

Громкоговорители

Часть 1. Термины, определения, история развития.

Одним из самых знаменитых изобретений XX века является *громкоговоритель*. Именно его появление (наряду с микрофоном) обеспечило возможность развития систем звукозаписи и звуковоспроизведения. В настоящее время громкоговорители относятся к самым массовым видам звуковой аппаратуры (по приблизительным подсчетам их промышленный выпуск достигает 500 млн. штук в год). От качества звучания громкоговорителей в значительной степени зависит качество звука в системах звукоусиления, радиовещания, телевидения, звукозаписи и домашнего воспроизведения. Именно поэтому исследованием физических процессов преобразования звука в громкоговорителях, созданием их математических моделей и алгоритмов, программных продуктов для их расчета и проектирования занимаются десятки университетов и научных центров, а производством — сотни крупнейших фирм. Неудивительно, что практически на всех международных конгрессах AES (Audio Engineering Society) работают специальные научные секции и семинары, посвященные этим проблемам, а на выставках в рамках этих конгрессов представляются новые модели и технические решения.

В предлагаемой серии статей, посвященной громкоговорителям, будет рассказано о принципах работы, конструкции и технологии современных громкоговорителей и методах их расчета.

В первой статье будут даны основные термины и определения, а также краткая история развития громкоговорителей.

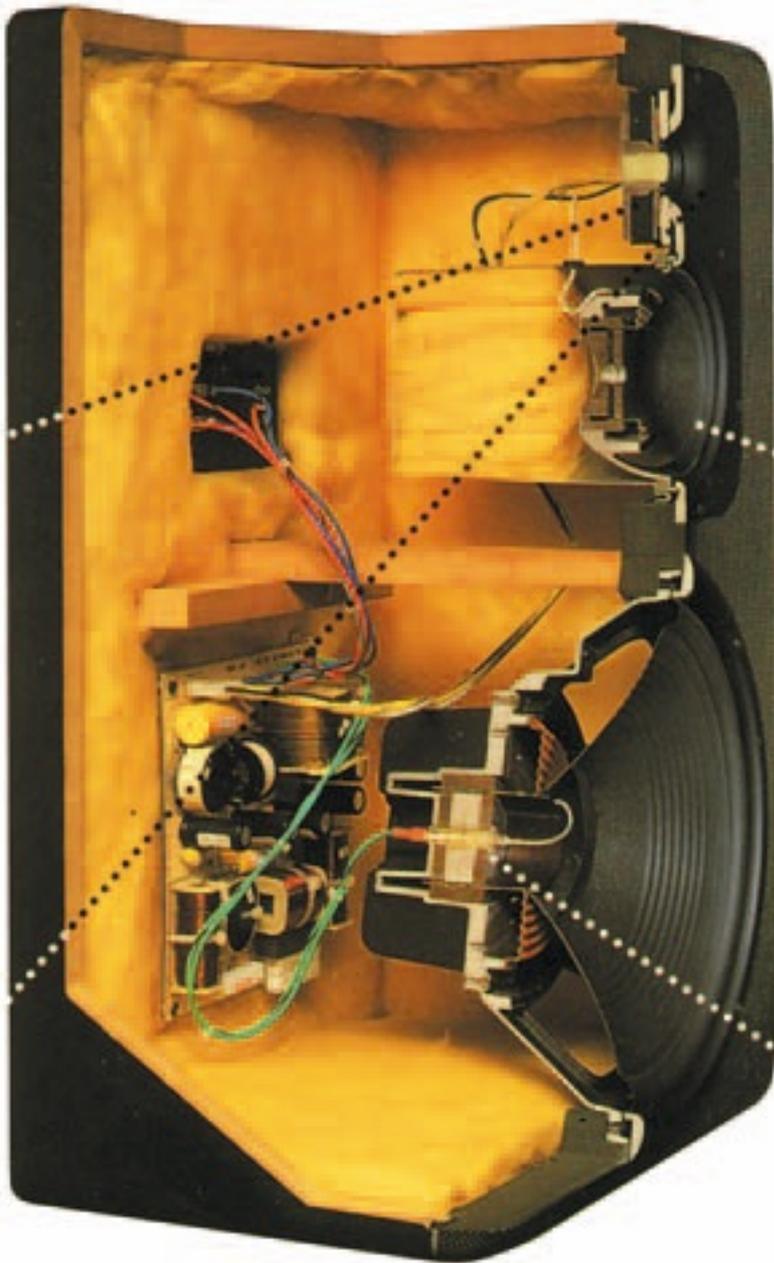
Терминология

Прежде всего, необходимо остановиться на принятой в настоящее время терминологии в международных и отечественных стандартах и технической литературе (поскольку здесь существует большая путаница). В соответствии с международными и отечественными стандартами термин "громкоговоритель" применяется к "устройствам, предназначенным для эффективного излучения звука в окружающее пространство в воздушной среде, содержащим одну или несколько головок громкоговорителей при наличии акустического оформления и электрических устройств (фильтров, регуляторов и т. д.)". Таким образом, этот термин обозначает любой акустический преобразователь, излучающий звук в воздушную среду. Одиночный излучатель обозначается в отечественном стандарте ГОСТ 16122-87 как "головка громкоговорителя" (в зарубежных каталогах иногда используются термины "loudspeaker unit", "loudspeaker drive element" или "driver").

Однако в технической литературе (учебниках, статьях и пр.) термин "громкоговоритель" применяется, в основном, для одиночного

громкоговорителя. Устройство, содержащее громкоговорители, фильтры, корпус и другие части, называется "акустическая система". В зависимости от области применения, она может обозначаться как "акустическая система" (в основном, для домашнего применения), "акустический студийный агрегат" ("контрольный агрегат", "монитор"), "звуковая колонка" и т. д. В зарубежной литературе часто используются термины "acoustical system" или "loudspeaker system". Поэтому каждый раз приходится понимать по содержанию, о чем идет речь: о головках громкоговорителей или об акустических системах.

Независимо от области применения (в студийной технике, в системах звукоусиления, в домашних системах звуковоспроизведения) все громкоговорители (акустические системы) состоят из следующих основных элементов (рис. 1):



- *излучателей* (головок громкоговорителей), каждый из которых (или несколько одновременно) работает в своем частотном диапазоне;
- *корпуса*, который может состоять как из нескольких отдельных блоков (каждый для излучателей своего диапазона), так и представлять единую конструкцию;
- *фильтрующе-корректирующих цепей*, а также других электронных устройств (например, для защиты от перегрузок, индикации уровня и т. д.);

- звуковых кабелей и входных клемм; усилителей (для активных акустических систем) и кроссоверов (активных фильтров), в случае применения отдельных усилителей для каждой полосы частот. Набор элементов (количество головок громкоговорителей, использование активных или пассивных фильтров, форма и конструкция корпусов и т. д.) может значительно варьироваться для разных видов акустических систем в зависимости от их назначения, но принципы их построения, методы расчета и технология изготовления во многом похожи.

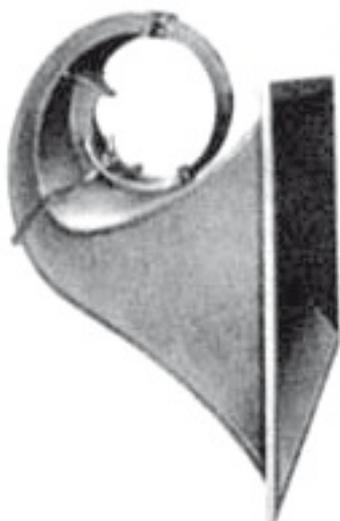
Прежде чем переходить к анализу этих вопросов, кратко остановимся на истории создания основных элементов громкоговорителей (излучателей, корпусов, фильтров).

История развития

Попытки создания первых излучателей звука начались в конце XIX века. В 1874 году немецкий инженер Эрнст Вернер фон Сименс (Ernst Werner von Siemens), основатель компании Siemens, описал магнитоэлектрический аппарат, в котором круглая катушка с намотанной проволокой располагается в радиальном магнитном поле со специальной поддержкой для обеспечения возможности вертикального смещения (патент номер 149797). Он указал тогда, что этот двигательный механизм может использоваться для получения звука, но не продемонстрировал это на практике. В 1877 году Сименс зарегистрировал в Германии и Англии еще два патента, в которых были описаны основные черты электродинамического громкоговорителя,

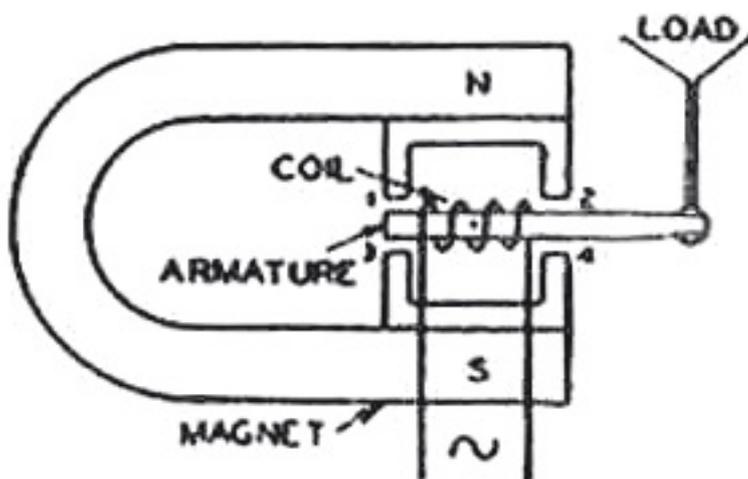
впоследствии использовавшиеся в различных промышленных конструкциях.

В 1876 году американский ученый Александр Белл (Alexander Bell) запатентовал телефон и продемонстрировал его звучание с использованием преобразователя очень похожего типа. В период 1898-1915 годов был зарегистрирован целый ряд патентов (изобретатели Oliver Joseph Lodge, John Matthias Augustus Stroh, Anton Pollak и др.), касающихся введения отдельных элементов: конической диафрагмы, центрирующей шайбы и т. д. Все эти излучатели работали с рупорами, первые образцы которых показаны на рис. 2.



В период 1915-1918 годов инженеры Harold D. Arnold и Henry Egerton из фирмы Bell Labs создали головки громкоговорителей, работающие по принципу "балансной арматуры" (иногда этот принцип называют "уравновешенный якорь", но "балансная арматура" — устоявшийся термин). В этой конструкции переменный ток подавался на обмотку, расположенную на стальном стержне, который двигался за счет взаимодействия с магнитным полем и, соответственно, толкал конус,

нагруженный на рупор (рис. 3). Хотя из-за большой жесткости арматуры диапазон воспроизведения был очень ограничен, такое устройство использовалось вплоть до 30-х годов XX века. Первые модели рупорных громкоговорителей для систем озвучивания в театрах и на улицах (например, в 1919 году в Нью-Йорке на Park Avenue, в 1920 году в Чикаго на республиканском конгрессе и т. д.) использовали излучатели именно этого типа.



The balanced armature drive unit

Революционный перелом в развитии электродинамических громкоговорителей произошел в 1925 году, когда инженеры Честер Райс (Chester W. Rice) и Эдвард Келлог (Edward W. Kellogg) из фирмы General Electric (США) опубликовали статью "Заметки по созданию нового типа безрупорного громкоговорителя" в журнале "Труды американского общества электроинженеров" (т. 44, апрель 1925 года). Эти инженеры навсегда вошли в историю звукотехники как первооткрыватели одного из великих изобретений XX века, основные элементы конструкции которого сохранились до настоящего

времени. Фактически был создан электродинамический преобразователь со звуковой катушкой и диафрагмой, работающей в диапазоне выше ее резонансной частоты. На этом принципе был разработан первый лабораторный макет громкоговорителя и одновременно собран макет лампового усилителя, обеспечивающего достаточную мощность в полном диапазоне частот. Уже в 1926 году появилась первая промышленная модель такого громкоговорителя под названием Radiola Model 104 со встроенным усилителем мощностью 1 Вт. Одновременно на рынок был выпущен радиоприемник Radiola 28, который работал с данным громкоговорителем. С этого момента в мире началось массовое производство таких громкоговорителей.

Интересно отметить, что почти одновременно работы по созданию электродинамических громкоговорителей велись и в России. В 1923 году в Петрограде была создана Центральная радиолaborатория (ЦРЛ), позднее переименованная в Институт радиовещательного приема и акустики (ИРПА). С первых дней создания в ИРПА проводились разработки громкоговорителей. В 1926 году был создан электромагнитный громкоговоритель "Рекорд" и электромагнитный рупорный уличный громкоговоритель ТМ, которые начали выпускаться на заводе им. Кулакова. В 1929 году А. А. Харкевич и К. А. Ламагин разработали в ИРПА первый образец динамического громкоговорителя (прямого излучения и рупорного), производство которых

было начато в 1931 году на заводе им. Козицкого и на Киевском радиозаводе.

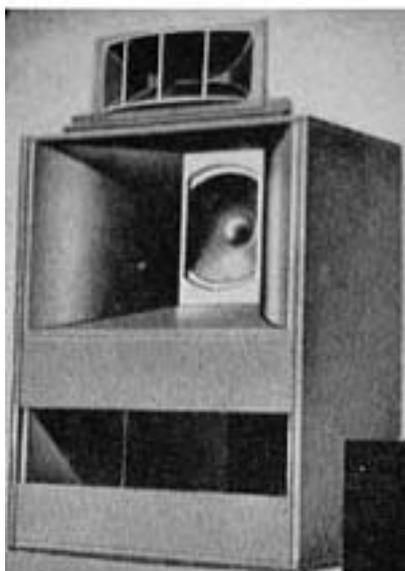
Уже в 1930-32 годах были созданы первые мощные громкоговорители для звукоусиления на Красной площади в Москве (мощностью 100 Вт). С 1935 года в стране начался массовый выпуск

электродинамических громкоговорителей. Нужно отметить, что объем их выпуска неуклонно нарастал. К началу 90-х объем выпуска электродинамических громкоговорителей в нашей стране составлял 70 млн. в год (Рязанский радиозавод — объем выпуска 15 млн. в год, Гагаринский радиозавод — 13 млн., Бердский радиозавод, НПО "Радиотехника" в Риге и др.).

С появлением промышленных образцов электродинамических громкоговорителей практически все модели рупорных громкоговорителей стали использовать их в качестве излучателей. Создание рупорных громкоговорителей с конструкцией, близкой к современной, началось с работы инженеров Альберта Турса (Albert L. Thuras) и Эдварда Венте (Edward Christopher Wentе), в 1927 году запатентовавших узкогорлый рупорный громкоговоритель, в котором использовалась предрупорная камера и специальная линза (тело Венте).

Развитие звукового кино потребовало создания акустических систем, обеспечивающих достаточную громкость и разборчивость звука. Это привело к появлению многополосных систем. Одной из первых была продемонстрированная Дугласом

Ширером (Douglas Shearer) двухполосная акустическая система, состоящая из низкочастотных свернутых рупоров и высокочастотного многоячеистого рупора с использованием электродинамических громкоговорителей. Система воспроизводила диапазон 40-10000 Гц и имела довольно высокую чувствительность (рис. 4). В 1938 году она получила премию Академии киноискусств и наук, и стала своего рода эталоном для последующего развития многополосных систем озвучивания в кино, театрах и др.



С началом создания многополосных акустических систем появилась необходимость в использовании разделительных фильтров между низко-, средне- и высокочастотными громкоговорителями. Первая статья по теории фильтров для громкоговорителей появилась в 1936 году (авторы John K. Hilliard и Harry R. Kimball). В ней была дана теория расчета фильтров Баттерворта первого-третьего порядка, которые к 50-м годам были признаны как наиболее предпочтительная форма для акустических систем.

В период 1940-50 годов развивались, в основном, мощные рупорные акустические системы и соответствующие головки громкоговорителей для профессиональных целей озвучивания залов кино и театров (фирмы JBL, Altec Lansing и др.).

В домашних условиях использовались большие электродинамические головки без оформления. Однако из-за короткого акустического замыкания в них не удавалось получить низкие частоты. Первые многополосные акустические системы использовали большие корпуса "открытого типа" объемом 300-500 куб. дм (литров), при этом воспроизводимый диапазон частот начинался с 80-100 Гц.

