кота в мешке».

Начинаем с выбора динамических головок. Это определяет тип АС, а именно, двухполосную или трехполосную конструкцию. По опыту скажу, что построить в домашних условиях трехполосную АС очень сложно. Затраты на исследование и эксперименты возрастают в два раза по сравнению с двухполосной АС. Попробуйте подобрать динамические головки для двухполосной АС из расчета их акустических мощностей (номинальная мощность с учетом чувствительности) НЧ-СЧ к СЧ-ВЧ как 1,5...3,0 к 1,0. Перекрытие частотных диапазонов головок должно составлять не менее 2 октав (4 раза), иначе не удастся обеспечить точное согласование и плавность переходов фазо-частотных характеристик головок в области частоты раздела фильтров. Разделительные фильтры желательнее применять 2-го порядка для НЧ и третьего для ВЧ головок. Эти, казалось бы, тривиальные требования на самом деле выполнить сложно, но проще, чем сделать то же самое для трехполосной АС.

Следующий параметр, который влияет на подбор пары головок - диаметры их диффузоров. Известно, что чем больше эффективный диаметр излучателя ($D_{эфф.} = D_g / \sqrt{2}$, D_g - диаметр диффузора, измеренный по центру гофра), тем уже диаграмма направленности головки на верхней рабочей частоте. Из-

вестна формула, связывающая угол направленности излучения динамической головки с длиной излучаемой волны (λ) и эффективным диаметром диффузора Дэфф. Излучение вперед в полупространство (π) обеспечивается при выполнении условия $\pi \cdot \text{Дэфф.} / \lambda = 0,25$ [1, 6]. На высоких частотах диаграмма излучения еще больше сужается. Например, для НЧ головки типа 6ГД-2 (Дэфф.=13 см) на частоте 7 кГц (пределной для головок этого типа, замеренной по оси излучения) диаграмма излучения имеет угол раскрытия порядка $\pi/24$ по уровню -3 дБ. Такая направленность излучения для использования в жилом помещении неприменима (кроме Вас, сидящего в центре зоны прослушивания, никто ничего не услышит). Это обуславливает выбор частоты раздела полос НЧ-ВЧ для данной головки в районе 1500...2000 Гц, при этом обеспечивает угол раскрытия диаграммы излучения порядка $\pi/6$.

При использовании НЧ головки с меньшим диаметром диффузора допустимая частота раздела полос может быть пропорционально повышена. Рассуждая аналогичным образом, выбор ВЧ головки следует сделать в пользу конструкций с малым диаметром излучающей поверхности (6ГДВ-1, 6ГДВ-6, 10ГДВ-2 и др.). Также рекомендуется произвести доработку выбранных динамических головок с целью снижения призывков и паразитных резонансов диффузоров по методикам, неоднократно приводимым в литературе [2].

Единственное, что не целесообразно, на мой взгляд, делать - это всеми путями снижать собственную добротность НЧ головки. Конструктивные параметры выбранной головки гораздо выгоднее измерить и учесть при расчете акустического оформления, выходных параметров усилителя мощности (УМ) и электрической схемы фильтров. В противном случае снижается КПД головки на низких частотах, что еще больше усложняет задачу согласования с ВЧ головкой для получения равномерной акустической АЧХ АС. Применение способов снижения собственной добротности низкочастотной головки имеет еще один существенный недостаток. Искажения фазы излучения АС, в которой установлена задемпфированная головка, на низких частотах имеет большую величину, нежели при использовании незадемпфированной головки и специальных цепей коррекции. Например, АС на 6ГД-2, $Q_{ts}=0,37$ (задемпфирована панелью акустического сопротивления) имеет ровную АЧХ, но сдвиг фазы на частоте 50 Гц - $+\pi/2$, в то время как при $Q_{ts}=0,71$ (без ПАС) с коррекцией АЧХ в УМ - сдвиг фазы на той же частоте составляет всего $+\pi/6$, т.е. в 3 раза меньше.

Следующий шаг - **выбор акустического оформления**. Для упрощения настройки разделительных фильтров АС и обеспечения большей свободы при размещении систем в комнате, рекомендуется выбрать конструкцию с отдельными корпусами для каждой из головок. Это позволяет перемещать ВЧ излучатель относительно НЧ по глубине для настройки фазы излучения в области частоты раздела фильтров, а в случае установки ВЧ головки в шарообразном корпусе на кольцевой подставке - направить акустическую ось ВЧ головки прямо на слушателя при любой ориентации корпуса низкочастотного звена.

Сколько существует конструкций корпусов для одних и тех же НЧ головок. Казалось бы, все они рассчитаны по одним и тем же известным методикам, но как различны и по объему и по типам. Измерив параметры 7 головок 6ГД-2 различных лет выпуска, действительно поражаешься результатам. Значения резонансной частоты головок F_r находятся в пределах 31...55 Гц, эквивалентной добротности Q_{ts} - 0,62...1,38, эквивалентного объема V_{as} - от 65 до 380 литров! Можно для экземпляра головки с эквивалентным объемом 65 литров и добротностью 0,62 рассчитать оформление с приемлемыми для жилой комнаты размерами, но для случая 300 литров и $Q_{ts}=0,93$ - вряд ли вас поймут семья и родные. В отношении компрессионных головок от 20ГДН-1 до 75ГДН-1 разброс параметров оказался меньше, но их значения сильно отличались от данных, приводимых в технических паспортах.