Подлинная революция в бытовой технике началась с 1954 года, когда один из основателей фирмы AR (Acoustical Research) Edgar M. Villchur показал на выставке в Нью-Йорке маленькую акустическую систему AR-1, основанную на совершенно новом принципе, получившем название "акустический подвес" или корпус "компрессионного типа". Идея этого изобретения, открывшего дорогу современным системам домашнего применения, состояла в том, что для получения низких частот использовался корпус маленьких размеров, упругость воздушного объема в котором более чем в три раза превышала упругость подвеса низкочастотного громкоговорителя. В этом случае подвижная система громкоговорителя как бы "садится" на упругую воздушную подушку. Поскольку воздух — среда линейная, то это позволяет увеличить смещение диафрагмы

громкоговорителя без увеличения нелинейных искажений и, тем самым, получить воспроизведение низких частот в небольшом объеме.

Создание таких систем потребовало изменения принципов проектирования низкочастотных громкоговорителей, они должны были обладать тяжелой подвижной системой, гибким подвесом, большой звуковой катушкой и магнитной цепью для обеспечения возможности подведения большой мощности от усилителей. Появление маленькой по объему акустической системы, которая уверенно воспроизводила низкочастотную часть диапазона, вызвало изумление специалистов и открыло широкую дорогу для развития домашних акустических систем категории Hi-Fi.

Концепция создания аппаратуры High-Fidelity (высокая верность; то есть аппаратуры, обеспечивающей максимальное соответствие живому звуку), выдвинутая в 60-е годы фирмой KEF (Англия), послужила мощным толчком в развитии как бытовых, так и профессиональных акустических систем: совершенствовании конструкции всех элементов (головок громкоговорителей, корпусов, фильтров), технологии их изготовления, разработке новых методов измерения параметров, а также создании теории их расчета. К производству и разработке громкоговорителей подключились сотни фирм, научных центров и университетов.

Прогресс в развитии корпусов акустических систем был связан, прежде всего, с появлением большого

разнообразия их конструкций: наряду с закрытыми корпусами компрессионного типа (о которых сказано выше), в 1959 году инженер James F. Novak из компании Jensen представил концепцию создания корпусов с фазоинвертором (идея была запатентована Альбертом Турасом еще в 1930 году), что позволило увеличить уровень звукового давления в области низких частот.

В настоящее время используется большое многообразие конструкций низкочастотных оформлений: с пассивным излучателем, с двойной камерой, типа "лабиринт", типа "полосовой фильтр" и др. Каждый из них имеет свои достоинства и недостатки (об этом поговорим в следующих статьях). Принципиально важным этапом в их развитии явилась создание в 1971-1973 годах теории расчета низкочастотных оформлений (авторы Neville Thiele и Richard Small), основанной на аналогии с теорией фильтров. Это позволило перевести на научную основу проектирование корпусов, создать соответствующие компьютерные программы, которые широко используются в практике проектирования громкоговорителей. Для обеспечения качественного воспроизведения средних и высоких частот были отработаны различные способы звуко- и виброизоляции, а также созданы овальные формы корпусов (в основном для высокочастотных громкоговорителей) для снижения дифракционных искажений.

Поскольку подавляющее большинство акустических систем строилось по многополосному принципу, это обусловило значительный прогресс в

создании разделительных фильтров, которые стали выполнять не только функции разделения частотной полосы между низко-, средне- и высокочастотными громкоговорителями, но симметризовать характеристику направленности в области полосы разделения. В настоящее время имеется большое количество компьютерных программ, которые позволяют оптимизировать параметры фильтров, например, CACD, CALSOD, Filter Designer and LEAP4.0 и др.

Существенные изменения произошли и в головках громкоговорителей. Наряду с электродинамическими, начали выпускаться излучатели, построенные на других принципах преобразования: электростатические, излучатели Хейла, пьезопленочные и т. д. (подробнее о них поговорим в следующих статьях).

Что касается электродинамических громкоговорителей, то предложенная Райсом и Келлогом конструкция оказалась настолько удачной, что принципиальных изменений в ней не произошло, прогресс шел в основном в области технологии.

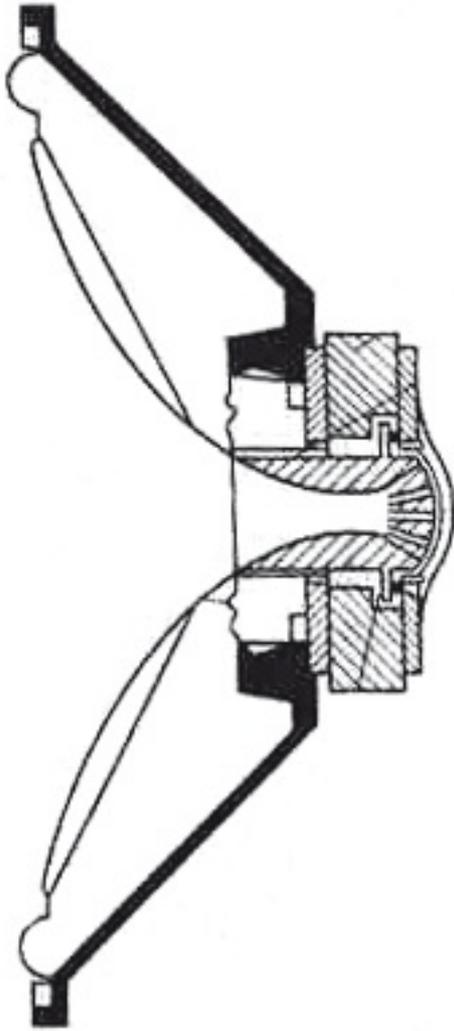
Можно отметить следующие оригинальные конструкторские решения, появившиеся в 50-70 годах.

В 1958 году Edgar Villchur представил модель акустической системы AR-3 с принципиально новым по конструкции высокочастотным излучателем: диафрагма была изготовлена в виде купола, центрирующая шайба отсутствовала, а звуковая катушка крепилась прямо к диафрагме. Появление

такой конструкции решило очень важную проблему: расширения характеристики направленности в области высоких частот за счет применения небольшой по размерам полусферической диафрагмы.

Появились мощные низкочастотные громкоговорители с диафрагмами, имеющими специальные ребра жесткости; примером может служить модель коаксиального излучателя RCA-15, которую предложил инженер Harry Ferdinand Olson в 1954 году.

Появилась принципиально новая конструкция коаксиального громкоговорителя, созданная фирмой Tannoy (Англия) в 1947 году (рис. 5). Идея состояла в том, чтобы ликвидировать разнесение источников низких и высоких частот в пространстве и добиться излучения их из одной точки, что ликвидирует фазовые сдвиги между ними и улучшает характеристики направленности. В такой конструкции высокочастотный громкоговоритель с купольной диафрагмой и специальным распределителем излучал через отверстие в керне низкочастотного громкоговорителя, диффузор которого служит для него рупором.



Были разработаны конструкции громкоговорителей (сначала высокочастотных, затем и средне-низкочастотных) с использованием специальной магнитной жидкости (ferrofluid) в зазоре для отвода тепла и повышения демпфирования при больших амплитудах.

Последние достижения

Основные успехи в развитии электродинамических громкоговорителей за последние десятилетия были достигнуты в технологии. Возросшие мощности усилителей (300-500 Вт), требования к неискаженной передаче больших динамических диапазонов (максимальный уровень звукового давления ~130-140 дБ), к снижению уровня

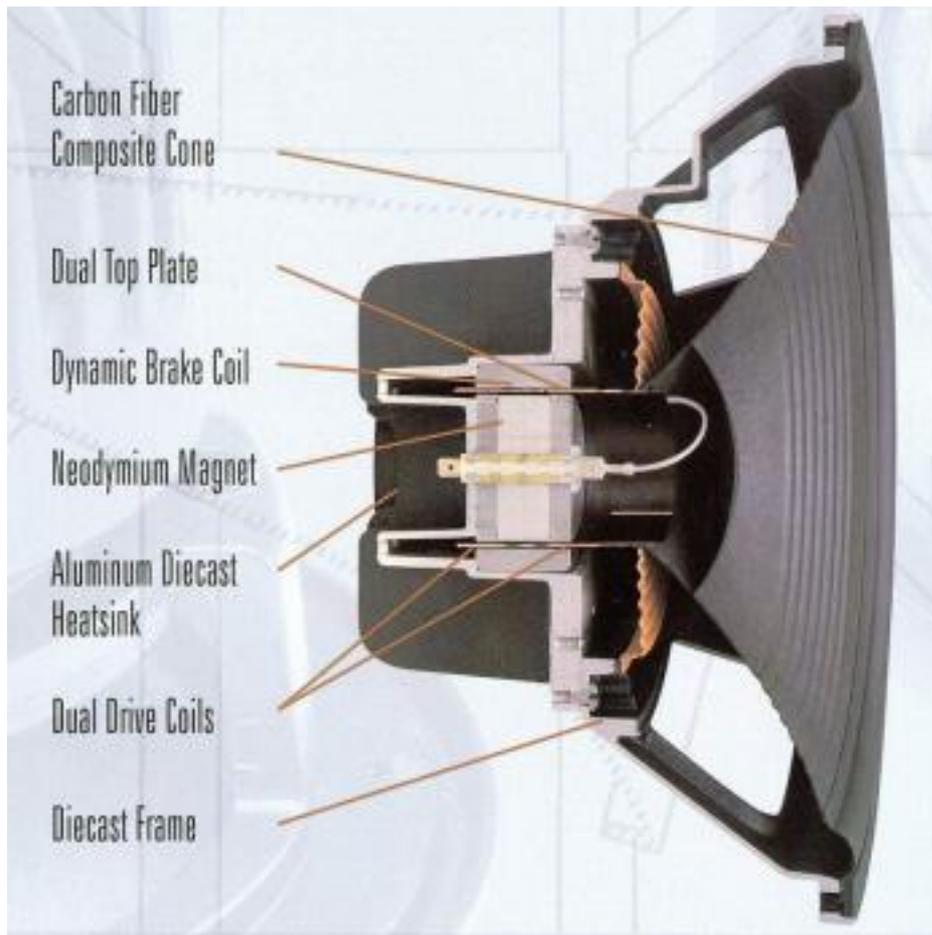
линейных и нелинейных искажений, привели к существенным изменениям как в выборе материалов, так и в технологии изготовления многих элементов электродинамических громкоговорителей.

В низкочастотных громкоговорителях технологические изменения коснулись всех элементов. Подвесы начали изготавливаться из специальных материалов (натуральных резин, пенополиуретанов, прорезиненных тканей, натуральных и синтетических тканей со специальными демпфирующими покрытиями) и приобрели особую форму: полутороидальные, sin-образные, S-образные и др. Диафрагмы низкочастотных громкоговорителей (первые из которых в 20-е годы делали из пергамента или натуральной кожи) в настоящее время изготавливаются из довольно сложных композиций на основе натуральной длинно-волокнистой целлюлозы с различными добавками, повышающими ее прочность, жесткость и демпфирующие свойства (например, волокнами шерсти, льна, углестекловолокна, графитовыми чешуйками, металлическими волокнами, влагозащитными и демпфирующими пропитками). О степени сложности таких композитов можно судить по тому, что в них используются до 10-15 составляющих.

Однако, наряду с композициями из натуральных целлюлоз, для диафрагм низкочастотных громкоговорителей применялись и применяются различные композиционные материалы, как

правило, разработанные ранее для аэрокосмической и военной техники: многослойные сотовые материалы, вспененные металлы и т. д. В настоящее время для диафрагм низкочастотных громкоговорителей многими известными фирмами (JAMO, KEF, Cabasse, Tannoy и т. д.) все шире применяются синтетические пленочные композиции на основе полиолефинов (полипропилена и полиэтилена) и композиционные материалы на основе высокомодульной ткани "кевлар" (B&W, Audix и т. д.).

Применение таких диафрагм позволяет обеспечить в лучших моделях низкочастотных громкоговорителей гладкие АЧХ до 1500...2500 Гц, что почти на две октавы выше частот раздела, часто используемых в трехполосных акустических системах (400...600 Гц). Примером современной конструкции низкочастотного громкоговорителя может служить одна из последних моделей низкочастотного излучателя фирмы JBL, показанная на рис. 6. В ней используется магнитная цепь с неодимовым магнитом, звуковая катушка с двойной обмоткой, что позволяет работать при больших мощностях без искажений, диафрагма из композитного материала с угольными волокнами и другие достижения современных технологий.



Особые изменения произошли в технологии изготовления высокочастотных громкоговорителей, где современные достижения космической техники находят особенно эффективное применение. Примером одной из самых современных конструкций может служить высокочастотный громкоговоритель фирмы Tannoy модель Prestige ST-200, где используется купольная диафрагма диаметром 25 мм и толщиной 25 мк, изготовленная из титана с напыленным слоем золота, магнит из неодима и др., что позволило получить совершенно уникальные параметры: частотный диапазон до 54 кГц при неравномерности -6 дБ, до 100 кГц при неравномерности -18 дБ, паспортная мощность 135 Вт (пиковая 550 Вт), чувствительность 95 дБ/В/м.

Если сравнить конструкции последних двух громкоговорителей с первыми моделями электродинамических громкоговорителей, то видно, какой путь прошло это изделие за почти сто лет с момента своего создания и каких параметров удалось достичь.

Профессиональные громкоговорители для систем озвучивания и звукоусиления развивались в основном по пути увеличения мощности и формирования заданной характеристики направленности. Создано большое разнообразие видов рупоров: дифракционные, радиальные, равномерного покрытия, свернутые и т. д.

Появились новые виды излучателей — мощные линейные массивы, состоящие из отдельных активных многополосных блоков с управляемой характеристикой направленности.

Если проанализировать основные направления в развитии громкоговорителей на современном этапе (например, по материалам конгрессов AES за последние годы), то можно выделить следующие тенденции:

- появление новых параметров, значительно лучше коррелирующих со слуховым восприятием,
- создание новой цифровой метрологии, позволяющей проводить измерения более широкого круга параметров в незаглушенных помещениях,
- использование методов цифровой фильтрации для снижения линейных и нелинейных искажений,
- поиски путей создания цифровых громкоговорителей,

- разработка адаптивных цифровых процессоров для согласования параметров громкоговорителей с характеристиками помещения, в которых они установлены.

Подробнее об особенностях конструкции, технологии, методах уменьшения искажений в современных электродинамических громкоговорителях будет рассказано в следующих статьях цикла.

Часть 2.1. Электроакустические измерения. Линейные искажения.

Вся электроакустическая аппаратура (в первую очередь, громкоговорители, как конечное звено звукового тракта) требует особых методов для оценки ее параметров. Объективные измерения выходных характеристик оказываются недостаточными для оценки качества звучания, что существенно отличает электроакустическую от других видов аппаратуры.

Громкоговорители предназначены для преобразования электрической энергии в акустическую, которая в виде звуковых волн поступает в слуховую систему человека и обрабатывается ею по особым законам (изучение их служит предметом психоакустики). В результате возникают определенные слуховые ощущения (высота, громкость, тембр и пр.) и формируется общее представление "слухового образа". На протяжении десятилетий в аудиотехнике ведутся поиски наиболее информативных для слуховой

системы параметров. Однако, поскольку до настоящего времени эта проблема еще не решена окончательно, для всех видов электроакустической аппаратуры международными стандартами предусмотрено, наряду с измерениями объективных параметров, проведение субъективных экспертиз для оценки качества звучания. Методика организации экспертиз также стандартизована. За последние годы произошли существенные изменения в технике электроакустических измерений. С одной стороны, существенно продвинулись исследования по изучению процессов обработки звуковых сигналов в слуховой системе и созданию компьютерных моделей ее работы. Данными проблемами занимаются десятки университетов, научных институтов и крупных фирм. Это дало возможность сформулировать требования к новому комплексу параметров. С другой стороны, внедрение цифровых методов обработки сигналов и современных компьютерных технологий позволили значительно расширить круг измеряемых параметров (в соответствии с новой информацией, поступающей из психоакустических исследований), повысить точность и быстроту измерений, в первую очередь за счет применения современных компьютерных метрологических комплексов (например, Gold Line TEF, Audio Precision AP2700, DRA Laboratories MLSSA, Linear-X System LMS, Kirchner Elektronik ATB и др.), решить проблему организации измерений в обычных незаглушенных помещениях за счет использования

цифровых импульсных методов с адаптивной процессорной обработкой сигнала и т. д.

Искажения

При передаче сигналов через все звенья звукозаписывающих и звукопередающих трактов (в том числе и через громкоговорители) в них вносятся различные виды искажений, обусловленные особенностями электромеханических, механоакустических и других процессов преобразования сигналов. Эти искажения можно разделить на линейные и нелинейные.

Линейные искажения изменяют амплитудные и фазовые соотношения между отдельными спектральными составляющими сигнала, и за счет этого могут менять его временную форму, но они не вносят новых спектральных составляющих и не зависят от уровня входного сигнала.

Нелинейные искажения характеризуются появлением в спектре выходного сигнала новых спектральных составляющих, которые изменяют временную структуру сигнала в зависимости от его уровня.

Во всех громкоговорителях происходят как линейные, так и нелинейные искажения музыкальных и речевых сигналов, однако методы их измерения и оценки отличаются, поэтому начнем с анализа линейных искажений.

Линейные системы

В *линейных системах* входной и выходной сигналы связаны прямолинейной зависимостью, то есть

связь между сигналами может быть представлена в виде:

$$y(t) = K x(t-T)$$

где $x(t)$ — входной сигнал, $y(t)$ — выходной сигнал. Это условие допускает только изменение сигнала в масштабе с коэффициентом K и сдвиг его во времени на T секунд.

Кроме того, в линейных системах выполняется принцип суперпозиции (сложения): сумме входных сигналов $a_1x_1(t) + a_2x_2(t)$ соответствует сумма выходных сигналов $a_1y_1(t) + a_2y_2(t)$. Наконец, линейные системы обладают свойством коммутативности, то есть реакция системы не зависит от последовательности подачи сигналов или от последовательности соединения нескольких линейных систем в цепочку.

Импульсная характеристика. Свертка.

Если входной сигнал представляет собой короткий прямоугольный импульс, то реакция системы на такой сигнал называется *импульсной характеристикой* — $h(t)$. Импульсная характеристика имеет принципиально важное значение, так как, определив (расчетным или экспериментальным путем) реакцию системы на единичный импульс, можно рассчитать реакцию линейной системы на сигнал любой формы с помощью операции "свертки" (англ. convolution — свертывание), которая может быть представлена как:

$$y(t) = x(t) \otimes h(t)$$

Физически это означает, что если входной сигнал можно представить как сумму коротких импульсов,

то выходной сигнал можно представить как сумму соответствующих импульсных характеристик, умноженных на значение входного сигнала для разных моментов времени, то есть записать свертку в виде:

$$y(t) = \int_0^{\infty} x(\tau) h(t - \tau) d\tau$$

Операция свертки широко используется в настоящее время для обработки звуковых сигналов при создании цифровых ревербераторов и адаптивных процессоров для подавления отражений, в создании компьютерных моделей помещений (аурализации), в создании бифонических процессоров и различных спецэффектов. Она же служит основой развития современной цифровой метрологии акустических преобразователей.

Преобразование Фурье

Операция свертки представляет реакцию системы (в данном случае, громкоговорителя) на входной сигнал во *временной области*. Пользуясь преобразованием Фурье, можно отразить связь между входным и выходным сигналом системы (например, между напряжением на входе громкоговорителя и звуковым давлением на его выходе) в *частотной области*.

Как известно, преобразование Фурье представляет собой разложение функции в ряд (или интеграл) на простые гармонические колебания с определенным соотношением амплитуд (определяющим амплитудный спектр) и фаз (фазовый спектр). Для

импульсной характеристики это разложение может быть представлено в виде:

$$h(t) = \int_{-\infty}^{\infty} H(j\omega) e^{j\omega t} dt$$

где функция $H(j\omega)$ называется *передаточной функцией* (или передаточным коэффициентом системы), ω — угловая частота, равная $\omega = 2\pi f$. Таким образом, чтобы оценить линейные искажения в системе (например, в громкоговорителе) можно измерить или ее импульсную характеристику, или ее передаточную функцию. Они связаны друг с другом через преобразование Фурье, то есть всегда можно из одной функции рассчитать другую.

Измерение передаточных функций

Для измерения передаточных функций можно использовать следующие способы.

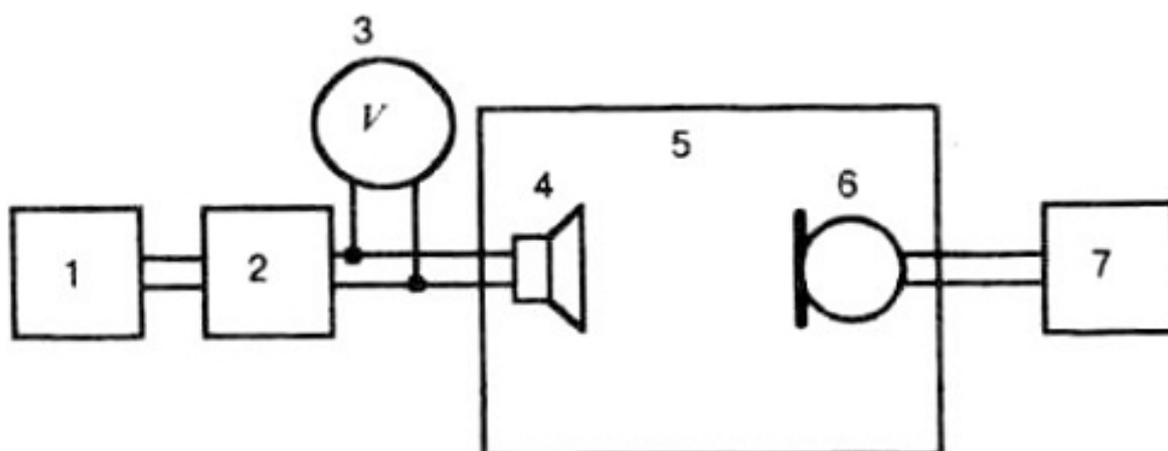
1. Подать на вход системы громкоговорителя синусоидальный сигнал, измерить амплитуду синусоидального сигнала на выходе и получить значение передаточной функции на заданной частоте. Если произвести эти измерения на скользящем тоне, то получится зависимость модуля передаточной функции от частоты. Обычно измеряется величина $20 \lg |H(j\omega)|$, которая называется *амплитудно-частотной характеристикой* (АЧХ). Зависимость аргумента передаточной функции от частоты $\phi(\omega)$ называется *фазочастотной характеристикой* (ФЧХ).
2. Подать на вход системы белый шум; поскольку спектральная плотность белого шума постоянна, то есть $|X(j\omega)| = K$, то для измерения АЧХ

достаточно измерить спектральную плотность (спектр) выходного сигнала (например, звукового давления на выходе громкоговорителя).

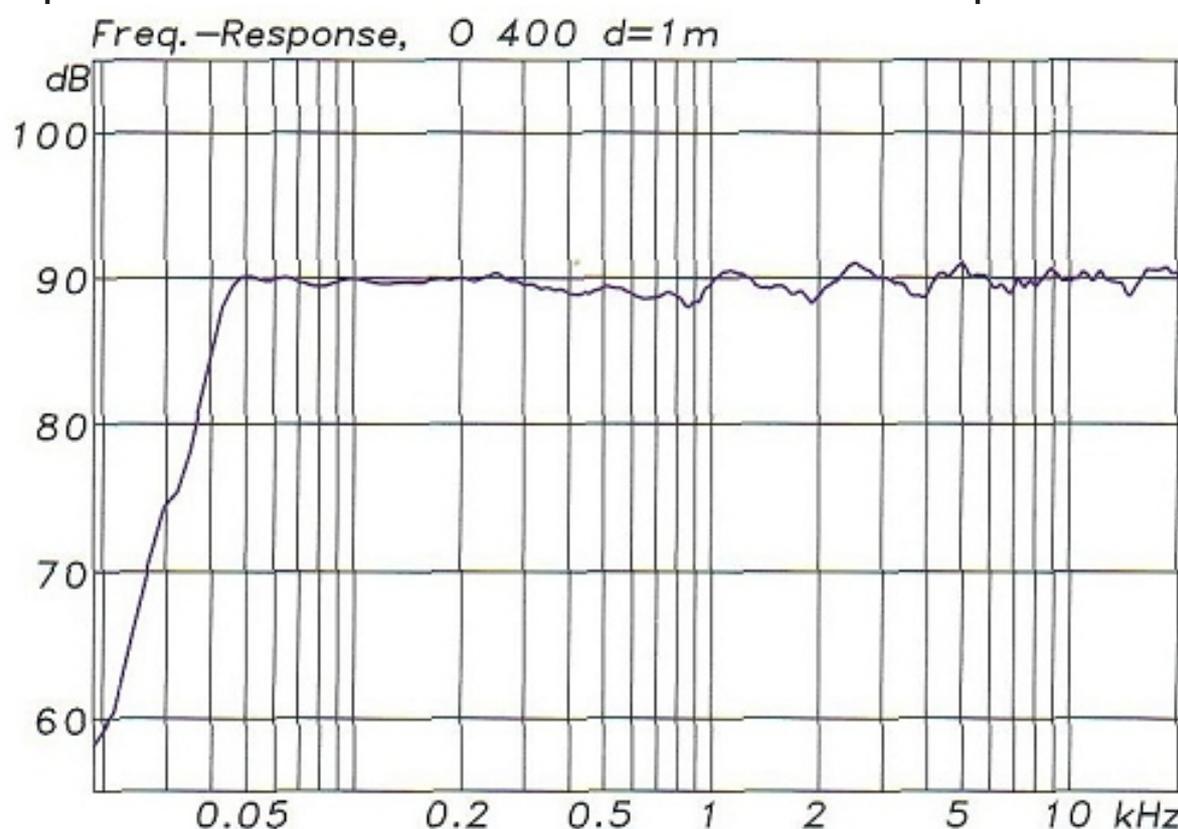
3. Использовать возбуждение системы с помощью импульсного сигнала, измерить на выходе импульсную характеристику и затем с помощью преобразования Фурье построить АЧХ и ФЧХ системы.

Первые два способа измерения АЧХ давно применяются в аудиотехнике. Обычно измерения проводятся в заглушенной камере (специальном помещении, на стенах которого размещаются звукопоглощающие клинья, обеспечивающие поглощение отраженных сигналов; рис. 1) по схеме, представленной на рис. 2.





В качестве измерительного используется синусоидальный или шумовой сигнал. Запись АЧХ производится в режиме постоянства напряжения, при установке микрофона на расстоянии 1 м или более. Пример записанной таким образом АЧХ для акустической системы акустического контрольного агрегата Klein + Hummel O 400 показан на рис. 3.



Требования к АЧХ и ФЧХ

Условие отсутствия линейных искажений в частотной области может быть представлено в следующем виде:

$$|H(j\omega)| = K, \phi(\omega) = -\omega T,$$

что означает постоянство модуля передаточной функции (то есть уровня АЧХ) на всех частотах и линейную пропорциональность частоте ее аргумента, то есть ФЧХ. При этом сохраняется форма огибающей спектра входного сигнала, что имеет важное значение для сохранения тембра музыкального и речевого сигнала, воспроизводимого через громкоговорители.

Следует отметить, что для неискаженной передачи временной формы сигнала эти условия должны выполняться в полном частотном диапазоне.

Однако поскольку все преобразователи имеют ограниченный воспроизводимый диапазон частот, то в любых акустических системах имеют место линейные искажения, даже если внутри диапазона отклонения АЧХ и ФЧХ от этих требований минимальны.

При разработке любых акустических преобразователей стоит задача максимального приближения к этим требованиям, то есть обеспечение постоянства уровня АЧХ и линейности ФЧХ. Оценка линейных искажений громкоговорителей по уровню их амплитудно-частотных искажений (то есть степени отклонений АЧХ от постоянного значения) на протяжении всего многолетнего периода производства является основным методом оценки их качества. В значительной степени это связано с тем, что

амплитудно-частотные искажения субъективно воспринимаются как искажения тембра, к которым слух очень чувствителен. Поэтому методики измерения амплитудно-частотных характеристик детально разработаны и включены во все международные и национальные стандарты, например, IEC 268-5, IEC 581-7, IEC 581-13, DIN 45-500, ГОСТ 16122-88, ГОСТ 23262-83, ОСТ 4.202.003-84, ANSI S 4.26-1484, AES 20-96 и др.

Параметры оценки искажений

По измеренной АЧХ можно рассчитать целый ряд параметров, позволяющих количественно оценить амплитудно-частотные искажения в громкоговорителях, такие как:

неравномерность АЧХ — разница между максимальным значением уровня звукового давления и минимальным, или между максимальным и средним внутри эффективно воспроизводимого диапазона частот (в современных акустических системах эта величина составляет +/-1 дБ);

эффективно воспроизводимый диапазон частот — диапазон, в пределах которого уровень звукового давления снижается на некоторую заданную величину по отношению к уровню среднего звукового давления, усредненному в некотором диапазоне частот (в лучших моделях контрольных агрегатов он достигает 20...20000 Гц при спаде 3 дБ на низких и высоких частотах);

характеристическая чувствительность — отношение среднего звукового давления, развиваемого головкой громкоговорителя в

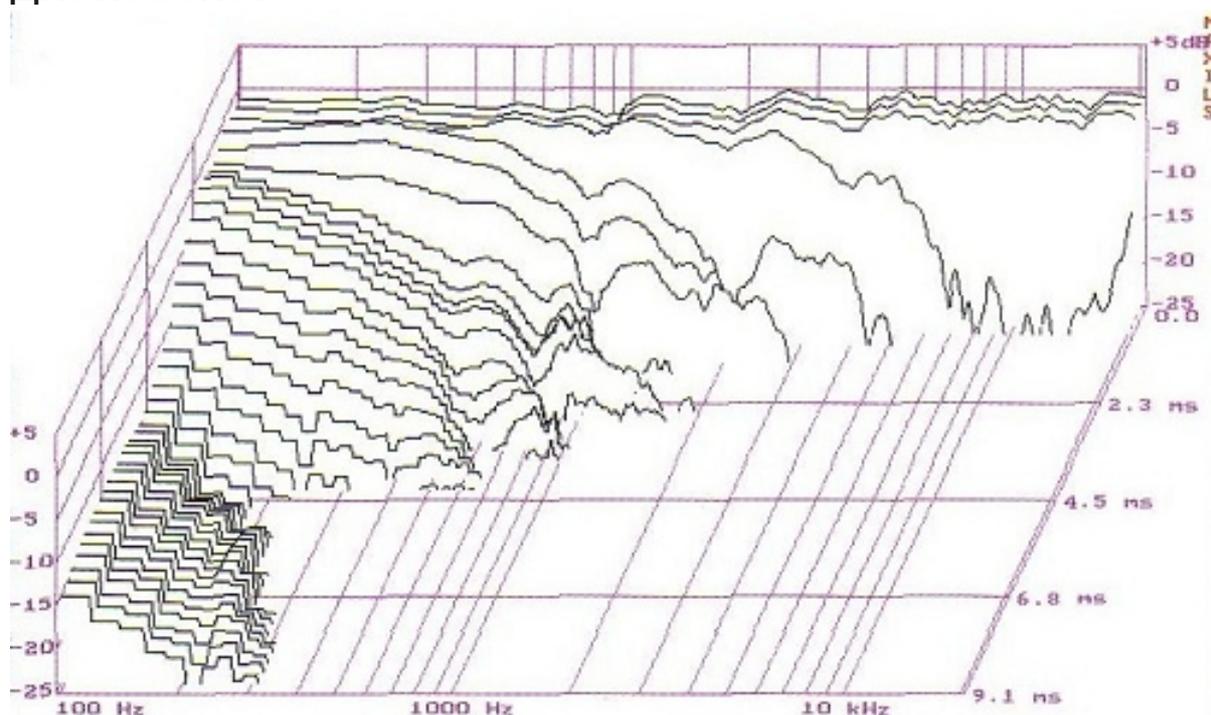
заданном диапазоне частот (обычно 100...8000 Гц) на рабочей оси на расстоянии 1 м при подводимой электрической мощности 1 Вт (в зависимости от области применения находится в следующих пределах: головки громкоговорителя для бытовых акустических систем — 86...89 дБ/Вт/м, для студийных агрегатов — 92...94 дБ/Вт/м, для концертно-театральной аппаратуры — 98...102 дБ/Вт/м).