Приемлемым для домашней конструкции АС (с точки зрения толщины используемых материалов стенок корпуса, веса и размеров готовой АС, удобства размещения ее в комнате) является корпус объемом 30-45 литров. Причем корпус объемом 30-35 литров целесообразно выполнить с соблюдением внутренних размеров в пропорции «золотого сечения». Кор-

пуса больших объемов целесообразно выполнить в виде непольной конструкции с обязательной сшивкой противоположных боковых панелей распорками. Толщина материала корпуса 16-25 мм с обязательным оклеиванием внутренней поверхности линолеумом и поролоновыми ковриками толщиной 15-30 мм или самодельными матами (вата+марля) толщиной 20-30 мм. НЧ головку размещают у верхнего края узкой боковой панели, которая будет являться передней.

Нет никаких сомнений, что в большинстве случаев закрытая АС такого объема с установленной имеющейся в распоряжении низкочастотной головкой будет иметь результирующую добротность больше единицы, т.е. на АЧХ в районе резонансной частоты будет наблюдаться «горб» $+2...+6$ дБ. Более того, нижняя граница воспроизводимых частот такой АС составит 75-100 Гц, что явно недостаточно. Тем не менее, эти виды искажений АЧХ АС прекрасно моделируются математически [3] и могут быть предопределены выбором динамической головки, легко измерены и минимизированы активными фильтрами, включаемыми перед УМ или иным способом.

О выборе типа корпуса. Да, закрытая АС проще в изготовлении, но позволяет использовать потенциал динамической головки в области НЧ только на 25-40% независимо от собственной резонансной частоты головки! Причина этого кроется в невозможности динамической головки развить требуемый уровень акустической мощности в области резонансной частоты из-за конструкционных ограничений хода диффузора и, как следствие, появления больших нелинейных и интермодуляционных искажений. При уменьшении частоты воспроизводимого сигнала ниже 50-80 Гц большинство низкочастотных головок в закрытых АС объемом 30-45 литров физически не могут обеспечить уровень акустического давления на уровне, создаваемого этой же головкой при номинальной подводимой электрической мощности на частотах 300-2000 Гц. Спад максимальной акустической мощности (не путать с АЧХ) при уменьшении частоты ниже резонансной (F_s - резонансная частота головки в объеме корпуса АС) почти линейный с наклоном 24 дБ на октаву. Предлагаю Вам пересчитать максимальный уровень акустической мощности закрытой АС на частоте 30 Гц при F_s равной 60 Гц - получим аналог ... менее 1 Вт для 100-ваттной головки! Поэтому единственной приемлемой для создания «домашней» малолитражной АС является конструкция с применением фазоинвертора (ФИ).

На частотах воспроизводимого сигнала вблизи частоты настройки ФИ Фф амплитуда колебаний диффузора резко снижается. В результате этого уменьшаются нелинейные и интермодуляционные искажения, обусловленные конструкцией подвеса диффузора, граничными размерами магнитной системы и звуковой катушки. Однако, нелинейные искажения, вызванные недостаточной жесткостью диффузора, наоборот - увеличиваются. Все это говорит в пользу применения т.н. компрессионных головок. При корректной конструкции АС амплитуда колебаний подвижной системы головки на частоте настройки ФИ может быть в 25-30 раз меньше, чем на той же частоте в закрытом корпусе. Это значит, что на низких частотах АС с ФИ имеет гораздо больший динамический диапазон, нежели АС закрытой конструкции при сравнимых нелинейных и интермодуляционных искажениях.

Самое интересное заключается в выборе частоты настройки фазоинвертора Фф. Классический способ настройки Фф на резонансную частоту головки в свободном пространстве в подавляющем большинстве случаев оправдан. При этом достигается компромисс между равномерностью АЧХ и максимальной возможной акустической мощностью АС на частотах близких к резонансной (но не ниже Фф). Эквивалентная добротность НЧ головки Q_{ts} для этого случая должна находиться в пределах 0,35...0,55.

В случае использования в малогабаритной АС низкочастотных головок с высокой добротностью $Q_{ts}=0,65...1,5$ - вообще сложно или невозможно получить ровную АЧХ в корпусе любого объема. Поэтому целесообразно произвести настройку Фф на частоту в 2...3 раза (точнее - см. дальше) ниже резонансной частоты головки F_r . В то же время, АЧХ АС выше частоты Фф будет практически повторять АЧХ закрытой АС такого же объема. Чем ниже Фф, тем ближе сходство АЧХ. При низкой частоте Фф наблюдаются также меньшие фазовые искажения

и меньшее групповое время задержки излучения АС на низких частотах (рис. 1-4).