Кумулятивные спектры и переходные процессы

Современные цифровые методы измерений импульсных характеристик с помощью компьютерных технологий позволяют производить измерения в обычных помещениях (без использования заглушенных камер), используя или измерения на близких расстояниях, или специальные адаптивные фильтры (эхоподаватели). При этом значительно повышаются быстрота и точность измерений, расширяется круг параметров.

Кроме АЧХ и ФЧХ с помощью этих методов можно построить *трехмерные (кумулятивные) спектры*. Большинство современных программ для работы со звуком (WaveLab, Sound Forge, SpectraLab и др.) позволяют выполнить такую операцию. Для этого производится анализ преобразования Фурье от полной импульсной характеристики громкоговорителя, а затем от отдельных ее временных отрезков, вырезаемых с помощью ступенчатой функции, что позволяет представить АЧХ в разные моменты времени.

На рис. 4 представлен трехмерный спектр контрольного агрегата Klein + Hummel O 400 (по одной оси отложена частота, по другой — время, по оси ординат — уровень звукового давления). Анализ трехмерных спектров позволяет оценить изменение АЧХ во времени, то есть судить о характере переходных процессов (процессов спада), что имеет большое значение для субъективной оценки качества звучания. На таких спектрах хорошо видны частотные области с так называемыми "задержанными" резонансами, обусловленными собственными резонансами подвижной системы громкоговорителей, отражениями от углов корпуса акустической системы и другими причинами, важными для процесса проектирования. В целом, к кумулятивным спектрам предъявляются требования гладкости спада АЧХ на всех частотах диапазона.



Фазочастотные искажения

Наряду с амплитудно-частотными в современной аудиоаппаратуре оцениваются фазочастотные искажения. Длительное время они не измерялись и не нормировались, поскольку существовало мнение о "фазовой глухоте" слуха. Однако проведенные за последние годы исследования показали, что слуховая система довольно чувствительна к фазовым искажениям. Кроме того, особое внимание в современной технике проектирования громкоговорителей уделяется точной передаче временной структуры сигнала, что также требует измерения и контроля как АЧХ, так и ФЧХ для последующего восстановления этой временной структуры с помощью обратного преобразования Фурье.

Как показано ранее, мерой фазочастотных искажений является степень отклонения фазочастотной характеристики от прямой линии:

$$\phi(\omega) = -\omega T$$

Многие фирмы выпускали акустические системы и контрольные агрегаты, в которых обеспечивалась линейность фазовых характеристик ("линейно-фазовые системы"), в первую очередь, за счет выбора параметров фильтрующе-корректирующих цепей.

Однако наиболее информативной величиной с точки зрения субъективного восприятия, как показали многочисленные экспериментальные исследования, является величина искажений группового времени задерживания (ГВЗ), которая определяется следующим образом:

$$\tau_{ГР} = -\frac{d\varphi}{d\omega}$$

Пороги слышимости искажений ГВЗ (то есть степень отклонения его от постоянного значения Т) составляют 1 мс в области частот 2000 Гц и 2...3 мс в области 1000 Гц и 4000 Гц. Оценка фазовых искажений в громкоговорителях производится в настоящее время, в основном, по этому параметру.

Пространственные параметры. Характеристика направленности.

В последние годы, особенно в связи с внедрением окружающих (surround) систем звукопередачи, вопросам согласования параметров громкоговорителей с характеристиками помещения уделяется очень большое внимание в аудиотехнике. В частности, при разработке адаптивных цифровых процессоров и систем компьютерного моделирования акустических свойств помещения (систем аурализации). Для решения этих проблем необходима оценка параметров акустической аппаратуры, измеренных не только на оси излучателя (АЧХ, ФЧХ, кумулятивные спектры), но и в других точках пространства.

Для определения "пространственного" распределения звукового давления, излучаемого акустическими устройствами, в современной практике проектирования аудиоаппаратуры и в действующих стандартах IEC 268-5-(2000г), ГОСТ 16122-88, AES-5id-98 предусмотрено измерение таких параметров, как характеристика

направленности и частотная характеристика акустической мощности.

Под *характеристикой направленности* понимается "зависимость уровня звукового давления от частоты и от угла между опорной осью и измеряемой осью в условиях свободного поля в различных (заданных) плоскостях". В стандартах предусмотрено измерение характеристики направленности громкоговорителей в заглушенной камере двумя методами.

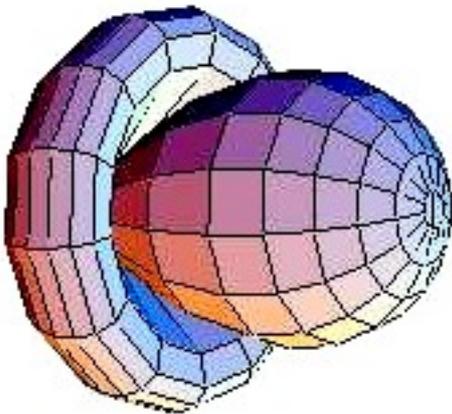
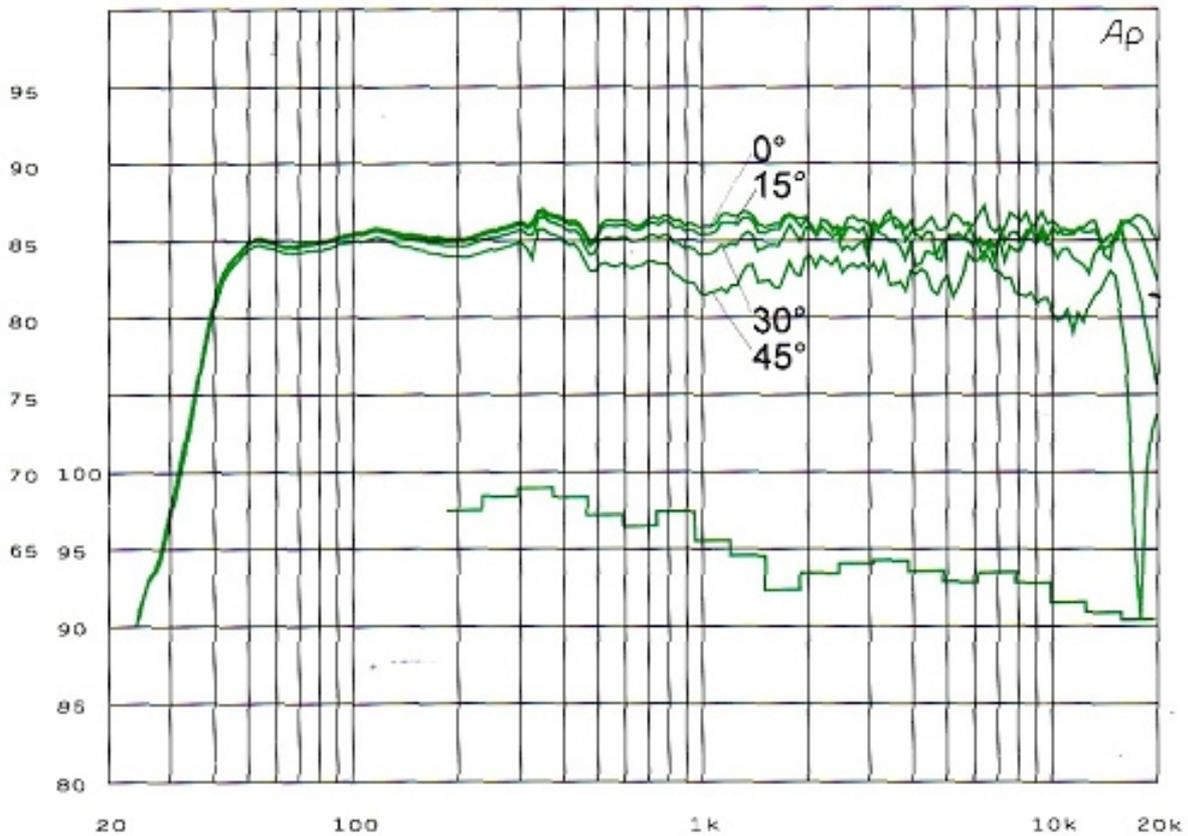
1. Запись АЧХ при смещении микрофона под определенными углами от опорной оси; при этом интервалы изменения углов рекомендуется выбирать кратными 15 градусам.
2. Запись диаграмм направленности в полярных координатах (polar pattern), то есть запись значений уровней звукового давления, измеренных микрофоном в условиях свободного поля при непрерывном вращении излучателя на поворотном устройстве. Запись может производиться на синусоидальном сигнале, или же на третьоктавном или октавном шуме.

Из измеренных таким образом характеристик можно определить целый ряд параметров: *коэффициент направленности* — отношение звукового давления, измеренного под заданным углом относительно рабочей оси, к звуковому давлению на рабочей оси для одной и той же частоты (полосы частот) при одном и том же расстоянии от рабочего центра громкоговорителя:

$$\xi(\theta^0) = \frac{P_{ЗВ}(\theta^0)}{P_{ЗВ}(0^0)}$$

индекс направленности — 20-кратный десятичный логарифм коэффициента направленности;
угол излучения — угол, в пределах которого значение индекса направленности спадает менее чем на 10 дБ.

Для измерения характеристик направленности также применяются цифровые импульсные методы, например, реализованные в цифровой компьютерной станции MLSSA, где используются измерения импульсных характеристик в разных точках помещения (как заглушенных, так и не заглушенных) с последующим преобразованием Фурье. Таким образом, можно построить как амплитудные, так и фазовые характеристики направленности. На рис. 5а и 5б показан пример компьютерной записи трехмерных характеристик направленности как первым (то есть АЧХ под разными углами), так и вторым способом (полярные диаграммы).



Акустическая мощность

Как показали проведенные эксперименты, существенную связь с субъективной оценкой качества звучания акустической аппаратуры в помещении имеют такие характеристики, как частотная характеристика акустической мощности PA и распределение этой мощности в пространстве и во времени. Под *акустической мощностью* понимается "общая мощность, излучаемая

громкоговорителем в пространство на различных частотах".

Психофизические исследования показали, что акустические системы, имеющие "хорошую" АЧХ звукового давления (с малой неравномерностью) и "плохую" характеристику направленности (то есть узкую, с резкими изменениями ширины при изменении частоты), звучат в помещении "жестко и утомительно". При этом стереообраз смещается с изменением спектрального состава сигнала, что совершенно недопустимо, например, для студийных контрольных агрегатов. Особенно в настоящее время, при переходе на пространственные системы записи. Если пространственный звуковой образ, создаваемый контрольными агрегатами (в частности, по системе 5.1 Dolby Surround), будет смещаться в процессе записи, звукоинженер не сможет контролировать свою работу. Методика измерений акустической мощности в заглушенной и реверберационной камере аналоговыми методами изложена в отечественных и международных стандартах ГОСТ 16122-88, IEC 268-5 и др.

Расчет акустической мощности (то есть полной звуковой энергии, излучаемой в окружающее пространство) и построение ее частотной зависимости выполняются также в настоящее время цифровыми методами (путем интегрирования по пространству полярных диаграмм, измеренных, например, способом, указанным выше).

Коэффициент осевой концентрации. Индекс осевой концентрации. Угол покрытия.

В современных зарубежных каталогах на аудиоаппаратуру обычно приводятся еще два параметра, характеризующие ее направленные свойства, которые в отечественном стандарте называются *коэффициент осевой концентрации* и *индекс осевой концентрации*, а в международных стандартах — *directivity factor (Q)* и *directivity index (Di)*.

Коэффициент осевой концентрации — это отношение квадрата звукового давления, измеренного на оси системы, к ее акустической мощности на этой же частоте (акустическое давление должно измеряться в тех же самых условиях, что и акустическая мощность, то есть в свободном или реверберирующем поле):

$$Q(f) = (4\pi I^2 / \rho c) (p^2_o(f) / PA(f))$$

Индекс осевой концентрации:

$$D_i = 10 \lg Q$$

Значение этих параметров и их зависимость от частоты чрезвычайно важны, особенно для аппаратуры, предназначенной для озвучивания (рупорных громкоговорителей, звуковых колонок и др.), поскольку все современные методики проектирования систем звукоусиления учитывают при расчетах именно эти параметры излучателей. В новой редакции международного стандарта IEC 268-5 (2000 г) введен еще один параметр для оценки направленных свойств излучателей, который называется *угол покрытия (coverage angle)*. Иногда в каталогах на аппаратуру для озвучивания он указывается как "beamwidth (-6 dB)", что можно перевести как "ширина луча при спаде 6 дБ". Этот

параметр определяется по записанной полярной диаграмме как угол, в пределах которого уровень звукового давления у главного лепестка диаграммы снижается на 6 дБ по отношению к уровню на оси. В современных акустических системах для концертно-театральной аппаратуры и даже в студийных агрегатах достаточно часто используются рупорные излучатели. Как в качестве низкочастотного, так и средне-высокочастотного звена. Во всех каталогах на эти виды аппаратуры обязательно указываются характеристики, определяющие их направленность. Например, в кинотеатральной системе JBL 5672 с рупорными средне- и высокочастотными громкоговорителями указаны следующие характеристики: частотный диапазон от 35 Гц до 16 кГц (-10 дБ), амплитудно-частотная характеристика от 45 Гц до 12 кГц (+/-3 дБ), горизонтальный угол покрытия (coverage angle) 80 градусов (усредненный в диапазоне от 300 Гц до 16 кГц, -6 дБ), вертикальный угол покрытия 45 градусов (усредненный в том же диапазоне), максимум звукового давления 112 дБ на 10 м.

Функция Вигнера

Из результатов, полученных в последние годы в психоакустике, известно, что слуховая система производит оценку распределения спектральной энергии сигнала и характер изменения ее во времени. В частности, именно эта информация лежит в основе определения таких субъективных характеристик, как "громкость" и, отчасти, "тембр". Именно поэтому в 80-е годы прошлого века была

разработана теория и практика применения для оценки акустических систем новой характеристики. Она получила название функции Вигнера и представляет собой распределение акустической мощности по частоте и по времени в пространстве. Расчет ее для различных точек дает возможность получить информацию о пространственном распределении спектральной акустической мощности внутри помещения и оценить характер изменения ее во времени, что значительно лучше коррелирует с воспринимаемым качеством звучания акустических систем.

КПД громкоговорителей

Из измеренных или рассчитанных значений акустической мощности можно определить *коэффициент полезного действия* (КПД) громкоговорителя. КПД — это отношение излучаемой акустической мощности к подводимой электрической мощности при измерениях на заданной частоте или полосе частот:

$$\eta = \frac{P_A}{P_E}$$

Следует отметить, что все электродинамические громкоговорители прямого излучения и, соответственно, акустические системы на их основе, имеют чрезвычайно низкий КПД, меньше 1%. Только узкогорлые рупорные громкоговорители могут иметь КПД до 10%. Учитывая, что объемы производства громкоговорителей в мировой промышленности достигают сотен млн. штук в год, нетрудно подсчитать, какие огромные

электрические мощности расходуются неэффективно.

Причиной такой низкой эффективности является, во-первых, то, что громкоговорители излучают в воздушную среду с очень низким сопротивлением (в воде КПД излучателей существенно выше); во-вторых, большие мощности рассеиваются на тепло в звуковой катушке (в мощных низкочастотных громкоговорителях при большой нагрузке температура, измеренная на звуковой катушке, может достигать 300 градусов), на трение в подвижной системе и т. д.

Наряду с линейными искажениями, в громкоговорителях измеряются и нормируются различные виды нелинейных искажений, о которых будет рассказано в продолжении данной статьи.

Часть 2.2. Нелинейные искажения. Мощность. Импеданс. Электромеханические параметры.