Головка 6ГД-2, $Q_{ts}=0,62$, $F_p=31$ Гц, $V_{as}=241$ л, $SPL=92,3$ дБ/Вт*м. Расчетные данные при различном акустическом оформлении:

1. АС с фазоинвертором, оптимальный объем 550 литров, $F_f=20$ Гц
2. АС с фазоинвертором, объем 32 литра, $F_f=25$ Гц
3. АС закрытого типа, оптимальный объем 386 литров
4. АС закрытого типа, объем 32 литра

Уровень 108 дБ обеспечивается головкой в широкой полосе частот 300-2000 Гц при номинальной подводимой

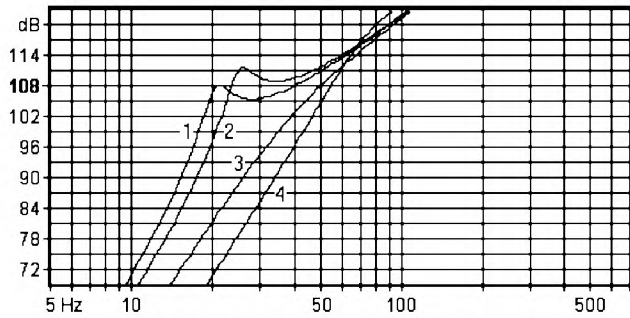


рис. 1 Максимальная акустическая мощность, дБ

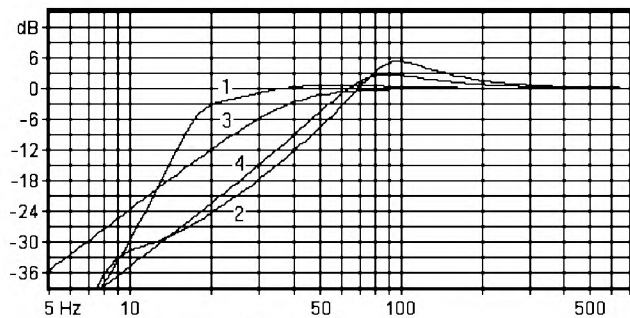


рис. 2 Расчетная АЧХ АС

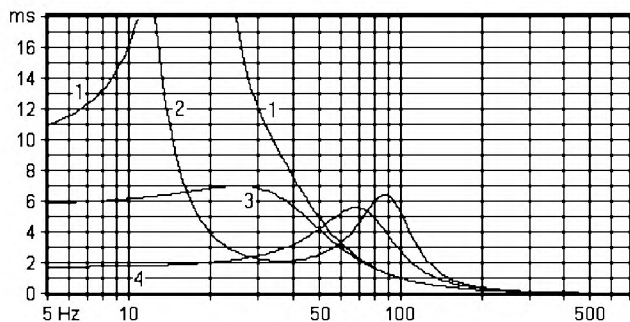


рис. 3 Групповое время задержки АС, мс. На низких частотах считается допустимой величина группового времени задержки до 8 мс

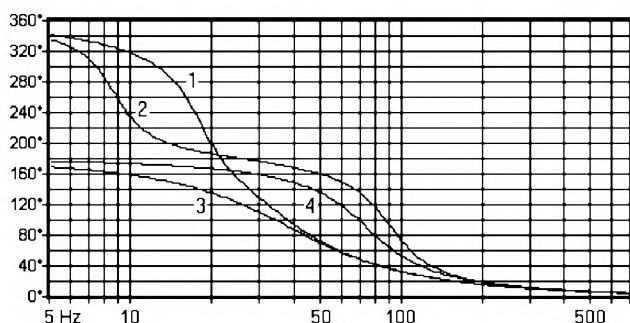


рис. 4 ФЧХ АС

мощности 6 Вт.

Расчетные размеры ФИ следующие:

- Для АС объемом 550 литров - диаметр 15 см, длина 7 см
- Для АС объемом 32 литра - диаметр 5 см, длина 24 см

В результате опытов с реальными динамическими головками удалось вывести приближенную формулу, по которой можно с точностью 10-15% рассчитать оптимальную (минимально возможную) частоту настройки ФИ ($F_{фи\ min}$) для конкретной низкочастотной головки. Иначе - это критерий определения частоты, начиная с которой конкретная динамическая головка (в АС с ФИ) способна обеспечить максимальное акустическое давление не меньшее, чем на средних частотах при подведении к ней номинальной электрической мощности:

$$F_{фи\ min} = 0,8 / \sqrt{Dg \cdot \sqrt{Ng}} \cdot SPL / X_{max}$$

где

Ng - число установленных в корпусе АС однотипных головок
 Dg - диаметр диффузора (по центру гофра), см
 SPL - чувствительность головки дБ/Вт*м
 X_{max} - максимальное смещение диффузора (в одну сторону), см.

Главное, что частота $F_{фи\ min}$, ниже которой максимальное акустическое давление, создаваемое головкой, начинает резко уменьшаться, практически не зависит ни от объема корпуса, ни от собственной резонансной частоты головки. Таким образом, не имеет никакого смысла производить расчет корпуса с ФИ, настроенным на частоту ниже $F_{фи\ min}$ - Вы не сможете получить приемлемую акустическую отдачу низкочастотной головки в корпусе АС даже очень большого объема, хотя АЧХ АС может быть оптимальной.

Примеры:

10ГД-34 (25ГДН-1-4): $F_{фи\ min} = 0,8 / \sqrt{10,5} \cdot 84 / 0,6 = 35$ Гц (98дБ)

6ГД-2: $F_{фи\ min} = 0,8 / \sqrt{21} \cdot 91,4 / 0,5 = 32$ Гц (104дБ)

10ГД-30 (20ГДН-1-4): $F_{фи\ min} = 0,8 / \sqrt{16,7} \cdot 86 / 0,8 = 21$ Гц (98 дБ)

30ГД-2 (75ГДН-1-4): $F_{фи\ min} = 0,8 / \sqrt{21} \cdot 86 / 0,8 = 19$ Гц (105 дБ)

Вы спросите: «Это секрет глубокого баса?» . Это реальные частоты настройки ФИ, вплоть до которых указанные головки могут обеспечить акустическое давление, соизмеримое с давлением на средних частотах при номинальной подводимой мощности.

Дальше - все просто:

1. Если головка имеет собственную резонансную частоту не ниже $F_{фи\ min}$ и добротность $Q_{ts}=0,3...0,5$, то смело рассчитывайте корпус с ФИ по известной методике [3]. В результате получите оптимальную АС с плоской АЧХ без применения дополнительной коррекции УМ.

2. Если головка имеет собственную резонансную частоту не ниже $F_{фи\ min}$ и добротность $Q_{ts}=0,6...1,5$, то имеется шанс создать АС любого приемлемого объема с ФИ, настроенным на частоту $F_{фи\ min}$. В этом случае ровная АЧХ АС может быть получена только с использованием соответствующей коррекции АЧХ УМ (корректор Линквица - см. ниже).

3. Если головка имеет собственную резонансную частоту $F_p < 0,85 \cdot F_{фи\ min}$, то можно подумать об установке в АС двух или более однотипных головок, а дальше по варианту 1 или 2 или вовсе отказаться от применения этого типа головок в низкочастотном звене Вашей АС.

Иные способы «заставить» низкочастотную головку работать на все 100% заключаются в построении двух-, трехобъемных АС с размещением НЧ головки внутри корпуса с излучением через порт (порты) ФИ. Подобную АС действительно сложно рассчитать в домашних условиях.

Немного о конструкциях фазоинверторов. Стандартная конструкция трубчатого ФИ должна удовлетворять следующим условиям: жесткость и отсутствие резонансных призвуков в материале трубы, диаметр отверстия (трубы) ФИ следует выбирать не меньше 1/4 диаметра диффузора низкочастотной головки. Поскольку ФИ как и динамическая головка является источником звуковых колебаний, труба ФИ не должна создавать никаких дополнительных призвуков. Постучите карандашом по стенке трубы ФИ. Если она «звенит», то обклейте внешнюю поверхность трубы ФИ в один слой резиной, линолеумом и/или обмотайте пластырем, изоляционной лентой (не

AUDIO HI-FI

скотчем) в 5-6 слоев. Отверстие ФИ на лицевой панели АС необходимо разместить не ближе 10-15 см от края низкочастотной головки. В принципе, выход ФИ можно разместить на любой боковой или задней стенке корпуса АС. Только в том случае, если АС будет установлена в пространстве между мебельными секциями или вплотную к стене или к другим предметам, ограничивающим излучение сбоку или сзади - отверстие ФИ обязательно располагают на лицевой панели. При расчете длины трубы ФИ исходят из того, что внутренний край трубы должен отстоять, по крайней мере, на расстояние ее диаметра от внутренней поверхности противоположной стенки корпуса АС. Если это условие не выполняется, то производят перерасчет ФИ с меньшим диаметром. Вместо одного ФИ можно применить два с внутренним диаметром 0,71 от рассчитанного одного ФИ. Полезно также скруглить торцы труб. Наполнение корпуса АС звукопоглотителем - по желанию, исключая область ФИ, но не более 15 г/литр.

Еще один вид искажений, влияющий на качество звучания любой АС - это **потери дифракции звуковых волн**. Этот тип искажений проявляется в частотной области 100-800 Гц и представляет собой плавное уменьшение акустического давления, создаваемого АС, ниже определенной частоты. Несмотря на то, что этот вид искажений хорошо известен, его описание в нашей радиолобительской литературе было подано *неверно*, видимо при первых переводах зарубежных статей на русский язык. Этот вид искажений нам объяснялся как «Искажения АЧХ различных форм корпусов АС» [6]. Тем не менее, при размещении АС «в стенке» искажения дифракции могут быть малы при любой форме корпуса. На самом деле, когда оклеивают внутреннюю поверхность стенок АС звукопоглощающим материалом можно сделать внутреннюю поверхность АС почти сферической. Изменится ли, в принципе, поведение АЧХ такой АС? - нет.

Суть вот в чем. На низких частотах длина волны, излучаемая АС гораздо больше физических размеров самой АС, поэтому звуковые волны огибают корпус АС, т.е. излучаются в пространство 2π (вокруг). На высоких частотах, где длина излучаемой волны меньше размера передней панели АС, излучение возможно только вперед, т.е. в полупространство [4]. Таким образом, при неизменной электрической мощности, подводимой к АС, и при горизонтальной АЧХ динамической головки (а в области 200-500 Гц редкие экземпляры НЧ головок имеют аномалии), начиная с некоторой частоты АЧХ системы по оси излучения возрастает до уровня +6 дБ. Наиболее плавное поведение АЧХ наблюдается при отсутствии острых внешних граней в конструкции АС (рис.5). В случае стандартного корпуса АЧХ искажений дифракции имеет локальные минимумы и максимумы, но с увеличением частоты отдача АС по оси излучения все равно повышается в 2 раза (рис.6).