Как уже было сказано, во всех видах электроакустических преобразователей (громкоговорителях, микрофонах, стереотелефонах и др.) имеют место как линейные, так и *нелинейные искажения* сигнала. Последние характеризуются появлением новых составляющих в спектре. Громкоговорители имеют наибольший уровень нелинейных искажений среди всех остальных звеньев тракта, именно поэтому методам оценки и измерения этих искажений уделяется много внимания в современной аудиотехнике. Появление дополнительных составляющих в спектре обусловлено нелинейностью передаточной

функции, то есть нелинейной зависимостью выходного сигнала от входного (в случае громкоговорителя — зависимостью уровня звукового давления от подводимого напряжения). Причиной нелинейности могут являться конструктивные и технологические особенности электроакустических преобразователей. Например, в электродинамических громкоговорителях (конструкция которых будет представлена в следующих статьях) к числу таких особенностей можно отнести:

- нелинейные упругие характеристики подвеса и центрирующей шайбы;
- нелинейную зависимость смещения звуковой катушки от величины приложенного напряжения из-за взаимодействия катушки с магнитным полем и тепловых процессов в громкоговорителях;
- нелинейные колебания диафрагмы при большой величине воздействующей силы и др.

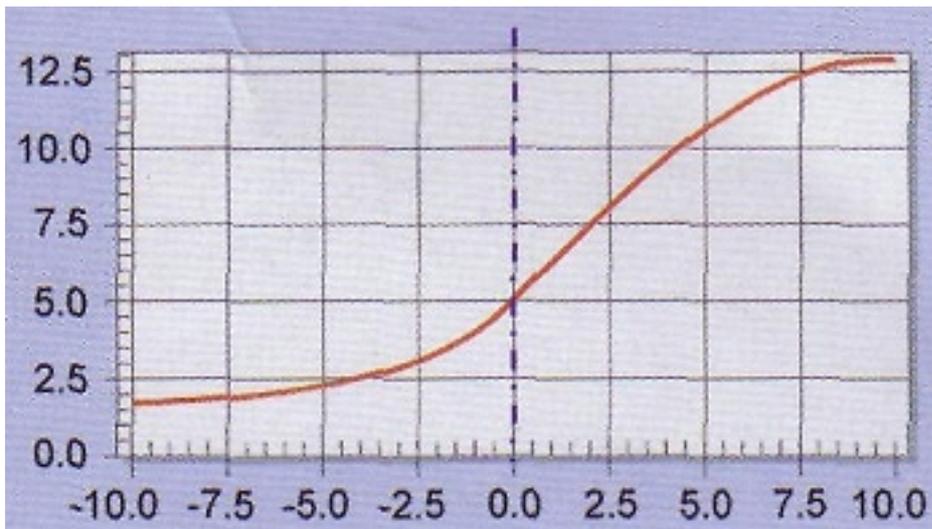
Гармонические искажения

Представленная на рис. 1 зависимость между входным и выходным сигналами может быть аппроксимирована в виде полинома:

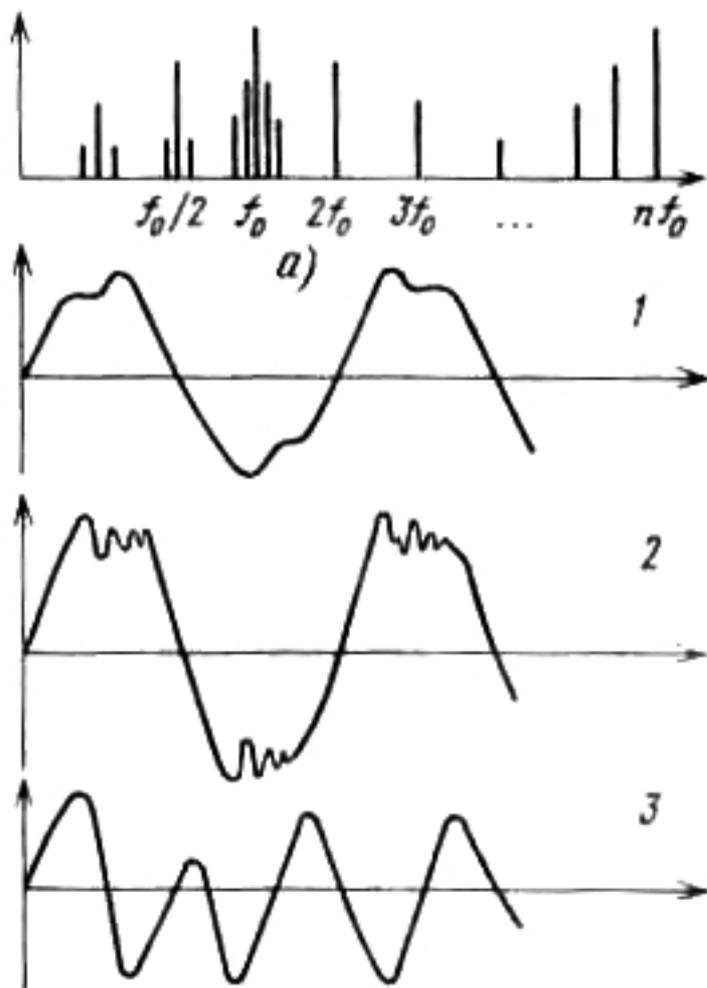
$$y(t) = a_1x(t) + a_2x^2(t) + a_3x^3(t) + a_4x^4(t) + \dots$$

Если на такую нелинейную систему подать гармонический сигнал, то есть $x(t) = A \sin \omega t$, то в выходном сигнале будут присутствовать компоненты с частотами ω , 2ω , 3ω ... $n\omega$ и т. д.

Например, если ограничиться только квадратичным членом, то появятся вторые гармоники, так как $y(t) = a_1 A \sin \omega t + a_2(A \sin \omega t)^2 = a_1 A \sin \omega t + 1/2 a_2 A^2 \sin 2 \omega t + \text{const}$.



В реальных преобразователях при подаче гармонического сигнала могут появиться гармоники второго, третьего и более высоких порядков, а также субгармоники $(1/n)\omega$, рис. 2.



Для оценки такого вида искажений чаще всего используются методы измерений на

синусоидальных сигналах уровней дополнительных гармоник в выходном сигнале (обычно только второй и третьей). В соответствии с международными стандартами (IEC 268-5) производится запись АЧХ второй и третьей гармоники в заглушенных камерах и измеряется коэффициент гармонических искажений n -порядка:

$$K_{\Gamma_n} = \frac{P_{f_n}}{P_{CP}} 100\% ,$$

где p_{fn} — среднеквадратичное значение звукового давления, соответствующее n — гармонической составляющей.

По нему рассчитывается общий коэффициент гармонических искажений (рис. 3):

$$K_{\Gamma} = \sqrt{\sum_{n=2}^{\infty} K_{\Gamma_n}^2}$$



THD at 95 dB/SPL at 1m

Например, в соответствии с требованиями IEC 581-7 для акустических систем категории Hi-Fi полный коэффициент гармонических искажений (THD — Total Harmonic Distortion) не должен превышать 2% в диапазоне частот 250-1000 Гц и 1% в диапазоне свыше 2000 Гц.

Следует отметить, что слуховая система чрезвычайно чувствительна к наличию нелинейных искажений в акустических преобразователях.

"Заметность" гармонических составляющих зависит от их порядка. В частности, к нечетным составляющим слух более чувствителен. При многократном прослушивании восприятие нелинейных искажений обостряется, особенно при прослушивании отдельных музыкальных

инструментов. Частотная область максимальной чувствительности слуха к этим видам искажений находится в пределах 1...2 кГц, где порог чувствительности составляет ~1%.

Однако такой метод оценки нелинейности не позволяет учесть все виды нелинейных продуктов, возникающих в процессе преобразования реального музыкального и речевого сигнала. Поэтому поиски других способов оценки нелинейных искажений и их корреляции с субъективными оценками все время продолжаются. Особенно актуально это в настоящее время, когда уровни нелинейных искажений значительно уменьшились и дальнейшее их снижение требует значительных экономических затрат, так что необходимы знания реальных порогов слышимости.

Интермодуляционные искажения

Наряду с измерениями гармонических составляющих в практике проектирования и оценки электроакустической аппаратуры используются методы измерений *интермодуляционных искажений*.

Методика измерений представлена в IEC 268-5 и основана на подведении к излучателю двух синусоидальных сигналов с частотами f_1 и f_2 (где $f_1 < 1/8 f_2$, при соотношении амплитуд 4:1) и измерении амплитуд звукового давления комбинационных тонов: $f_2 \pm (n - 1)f_1$, где $n = 2, 3$ (рис. 2). Например, если подвести к громкоговорителю частоты 200 Гц и 1000 Гц, то при наличии интермодуляционных искажений (а они в громкоговорителях есть всегда) в спектре появятся

разностные тоны: $1000 - 200 = 800$ Гц, $1000 - 2 \times 200 = 600$ Гц, $1000 - 3 \times 200 = 400$ Гц и т. д.; а также суммарные тоны: $1000 + 200 = 1200$ Гц, $1000 + 2 \times 200 = 1400$ Гц, $1000 + 3 \times 200 = 1600$ Гц и т. д.

Суммарный коэффициент интермодуляционных искажений определяется в этом случае как:

$$K_{им} = \sqrt{\sum_n K_{им_n}^2},$$

где $K_{имn} = [p(f_2 - (n - 1)f_1) + p(f_2 + (n - 1)f_1)]/p_{ср}$.

Причиной возникновения интермодуляционных искажений служат те же физические причины, а именно — нелинейная связь между выходным и входным сигналами, то есть нелинейная передаточная характеристика.

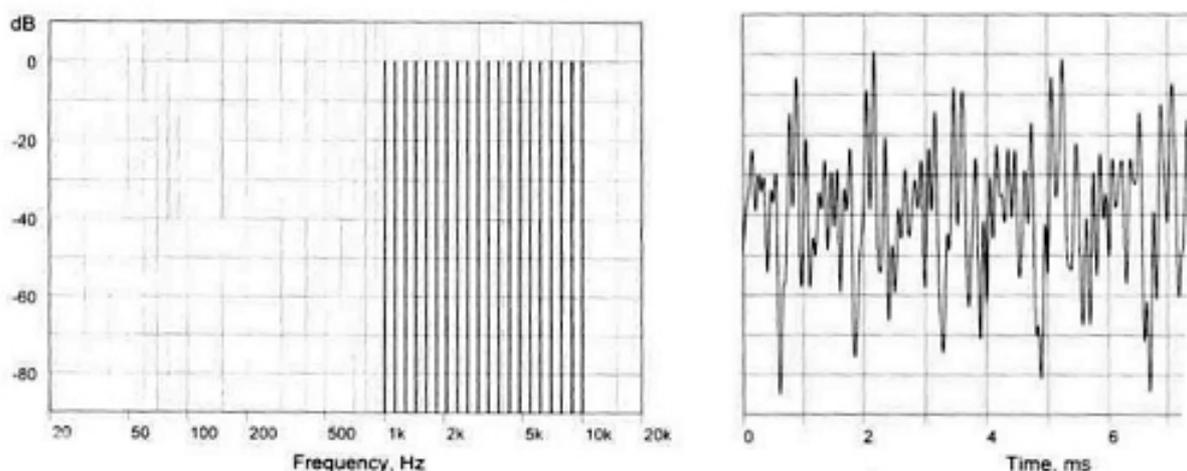
Как сказано ранее, в соответствии с международными стандартами в аппаратуре измеряются только коэффициенты интермодуляционных искажений второго и третьего порядков. Измерения интермодуляционных искажений могут быть более информативны, чем гармонические, поскольку служат более чувствительным критерием нелинейности. Однако, как показали эксперименты, выполненные в работах R. Geddes (доклад на 115 конгрессе AES в Нью-Йорке — пр. 5891), четкой корреляции между субъективными оценками качества акустических преобразователей и уровнем интермодуляционных искажений в них установить не удалось, оказался слишком большой разброс в оценках.

Многотоновый метод оценки нелинейных искажений

Поиски новых критериев для оценки нелинейных искажений в электроакустической аппаратуре все время продолжаются. В частности, был предложен *многотоновый метод* для оценки нелинейных искажений (история и методы применения которого детально исследованы в работах Войшвилло А. Г. и др.). *Многотоновый сигнал* представляет собой сумму синусоидальных компонент следующего вида:

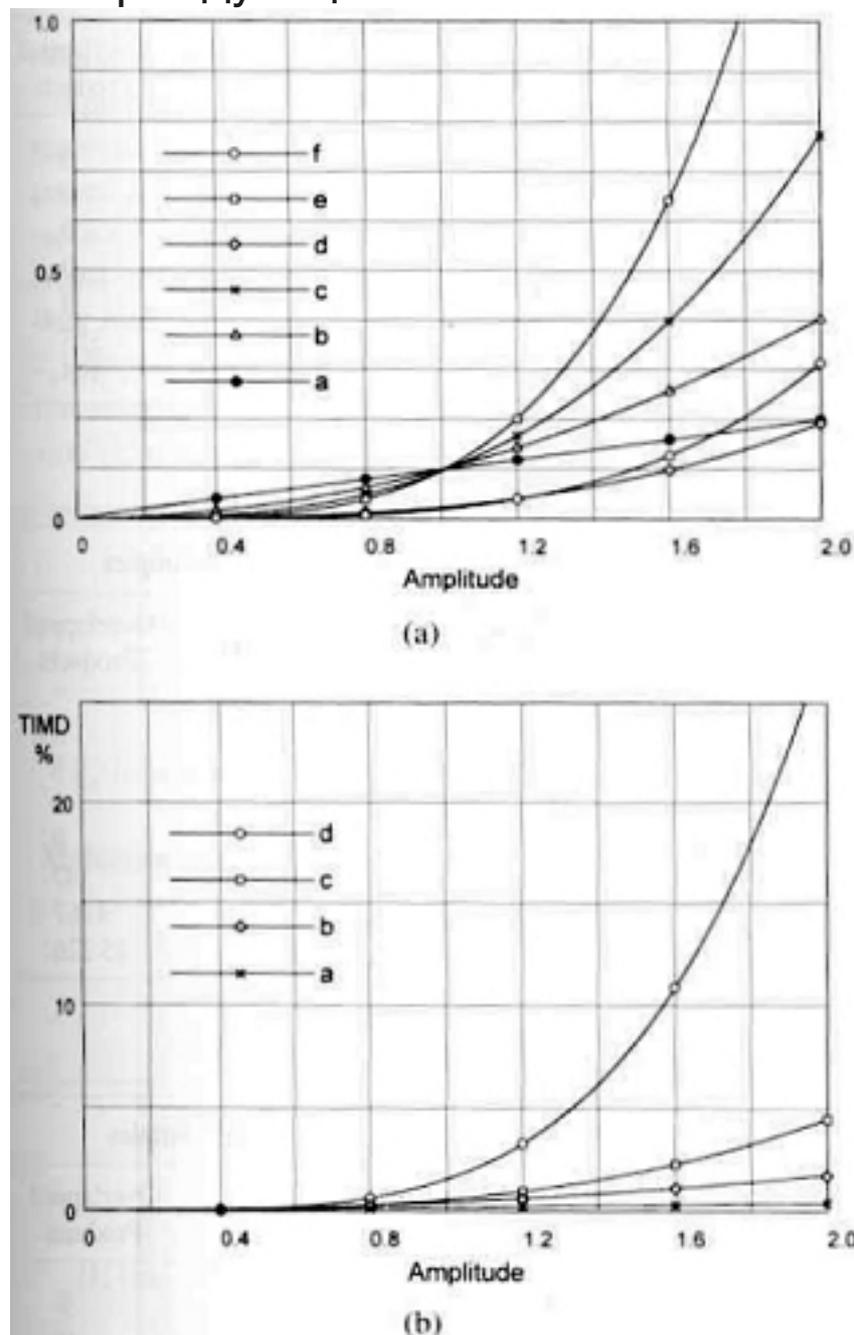
$$x(t) = \sum_{i=1}^N A_i \sin(\omega_i t + \varphi_i),$$

распределение частот в нем подчиняется логарифмическому закону, а распределение фаз подбирается из условия минимизации пик-фактора (отношения максимального значения сигнала к среднему). Общий вид спектра и осциллограмма такого сигнала показаны на рис. 4.