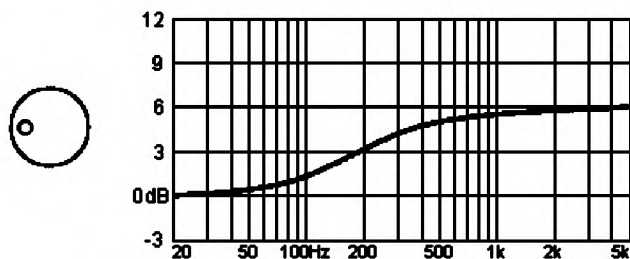


рис.5 Дифракционные потери шарообразной АС

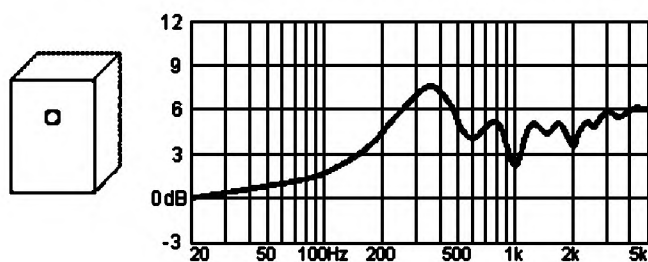


рис.6 Дифракционные потери обычной АС

Средняя частота (Гц), на которой отдача АС (в идеале) повышается на 3 дБ может быть рассчитана в Гц по следующей эмпирической формуле: $Fd=115/W$, где W-ширина передней панели АС в метрах.

Величина искажений, обусловленная потерями дифракции +6 дБ имеет место быть только при размещении АС в свободном пространстве, коим жилая комната не является. Низкочастотные звуковые волны, огибающие АС, в какой-то мере отражаются от стены, около которой обычно устанавливаются АС и приходят к слушателю. Таким образом, реально измеренное значение потерь составляет 3-4 дБ. О существовании искажений дифракции можно убедиться по АЧХ промышленных АС, приводимых изготовителями (рис.7-9):

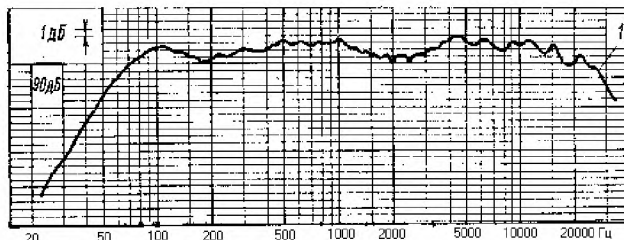


рис.7 - АЧХ 75АС-001 «Корвет», ширина передней панели 386 мм, $Fd=300$ Гц

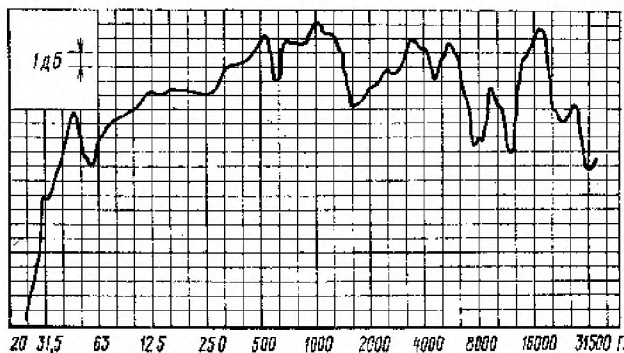


рис.8 - АЧХ 35АС-021 «Эстония», ширина передней панели 320 мм, $Fd=360$ Гц

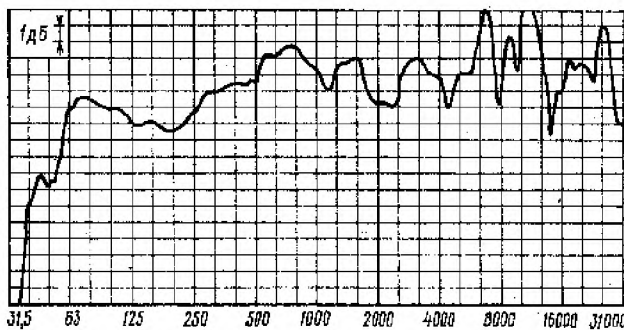


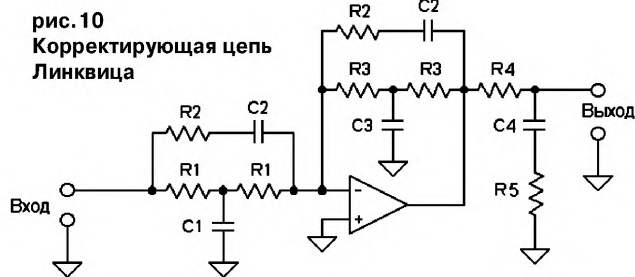
рис.9 - АЧХ 15АС-111 «Вега», ширина передней панели 264 мм, $Fd=435$ Гц

Компенсировать эти искажения АЧХ довольно просто включением в звуковоспроизводящий тракт между предварительным усилителем и усилителем мощности простейшей корректирующей цепочки R4C4R5 (рис.10). Выбрав отношение сопротивлений $R4=R5/2$ (величина коррекции - около 3,5 дБ) и их номиналы в кОм, определяем емкость C4 в мкФ по формуле: $C4=130/(R5*Fd)$.

Пример расчета:

1. Ширина передней панели АС: 25 см
2. Определяем частоту $Fd=115/0,25=460$ Гц
3. Выбираем $R5=4,7$ кОм, $R4=4,7/2=2,4$ кОм
4. Определяем $C4=130/(4,7*460)=0,062$ мкФ (62 нФ)

Необходимо отметить, что искажения потерь дифракции можно компенсировать один раз и навсегда для конкретных АС (или аналогичных им по размерам), после чего о существовании какой-либо коррекции можно просто не вспоминать.



После применения такой коррекции к некоторым АС последние могут начать «бубнить». Это вполне нормально, т.к. результирующая добротность большинства АС малого объема, построенных на распространенных НЧ головках, заведомо выше 0,71. Каждый любитель высококачественного звукопроизводства мог заметить, что при размещении АС на подставках высотой 0,4...0,7 метра, особенно если их еще и отодвинуть от стены на 0,3...0,6 метра, заметно падает уровень отдачи АС на НЧ. В этом случае интуитивно увеличивают уровень сигнала на НЧ регулятором тембра +3...+5 дБ и что наблюдают? Правильно - более «верное» звучание и, может быть, «бубнение». Регулятор тембра НЧ усилителя в этом случае уменьшает как раз искажения дифракции звуковых волн. Кстати, такое размещение АС вдоль длинной стены комнаты является самым оптимальным с точки зрения минимизации влияния на АЧХ АС акустики помещения.

А теперь представьте АЧХ АС, изображенных на рисунках 7-9, если бы конструкторы этих «бытовых» АС позаботились о компенсации пассивными фильтрами такого вида искажений. АС «Корвет» и «Вега» - «бубнили» бы, а «Эстония» - нет. Кстати, первая выполнена в закрытом корпусе, «Эстония» и «Вега» - с ФИ, настроенным на 40-45 Гц. Анализ АЧХ этих АС показывает, что:

- 15АС-111 «Вега» - из-за высокой добротности используемой в АС низкочастотной головки АЧХ имеет подъем на частоте 80-90 Гц на 2-3 дБ (добротность АС равна 1,3). В любом случае наблюдается «бубнение» и требуется коррекция АЧХ активными фильтрами. Применение ФИ, настроенного на 40 Гц, близко к оптимальному (35 Гц), но должно быть использовано не для коррекции АЧХ, а совсем для другой цели - обеспечивать максимальную акустическую мощность НЧ головки.

- 35АС-021 «Эстония» - практически самая ровная АЧХ, но настройка ФИ на частоту 45 Гц не позволяет полностью использовать потенциал НЧ головки. Было бы выгодно на 15-20% увеличить объем корпуса и снизить частоту настройки ФИ до 21-27 Гц.

- 75АС-001 «Корвет» - имеет не спад на частоте 180 Гц на 3 дБ, а подъем на частоте 90-95 Гц на 3 дБ, вызванный результирующей добротностью АС, равной 1,3-1,4 из-за малого объема корпуса. Акустическая мощность АС на низких частотах обеспечивается только за счет качественной низкочастотной головки 100ГДН-3. Желательно применить ФИ и корректор АЧХ.

Таким образом, если результирующая добротность АС составляет 1,1...2, т.е. на АЧХ АС наблюдается подъем +1...6 дБ в области 60-110 Гц (явные признаки «бубнения»), а объем АС по крайней мере в 2-3 раза меньше эквивалентного объема низкочастотной головки V_{as} , то есть смысл применить коррекцию АЧХ на активных фильтрах по **схеме Линквица** (Linkwitz Transform Circuit), пример схемы показан на **рис. 10** (исключая R4C4R5).

Одновременно с коррекцией АЧХ схема обеспечивает локальную коррекцию фазы сигнала в области ниже резонансной частоты, что снижает фазовые искажения АС. АЧХ и ФЧХ корректора показаны на **рис. 11** и **рис. 12**.

Характеристики рассчитаны для добротности АС объемом 32 литра, равной 1,8 на частоте 98 Гц для получения горизонтальной АЧХ по звуковому давлению от 500 до 32 Гц (-3 дБ) при результирующей добротности, равной 0,71 (НЧ головка 6ГД-2, $Q_{ts}=0,62$, $F_p=31$ Гц).

АЧХ корректора имеет подъем крутизной 12 дБ на октаву в низкочастотной области для компенсации аналогичного по