При применении такого сигнала к нелинейному устройству в выходном сигнале образуются продукты гармонических и интермодуляционных искажений, которые с помощью последующей процессорной обработки могут быть разделены и

оценены отдельно. Пример общих гармонических и интермодуляционных искажений показан на рис. 5.



Метод измерения с помощью многотонавого сигнала обладает рядом преимуществ перед другими методами: он довольно быстрый и дает детальное графическое представление продуктов искажений. Если используется многотоновый сигнал, то в спектре выходного сигнала присутствует значительно больше продуктов

интермодуляционных искажений, чем гармонических (что значительно ближе к реальному воспроизведению музыки и речи). Следует отметить, что, несмотря на оптимизацию, в многотоновом сигнале получается более высокий пик-фактор, чем в шумовом сигнале. Поэтому данный метод измерений дает большее значение для искажений, чем при измерениях на шумовом сигнале, но, возможно, этот запас и полезен при оценке аппаратуры.

Функция корреляции

Как уже было сказано, в настоящее время активно продолжают поиски методов измерения нелинейных искажений на реальных шумовых и музыкальных сигналах, лучше коррелирующих с процессами субъективного восприятия. К числу таких методов можно отнести измерения нелинейных искажений с помощью рядов Вольтерра и функции корреляции.

Функция корреляции $\gamma(\mathbf{f}_i)$ выражается как отношение квадрата кроспспектра (взаимного энергетического спектра) между входным и выходным сигналом $G_{xy}(\mathbf{f}_i)$ к квадратам автоспектров (энергетических спектров) входного $G_{xx}(\mathbf{f}_i)$ и выходного сигналов $G_{yy}(\mathbf{f}_i)$:

$$\gamma^2 = \frac{|G_{xy}(f_i)|^2}{G_{xx}(f_i)G_{yy}(f_i)}$$

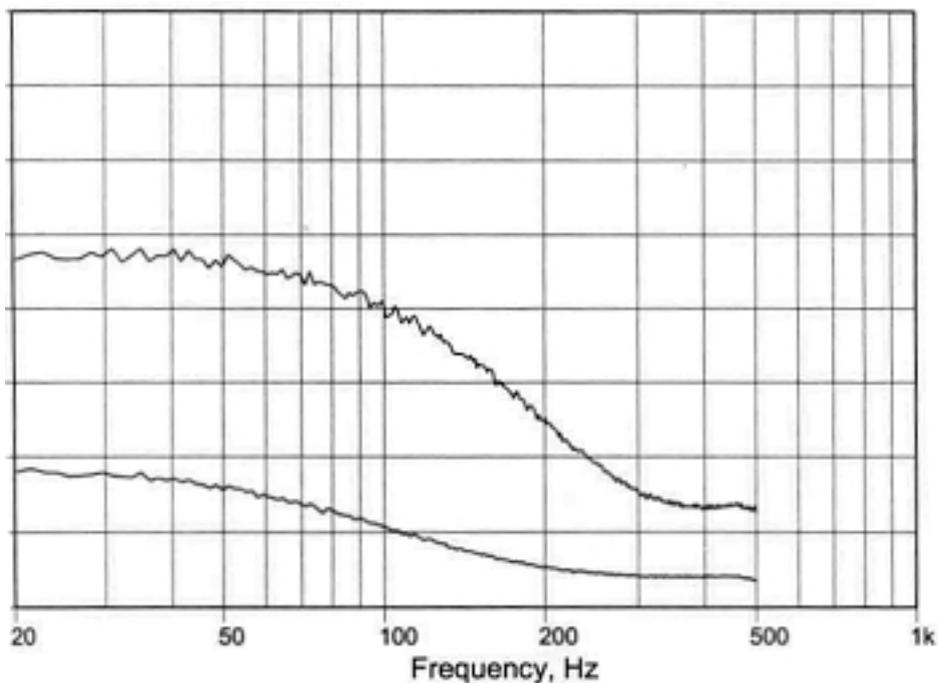
Если акустический преобразователь — строго линейная система, то эта функция равна единице. Если входные и выходные сигналы вообще не

связаны друг с другом, то функция равна нулю. Если акустическая система производит нелинейное преобразование входного сигнала или вносит шумы, то функция корреляции имеет значения между нулем и единицей, то есть значение функции корреляции дает общее описание всех нелинейных продуктов в выходном сигнале, она характеризует степень "подобия" сигналов.

Результаты применения ее для оценки нелинейности в громкоговорителях показаны на рис. 6, где по оси абсцисс отложена следующая величина:

$$I(f) = \sqrt{1 - \gamma^2(f)} \cdot 100\%.$$

На рисунке видна зависимость функции корреляции от частоты и уровня сигнала (нижняя кривая соответствует подводимой мощности, обеспечивающей смещение катушки 4 мм, верхняя — 10 мм). Удобство применения этого критерия к оценке нелинейных искажений — четкое графическое представление, недостаток — невозможность выделения отдельных продуктов искажений. Преимущества применения этого критерия для оценки нелинейных искажений в акустических системах сейчас интенсивно изучаются.



Кроме этого, для оценки искажений в громкоговорителях имеются работы по применению так называемых перцепционных методов (учитывающих свойства слуховой системы). В частности, предлагается методы, разработанные для оценки искажений музыкальных и речевых сигналов в кодеках (PEAG, PESQ), распространить на электроакустические преобразователи, а также применить теорию нейронных сетей (типа NARMAX) и другие способы, учитывающие специфику обработки сигналов в слуховой системе.

Оценка нелинейных искажений: ближайшие перспективы

Анализ всех имеющихся методов измерения нелинейных искажений позволяет предположить, что дальнейшее развитие работ в этом направлении пойдет следующими путями.

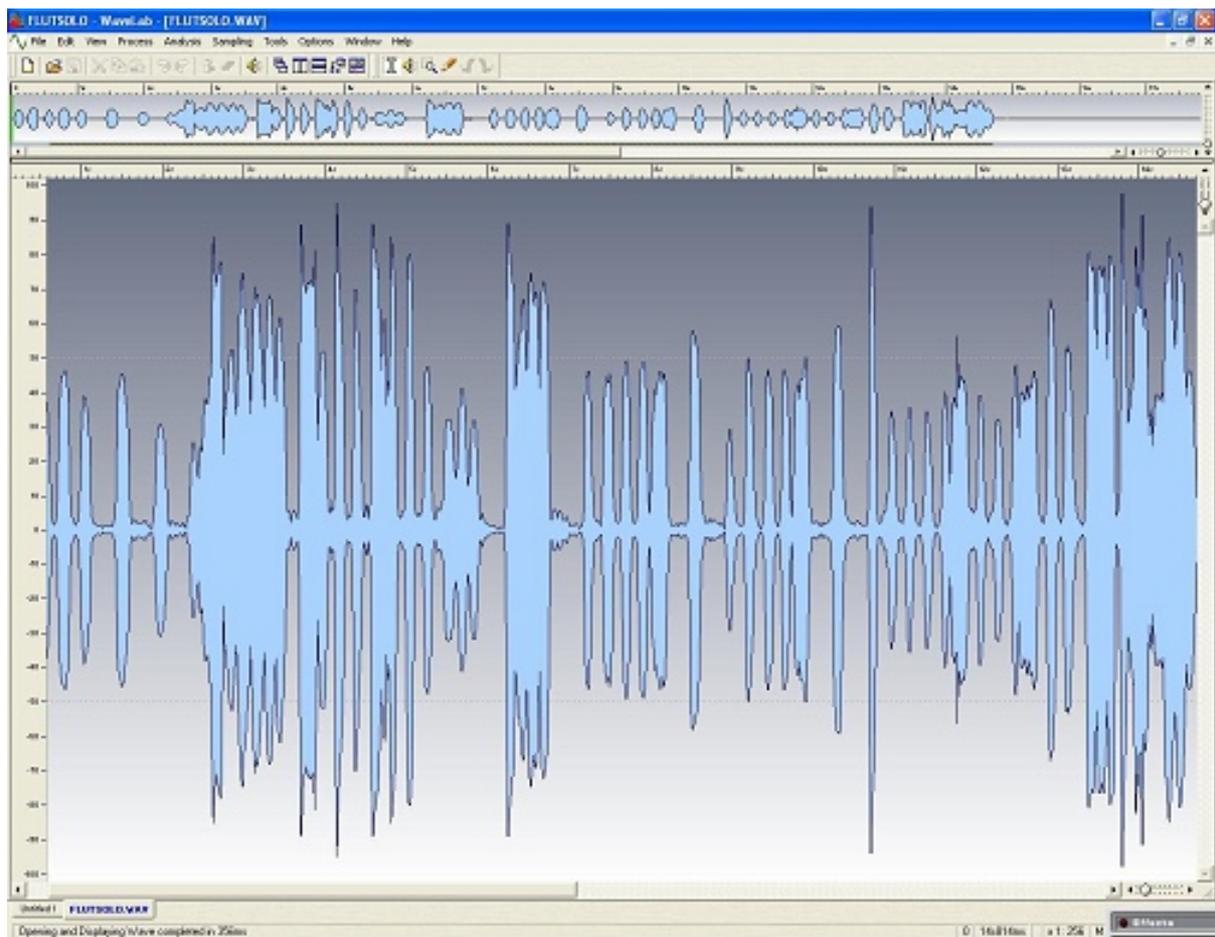
С помощью одного (или нескольких) вышеуказанных методов строится нелинейная динамическая компьютерная модель акустической

системы. Затем на нее подается реальный музыкальный сигнал. Выходной сигнал с этой модели расщепляется на линейные и нелинейные компоненты. Затем нелинейные искажения вводятся в компьютерную модель слухового тракта, учитывающую эффекты маскировки и другие процессы обработки, после чего анализируется, к каким видам искажений слуховая система наиболее чувствительна и каковы их пороги. Параллельно оценка продуктов искажений производится с помощью субъективного тестирования, на основе чего и принимаются решения об установлении допустимых норм на акустическую аппаратуру.

Весь этот комплекс работ, несомненно, позволит в ближайшее время перейти на новый уровень оценки нелинейных искажений в акустической аппаратуре, значительно лучше коррелирующий со слуховым восприятием.

Уровни звукового давления

Одно из главных требований, предъявляемых к электроакустической аппаратуре, состоит в обеспечении неискаженной передачи динамического диапазона музыкальных и речевых сигналов. Любой музыкальный и речевой сигнал можно представить в виде уровнеграммы (рис. 7). Уровнеграмма — это зависимость уровня звукового давления (создаваемого, например, оркестром, голосом или любым инструментом) от времени.



Разность между максимальным и минимальным уровнем звукового давления определяет *динамический диапазон* сигнала, а разность между максимальным и средним уровнем — его *пик-фактор*. Под максимальным уровнем понимается уровень звукового давления, выше которого значения сигнала могут находиться не более 2% времени для музыки и 1% для речи. Максимальные уровни звуковых давлений реальных источников могут достигать следующих значений: у рояля — 103 дБ; у симфонического оркестра — 112 дБ; у рок-группы — 128 дБ. Чтобы акустическая система (громкоговоритель) могла воспроизводить такие уровни звуковых давлений, ее конструкция должна позволять подводить большие значения электрической мощности от усилителя.

Для характеристики способности акустической системы к неискаженной передаче динамического диапазона звука в каталогах и проспектах используется такой параметр, как max SPL (Sound Pressure Level) — максимальный уровень звукового давления. В большинстве акустических систем значения этого параметра лежат в пределах 102...105 дБ, однако для работы с цифровыми трактами разработаны студийные агрегаты с максимальным уровнем звукового давления до 110 дБ и более, а в портальных концертных акустических системах эти значения могут быть 125 дБ и выше.

Мощность

Чтобы обеспечить такие уровни давлений, к акустическим системам должны подводиться большие мощности от усилителя низкой частоты: 100-200 Вт для бытовой аппаратуры, **300-1000 Вт** и более для профессиональной. Обычно в каталогах на акустические системы указывается *рекомендуемая мощность* усилителя низкой частоты. Часто изготовитель указывает даже две мощности: минимальную, при которой АС еще достаточно натурально воспроизводит программу, и максимальную, при которой АС еще продолжает работать без значительных искажений.

Согласование по мощности усилителей и акустических систем настолько важно для обеспечения хорошего качества звучания, что по этому вопросу разработаны специальные международные рекомендации IEC 268-5,581-7. В соответствии с ними в каталогах, рекламах и

технической литературе для акустических систем и других видов акустической аппаратуры

указываются следующие виды мощностей:

- *характеристическая*, при которой акустическая система обеспечивает заданный уровень звукового давления (в международных рекомендациях на аппаратуру Hi-Fi он должен быть не менее 94 дБ на 1 м);

- *паспортная* (PHC, Power Handling Capacity), при которой акустическая система может работать на специальном шумовом сигнале длительное время (обычно 100 часов) без механических и тепловых повреждений (это самый распространенный вид мощности, указываемый в технической литературе);

- *максимальная синусоидальная*, обеспечивающая возможность проведения измерений на синусоидальном сигнале в течение 1 часа.

Специально для согласования с усилителями введены еще два вида мощностей: *долговременная и кратковременная максимальная мощность* (в немецком стандарте DIN 45500 введена близкая к последней по определению мощность — "музыкальная"). Для испытаний используется шумовой сигнал, но испытания продолжаются по одной минуте десять раз с интервалом в две минуты и по одной секунде 60 раз с интервалом в одну минуту, соответственно.

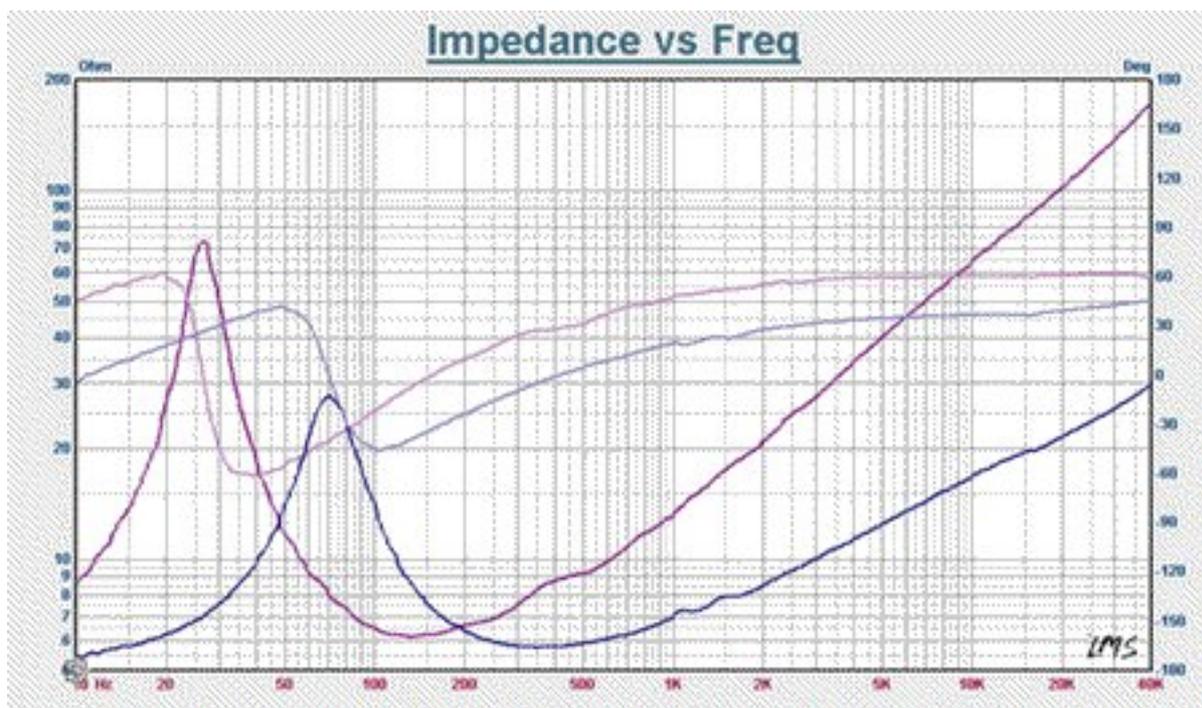
Значения этих мощностей могут для одной и той же акустической системы отличаться в несколько раз. Например, характеристическая мощность — 35 Вт, максимальная синусоидальная — 50 Вт, паспортная

— 90 Вт, долговременная — 100 Вт,
кратковременная — 150 Вт.