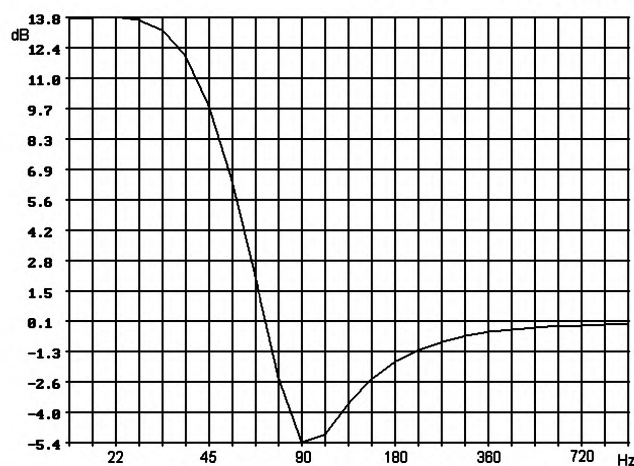


рис. 11. АЧХ корректирующей схемы по Линквицу

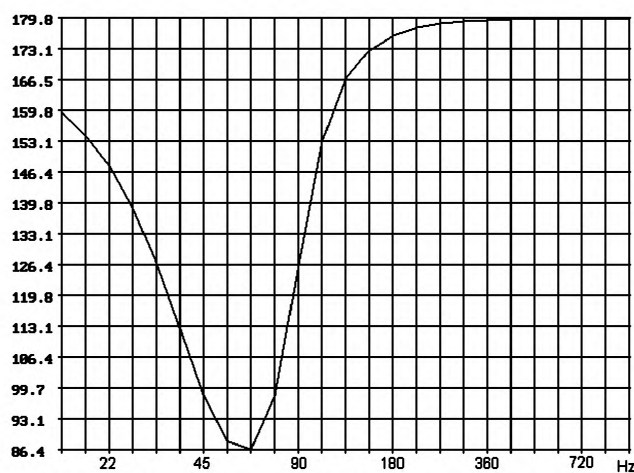


рис. 12. ФЧХ корректирующей схемы по Линквицу

характеру спада АЧХ закрытой АС. Но как раз на этих частотах перегрузочная способность закрытой АС низкая. Поэтому оптимальным является применение такой коррекции АЧХ для АС с ФИ, настроенного на частоту $F_{\text{фи min}}$.

Определить это для готовой (или строящейся) АС достаточно просто. Вначале закрываем и герметизируем отверстие фазоинвертора и замеряем модуль сопротивления низкочастотной головки в закрытом корпусе АС. По максимальному значению модуля сопротивления определяем резонансную частоту низкочастотной головки F_s в корпусе АС. Затем открываем отверстие ФИ и вновь замеряем модуль сопротивления головки. Определяем резонансную частоту ФИ F_f по минимуму модуля сопротивления. Обычно на частотах выше и ниже найденного минимума модуль сопротивления головки имеет явно выраженные пики. Если F_f выше или равна F_s , то ФИ АС настроен неправильно в любом случае. Если F_f выше, чем $F_{\text{фи min}}$, то увеличивают длину трубы ФИ пропорционально квадрату желаемого понижения F_f и настраивают ФИ на частоту $F_{\text{фи min}}$. В случае, когда труба ФИ расчетной длины физически не может быть установлена в корпусе АС, применяют трубу меньшего диаметра.

Бытует мнение, что установка в АС еще одного ФИ, аналогичного уже имеющемуся, понижает частоту настройки ФИ. Это мнение ошибочно. На самом деле частота настройки ФИ возрастает в $\sqrt{2}$ раз при одновременном понижении скорости воздуха внутри ФИ, что в некоторых случаях полезно (к тому же труба меньшего диаметра жестче). Другими словами, установка двух идентичных ФИ эквивалентна применению одного ФИ такой же длины с внутренним диаметром в $\sqrt{2}$ раз больше, чем диаметр трубы одного из ФИ пары.

Теперь необходимо определить результирующую добротность НЧ головки на частоте F_s в АС с ФИ, настроенным на

AUDIO HI-FI

частоту $F_{\text{фи min}}$. В домашних условиях через непосредственное измерение АЧХ АС по звуковому давлению сделать это практически невозможно. Гораздо проще и точнее получить значение добротности АС расчетным путем на ПК с использованием специализированного программного обеспечения. Однако, любые методы математического моделирования предполагают до 10-30 известных параметров конкретной динамической головки, которые опять же в домашних условиях измерить сложно.

Предлагаю **очень простой способ определения добротности АС** с точностью около 10-15%, для которого потребуются дополнительно любой электретный микрофон (МЭК-3) и предварительный усилитель для него с ровной АЧХ от 10 до 10000 Гц. Вновь закрывают и герметизируют отверстие ФИ АС (если таковое имеется). После этого размещают микрофон в непосредственной близости 2-5 мм от диффузора низкочастотной головки на расстоянии 2/3 радиуса диффузора от его центра. К выходу микрофонного усилителя подключают вольтметр переменного напряжения и подают на головку сигнал от генератора ЗЧ (через УМ с ровной АЧХ). Мощность, подводимая к головке, не должна превышать 0,1-0,5 Вт. Изменяя частоту генератора от 500 до 20 Гц, строят АЧХ АС. Убеждаются в наличии «горба» в области F_s и спада АЧХ крутизной 12 дБ/октаву ниже этой частоты. Находят отношение максимального выходного напряжения на частоте близкой или немного выше F_s к выходному напряжению на частоте 500 Гц. Полученное значение возводят в квадрат. Результат и будет равен значению добротности АС с ФИ.

Приверженцы любых способов снижения добротности НЧ головки (ПАС, отрицательное выходное сопротивление УМ и др.) на этом этапе могут подобрать количество звукопоглощающего материала в корпусе закрытой АС (конструкцию ПАС, величину $R_{\text{вых УМ}}$) до получения желаемого значения добротности. При использовании значительного количества звукопоглощающего материала, но не более 15...23 г/литр [7], желательно при помощи проволочного каркаса между ФИ и низкочастотной головкой «организовать» свободное пространство объемом 3-5 литров.

Для тех, кто может рассчитать или определить значение добротности низкочастотной головки (с известными измеренными параметрами), установленной в конкретный корпус АС, существующие стандартные способы предпочтительнее. Результаты измерений добротности и резонансной частоты головки в закрытой АС (F_s) могут быть использованы для выбора номиналов корректора (рис. 10) только для случая, когда ФИ будет настроен на частоту $F_{\text{фи min}}$, как минимум в 2 раза ниже частоты F_s .

Приступаем к определению номиналов RC корректирующего каскада. Операционный усилитель рекомендуется 157УД2 (для стереофонического варианта корректора, цепи коррекции ОУ - для единичного усиления). Поскольку расчет элементов корректора довольно сложен, результаты компьютерного расчета значений RC приведены в **таблице 1** для различных значений добротности АС и частоты $F_s=80$ Гц. При других значениях частоты F_s номиналы емкостей конденсаторов просто пересчитываются по формуле: $C1' = 80 C1/F_s$.

Аналогично пересчитываются емкости конденсаторов $C2$ и $C3$. Можно оставить емкости конденсаторов неизменными, а пересчитать таким же образом сопротивления $R1-R3$. Един-

ственное ограничение - сопротивление резистора $R2$ не должно быть меньше 2 кОм, т.к. является основной нагрузкой ОУ на высоких частотах.

При включении корректора перед УМ (перед темброблоком) реальная АЧХ системы по звуковому давлению будет горизонтальной с допуском ± 2 дБ до нижней рабочей частоты (указана в таблице, при условии $F_{\text{фи min}} < F(-3\text{дБ})$), а эквивалентная добротность АС равна 0,71.

Номиналы RC необходимо подобрать с точностью 1%. При значениях добротности АС, равной 1,6 и выше (4-5-6-7 строки таблицы 1), корректор имеет значительный подъем АЧХ на частотах 30-20 Гц (13-16-20-24 дБ). Для предотвращения явной перегрузки УМ и АС реальным сигналом, снимаемым с выхода корректора, на входе УМ (или темброблока) желательно применить ФВЧ первого порядка с частотой среза 30-35 Гц. Это можно сделать заменой (или установкой) конденсатора на входе УМ, емкость которого в нФ рассчитывается по формуле $5000/R_{\text{вх}}$, где $R_{\text{вх}}$ - входное сопротивление УМ (или темброблока), кОм.

Звучание АС, АЧХ которой скорректирована двумя указанными способами, Вас не просто порадует - поразит. Вы наконец-то ощутите полное отсутствие окраски звука в НЧ диапазоне - «бубнения» не станет как такового. Регулировка тембров усилителя по НЧ будет наконец-то работать как ей и положено - эффективно. Совершенно достаточной окажется глубина регулировки тембра по НЧ $\pm 3-5$ дБ. Отдача по звуковому давлению на нижней рабочей частоте АС будет максимально возможной для примененной низкочастотной динамической головки.

Моделирование и непосредственное измерение характеристик головок и АС (для подтверждения результатов расчетов) выполнялось с помощью мультимедийного ПК класса Intel Pentium III с калиброванной звуковой платой (АЧХ 15...17000 Гц $\pm 0,2$ дБ). Использовалось различное свободно распространяемое программное обеспечение, в том числе демонстрационные версии программ от фирм JBL, Vlaupunkt и Peerless (эмуляторы генераторов сигналов, измерители АЧХ на «белом» шуме, 1/2-1/12 октавные анализаторы спектра на «розовом» шуме, программы для расчета параметров закрытых АС, АС с ФИ и др.) Настройками программного обеспечения устанавливалось частотное разрешение менее 0,3 Гц. Дополнительно использовались: УМ 60 Вт с незначительными искажениями в диапазоне 10-40000 Гц и электретный микрофон (в комплекте с предусилителем) с известной АЧХ в диапазоне 30-15000 Гц $\pm 1,0$ дБ.

Правильность выводов была проверена экспериментально следующим образом. Приобретенные «по случаю» закрытые АС «Bifrons» (ВНР, г.Будапешт, завод «ВЕАГ», 1975 г.в., объем 36 литров, многослойный корпус из массива с заполнением ватой 12 г/литр, установлено 9 (!) широкополосных головок типа ВЕАГ НХ-125-8 номинальной мощностью 12 Вт каждая и резонансной частотой 68-71 Гц, $Q_{ts}=1,02...1,08$) прекрасно воспроизводили классическую музыку, джаз. Как только речь заходила о прослушивании рока или современной электронной музыки - колонки сразу «сдавали» свои позиции (это при 108 Вт номинальной мощности и чувствительности 88 дБ/Вт*м). Измерение параметров головок НХ-125-8 и моделирование АС на ПК показало все минусы заводской разработки. При закрытой конструкции эти АС практически не могли выдать даже той мощности, которую разви-



Таблица 1

Добротность головки в АС с ФИ ($F_s=80$ Гц)	R1, кОм	R2, кОм	R3, кОм	C1, нФ	C2, нФ	C3, нФ	Нижняя частота АС, Гц $F(-3\text{дБ})$
1,0	12,2	18,0	54,1	566	47,0	128	0,48 F_s
1,2	13,2	8,83	58,6	482	47,0	108	0,48 F_s
1,4	14,0	2,32	61,9	432	47,0	97,5	0,48 F_s
1,6	12,2	2,12	71,5	569	47,0	96,8	0,41 F_s
1,8	23,8	2,65	169	318	22,0	44,7	0,38 F_s
2,0	21,5	2,31	188	391	22,0	44,5	0,34 F_s
2,5	16,7	2,79	242	646	22,0	44,5	0,26 F_s