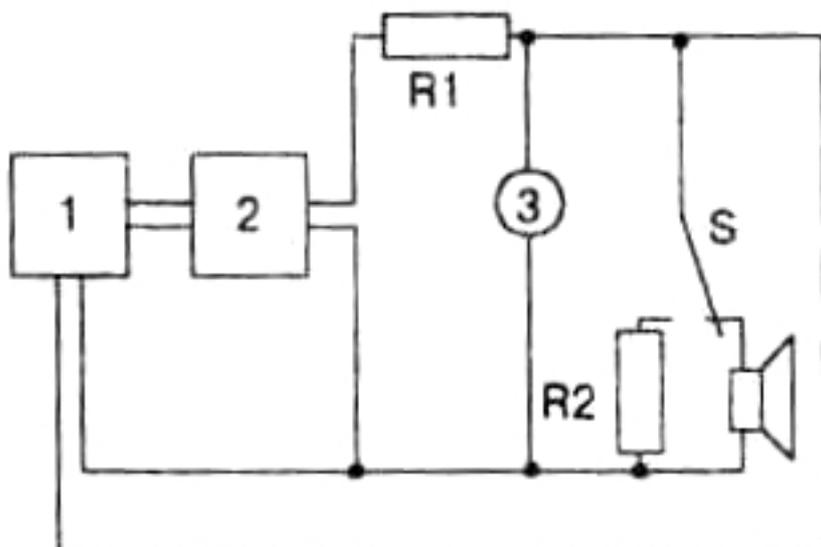
В предыдущие годы в технической документации на отечественную аппаратуру указывалась *номинальная мощность*, которая определялась заданным уровнем нелинейных искажений. Она обычно и входила в название акустической системы, например, 35АС-01. Затем, после того как в международных стандартах перешли на другие виды мощностей, в названии начали указывать паспортную мощность, например, S-90. Через некоторое время в названиях фигурировала уже долговременная (или даже кратковременная) мощность, например, 150АС. Создается впечатление, что мощности все время растут, хотя в конструкции ничего не меняется. Дело только в различном определении мощностей, и многие фирмы пользуются этим в рекламных целях (поэтому требуется хорошая осведомленность пользователей в этих тонкостях).

Импеданс

Для согласования акустических систем с усилителями мощности очень большое значение имеет характер *полного входного электрического сопротивления (импеданса)*. Электрическое сопротивление реальных многополосных акустических систем и отдельных громкоговорителей имеет комплексный характер, зависящий от частоты, что показано на рис. 8.



Обычно в национальных и международных стандартах предусматривается запись частотной зависимости модуля электрического сопротивления, хотя запись фазовых характеристик импеданса также очень полезна и часто приводится в современных каталогах. Схема измерений показана на рис. 9. В современных цифровых компьютерных станциях измеряются комплексные частотные характеристики (амплитудные и фазовые) входного электрического сопротивления.



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

В каталогах на аппаратуру задается обычно значение импеданса на частоте, соответствующей минимуму кривой (рис. 8) с допустимым отклонением 20%. Например, если в технической документации задано номинальное значение 8 Ом, то значение модуля импеданса на частоте электромеханического резонанса не должно быть ниже 6,3 Ом.

Электромеханические параметры и их измерение

Созданные за последние годы методы компьютерного расчета характеристик акустических систем в области низких частот требуют измерения у громкоговорителей, входящих в их состав, целого ряда "электромеханических" параметров, называемых "параметры *Small-*

Thiele" (по фамилиям ученых, разработавших эти методы):

- активного сопротивления звуковой катушки **Re**;
- частоты основного резонанса **fs**;
- добротностей: **Qts** (полной), **Qes** (электрической), **Qms** (механической);
- эквивалентного объема **Vas**;
- эффективной площади излучения **Sd**;
- максимального смещения звуковой катушки **Xd** и др.

Некоторые из этих параметров можно определить из записанной частотной характеристики входного электрического сопротивления.

Частота основного резонанса fs определяется как частота, при которой значение модуля полного электрического сопротивления имеет первый главный максимум (рис. 8). Частота может измеряться непосредственно или определяться из записанной частотной характеристики модуля полного электрического сопротивления. В некоторых случаях, особенно при измерениях высокочастотных громкоговорителей, более точным методом является определение резонансной частоты из фазочастотной характеристики (как частоты, при которой ФЧХ проходит через ноль).

Добротность — полная **Qts**, механическая **Qms** и электрическая **Qes** в электроакустических преобразователях связаны между собой соотношением:

$$1/Qts = 1/Qms + 1/Qes.$$

Добротность характеризует затухание в системе (которое зависит от поглощения звука в подвижной системе, в корпусе АС и т. д.). Чем больше затухание, тем меньше добротность, и наоборот. Если на резонансной кривой импеданса пик узкий и высокий, значит добротность большая, а затухание малое. В хороших акустических системах добротность должна быть малая, в пределах 0,7-1,1.

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

Измерения проводятся по схеме, изображенной на рис. 9: при плавном изменении частоты определяется частота f_0 , при которой показания вольтметра будут максимальными (U_{max}); затем определяется частота $f_{эм}$, соответствующая минимальным показаниям (U_{min}); а также отмечаются две частоты f_1 и f_2 , расположенные в области $f_1 < f_0 < f_2$, на которых напряжения равны $U_1 = U_2$.

Величина этих напряжений определяется как

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

где R_0 — сопротивление громкоговорителя на постоянном токе, а $|Z|_{max}$ — максимальное

значение модуля. В этом случае механическая добротность равна:

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

Полная добротность определяется как:

$$Q_{TS} = Q_{MS} \frac{R_0}{|z|_{MAX}} .$$

Электрическая добротность вычисляется по уже приводившейся формуле **$1/Q_{ts} = 1/Q_{ms} + 1/Q_{es}$** . Эквивалентный объем **Vas** определяется как закрытый объем воздуха, имеющий акустическую гибкость, равную гибкости подвижной системы громкоговорителя:

$$Vas = Vb [(fc/fs)^2 - 1],$$

где **fs** — резонансная частота громкоговорителя без оформления, **fc** — резонансная частота громкоговорителя, помещенного в закрытый корпус объемом **Vb** с хорошей герметизацией. Объем ящика выбирается из условия:

$$fc > \sqrt{2} fs.$$

Кроме того, необходимо знать максимально допустимое смещение звуковой катушки. Эти параметры в настоящее время обязательно указываются в каталогах на низкочастотные громкоговорители.

Современная цифровая техника позволяет использовать быстрые и точные методы

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

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

Еще один очень важный момент при оценке параметров электроакустической аппаратуры, особенно для нашей страны — это устойчивость и надежность характеристик при эксплуатации в различных климатических и механических условиях. В соответствии с ними образцы аппаратуры, предварительно измеренные по всем

параметрам, помещаются на определенное время в соответствующие условия (камеры тепла, холода, влажности и т. д.). Затем, после выдержки, снова проверяется их работоспособность и параметры. В каталогах на аппаратуру обязательно должны указываться допустимые условия эксплуатации по температуре, влажности и др.

Параметры, указываемые в современных каталогах на акустические системы, можно показать на примере АС фирмы Tannoy 215 DMT II: амплитудно-частотная характеристика (frequency response) — от 35 Гц до 35 кГц (+/-3 дБ); чувствительность (sensitivity) — 104 дБ/Вт/м; нелинейные гармонические искажения (THD) < 0,5%; паспортная мощность (RMS) — 200 Вт; пиковая мощность (peak) — 500 Вт; угол излучения — 90 град (-6 дБ).

Субъективные экспертизы

Все виды электроакустической аппаратуры, кроме измерения объективных параметров, должны подвергаться обязательной процедуре субъективной оценки качества звучания (что принципиально отличает электроакустическую аппаратуру от других электронных приборов). Вызвано это тем, что, поскольку до настоящего времени не завершено решение проблемы расшифровки слухового образа, нет уверенности, что даже измерение тридцати и более параметров гарантирует необходимое качество звучания. В практике конструирования акустической аппаратуры можно привести немало примеров, когда, например, два акустических агрегата с

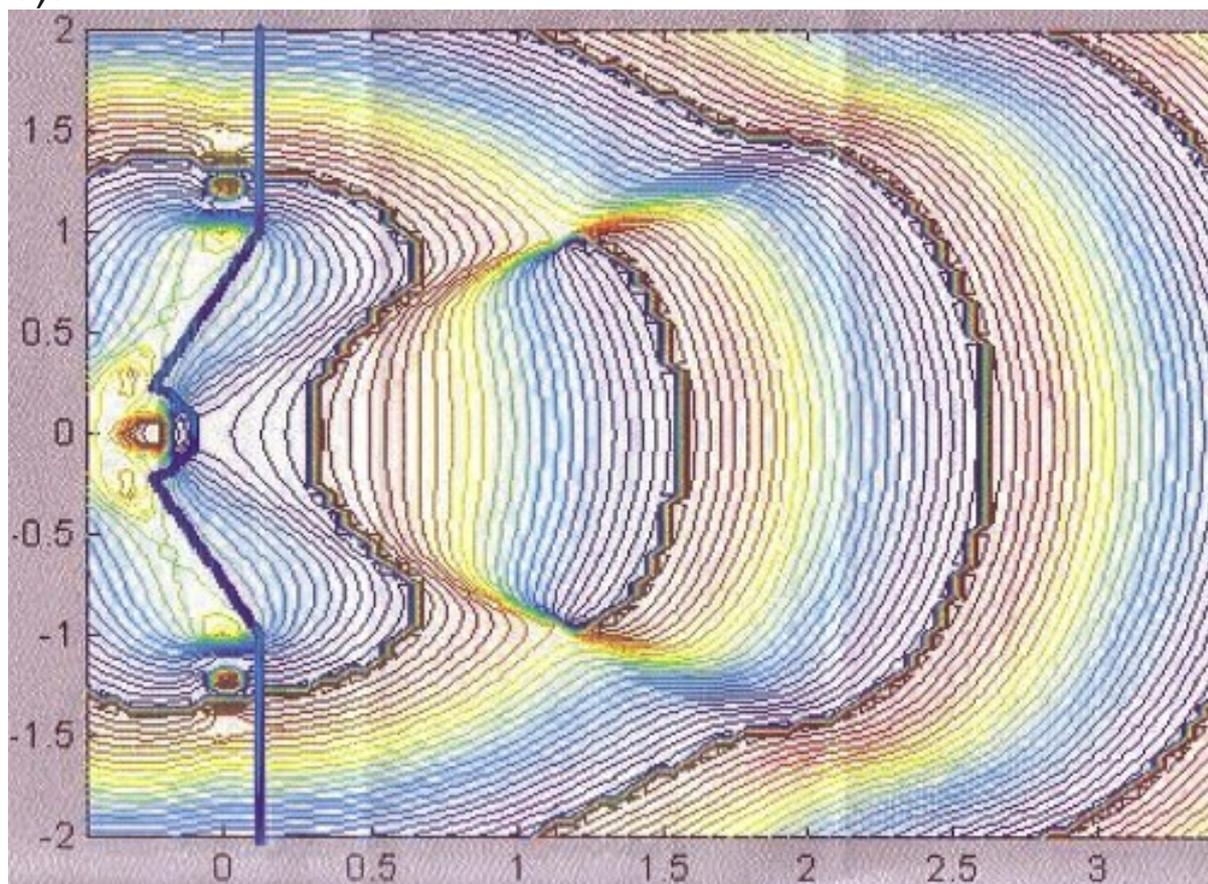
примерно одинаковыми объективными параметрами получают разные оценки при субъективном прослушивании. Чтобы обеспечить максимальную повторяемость и стабильность оценок при субъективной экспертизе, в международных стандартах (которые в настоящее время подвергаются существенной доработке в связи с переходом на системы пространственного звука) четко оговариваются условия проведения испытаний, требования к выбору помещения, программного материала, выбору экспертов, методов оценок и статистической обработке материалов.

В следующих частях будут рассмотрены конструкции акустических систем (громкоговорителей) и их основных элементов с использованием приведенных выше параметров

Часть 3.1. Конструкция электродинамических громкоговорителей. Причины возникновения линейных искажений.

В предыдущих частях были представлены вопросы истории развития громкоговорителей и методы измерения линейных и нелинейных искажений в них. В данной статье будут рассмотрены причины возникновения этих искажений и способы их снижения за счет выбора конструктивных и технологических параметров громкоговорителей. Электродинамический громкоговоритель представляет собой сложный электромеханоакустический преобразователь, в

котором происходят линейные и нелинейные преобразования музыкального и речевого сигнала (подводимого в виде напряжения к звуковой катушке) в распределенное в пространстве звуковое давление, изменяющееся во времени (рис. 1).



Музыкальные и речевые сигналы имеют сложную нестационарную временную структуру. Задачей громкоговорителей является передача этой структуры без искажений (технически более реализуемой является передача сигналов с искажениями ниже порогов слуха). Учитывая, что электродинамический громкоговоритель имеет очень ограниченное количество конструктивных элементов, реализация такой задачи представляет большие трудности. Именно поэтому вопросам расчета, дизайна и технологии громкоговорителей

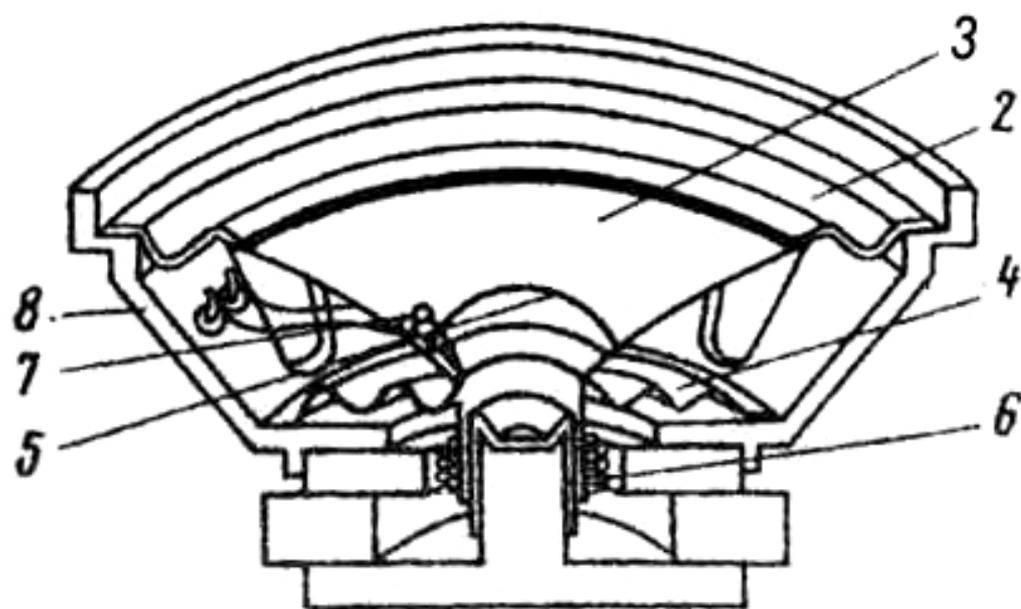
уделяется огромное внимание. Разработкой алгоритмов и программ для компьютерного проектирования громкоговорителей, совершенствованием их технологии и производства занимаются крупнейшие научные центры и фирмы на протяжении многих десятилетий (например, фирмы JBL, KEF, B&W, Celestion, Philips, Sony и многие другие).

Системная модель громкоговорителя

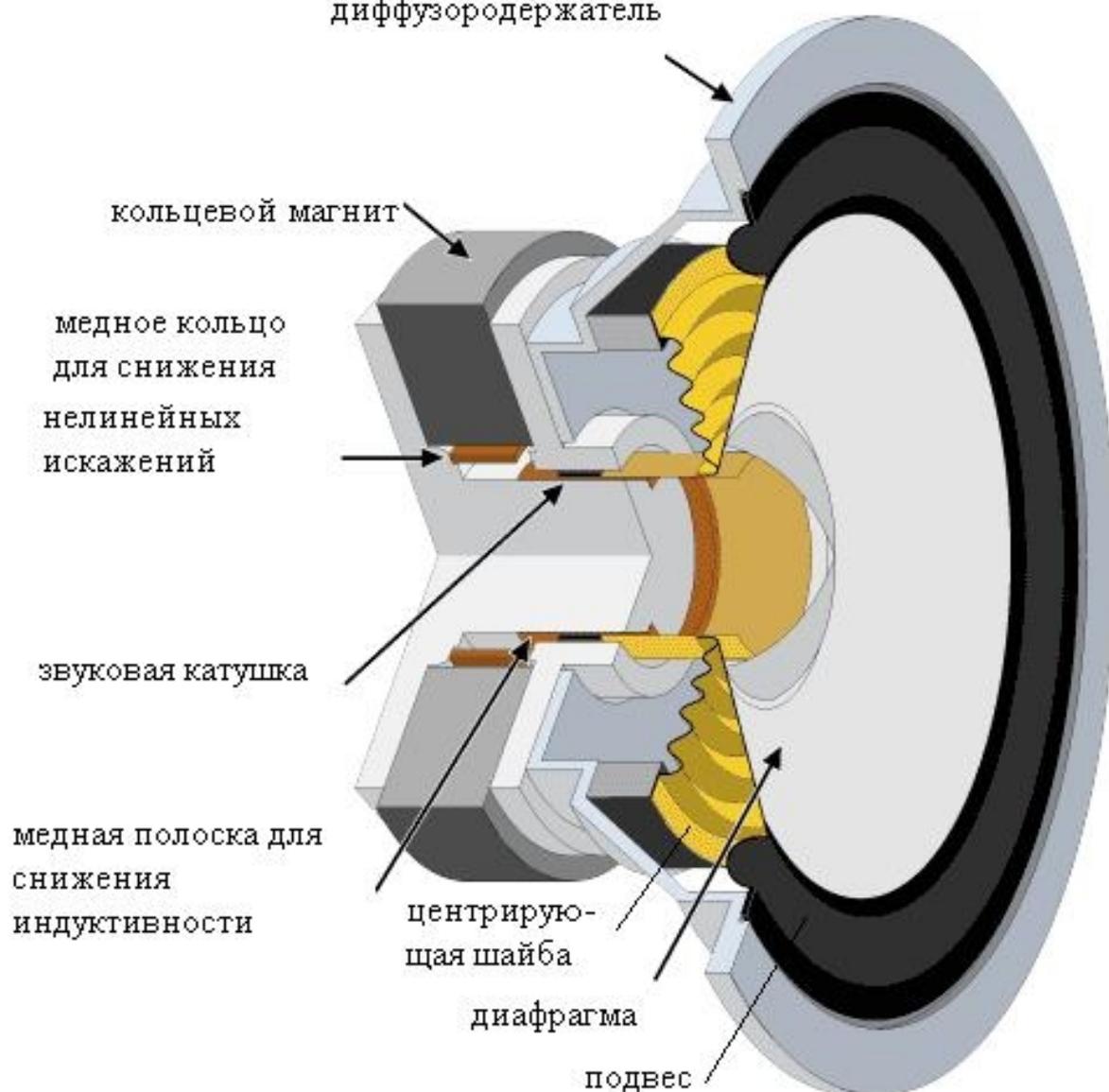
Функционально электродинамический громкоговоритель может быть представлен в виде системной модели, состоящей из:

- *электромагнитного преобразователя* (магнитная цепь + звуковая катушка), преобразующего подводимое напряжение в переменный ток и в электромеханическую силу;
- *механического преобразователя* (подвижная система), осуществляющего преобразование подводимой электромеханической силы в распределенное по поверхности диафрагмы смещение;
- *акустомеханического преобразователя* (диафрагма + воздушная среда), выполняющего преобразование смещения в распределенное в пространстве звуковое давление.

Все эти подсистемы оказывают как прямое, так и обратное воздействие друг на друга. В каждой из них возникают как линейные, так и нелинейные искажения сигнала.



диффузордержатель



Подвижная система (рис. 2а, 2б) включает в себя подвес (2), диафрагму (коническую или купольную, 3), центрирующую шайбу (4), пылезащитный колпачок (5), звуковую катушку (6), гибкие выводы (7). Звуковая катушка представляет собой цилиндрический каркас с намотанным в несколько слоев изолированным проводником. При пропускании переменного тока по звуковой катушке, помещенной в радиальный зазор магнитной цепи, на нее будет действовать механическая сила $F = BLI$, где B — индукция в рабочем зазоре, L — длина проводника, I — сила тока. Под действием этой силы возникают осевые колебания катушки и скрепленной с ней диафрагмы.

Центрирующая шайба представляет собой гофрированную мембрану, которая обеспечивает центровку звуковой катушки в зазоре, препятствует ее крутильным колебаниям, позволяя ей совершать осевые колебания. Центрирующая шайба должна обладать большой гибкостью в осевом направлении и малой — в радиальном и кольцевом.

Подвес — кольцевая, обычно гофрированная оболочка, позволяющая диафрагме совершать осевые колебания и предохраняющая ее от крутильных колебаний. Она также должна обладать большой гибкостью в осевом направлении и малой — в кольцевом и радиальном.

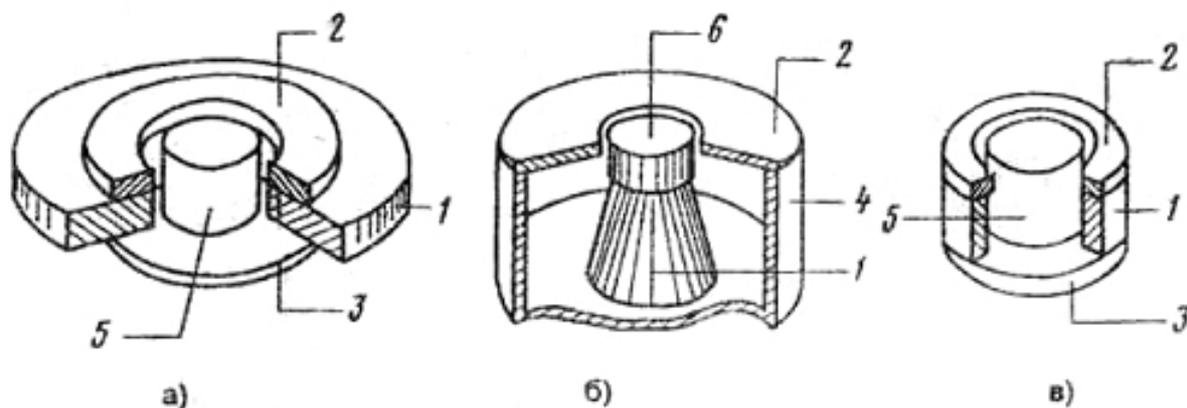
Диафрагма (диффузор) представляет собой упругую оболочку различной формы (коническую, сферическую, плоскую и др.), в которой под

действием механической силы со стороны звуковой катушки возникают колебания, которые возбуждают окружающую воздушную среду и создают звуковые волны.

Пылезащитный колпачок — купольная или плоская пластинка, предохраняющая зазор магнитной цепи от попадания пыли и одновременно являющаяся ребром жесткости для диафрагмы.

Гибкие выводы — проводники, соединяющие выводы звуковой катушки с присоединительными клеммами громкоговорителя.

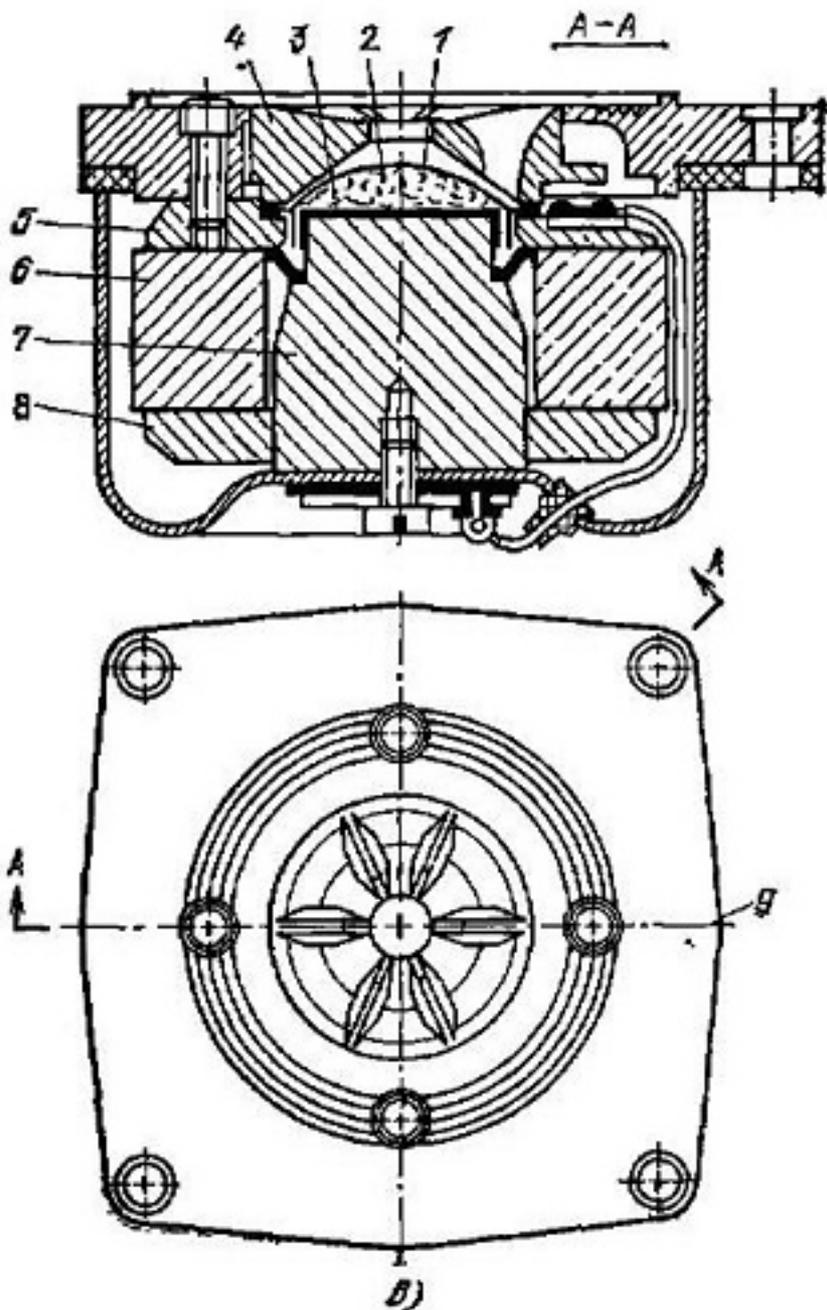
Магнитная цепь выполняется обычно в трех вариантах (рис. 3): кольцевая с ферритовыми магнитами (а), керновая с литыми магнитами (б) и кольцевая с литыми магнитами (в). Элементами магнитной цепи являются: магнит в виде кольца или керна, верхний (2) и нижний (3) фланцы, стакан или скоба (4), керн (5), полюсный наконечник (6). Постоянный магнит создает постоянный магнитный поток, замкнутые силовые линии которого пересекают цилиндрический воздушный зазор между верхним фланцем и керном в радиальном направлении.



Диффузордержатель (рис. 2б) служит для объединения магнитной цепи и подвижной системы

и обеспечивает возможность закрепления громкоговорителя в корпусе АС, с которым он предназначен работать.

Представленная конструкция используется, в основном, в низкочастотных громкоговорителях. Конструкции средне- и высокочастотных электродинамических громкоговорителей несколько отличаются (хотя принцип их работы одинаков). В них обычно используется купольная диафрагма, керновая магнитная цепь и др. Пример конструкции показан на рис. 4. Каждый из элементов подвижной системы и магнитной цепи вносит свой вклад в возникновение линейных и нелинейных искажений и оказывает свое влияние на качество звучания.



Подвижная система представляет собой совокупность различных оболочек вращения (подвес, диффузор, шайба, колпачок, катушка), которые под действием приложенной силы совершают вынужденные линейные и нелинейные колебания. Применение современной измерительной техники, в частности, голографической интерферометрии, а также создание методов компьютерного моделирования

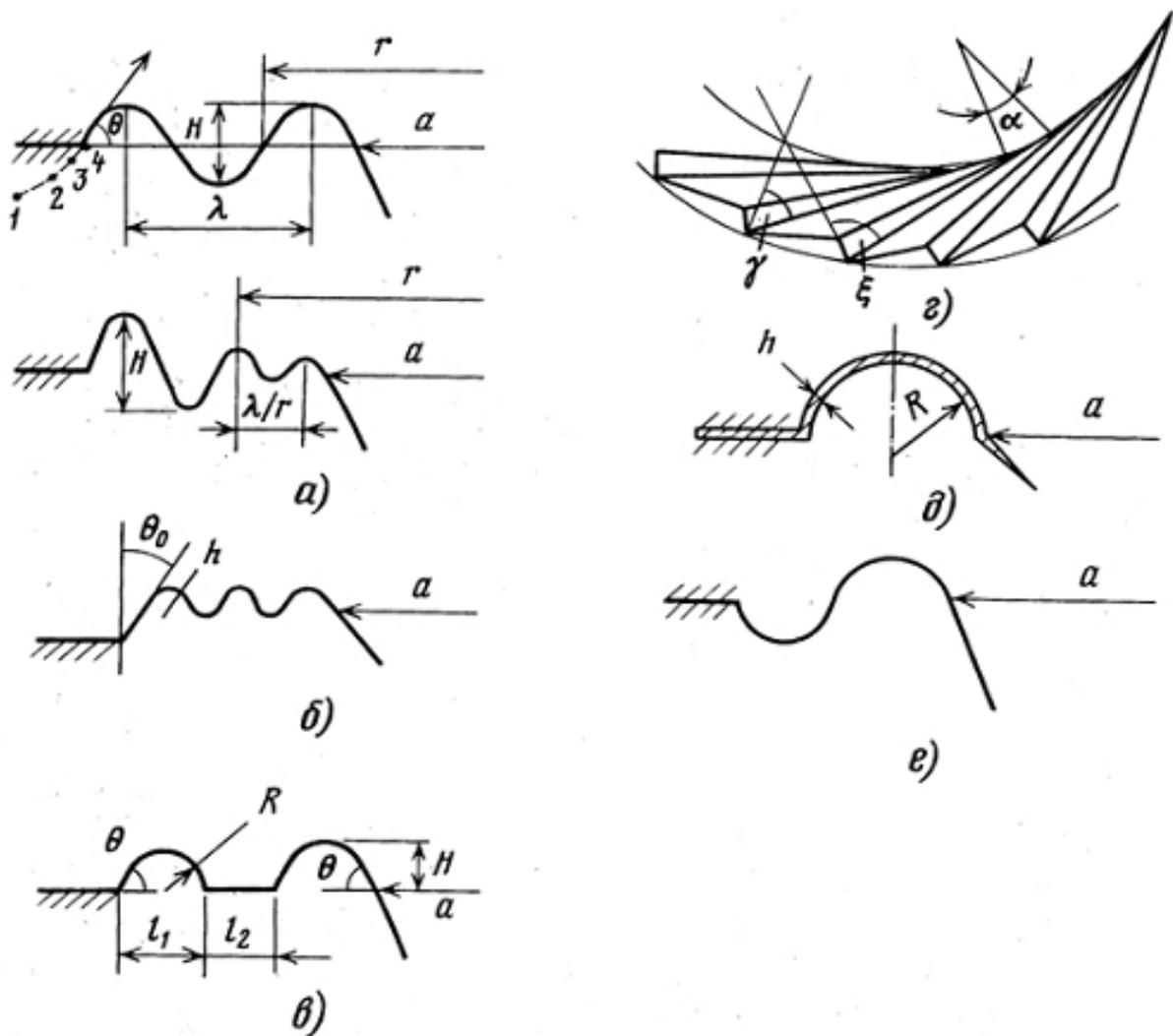
позволило к настоящему времени детально изучить эти процессы.

Линейные искажения, оцениваемые по форме амплитудно-частотной характеристики (АЧХ) и ее неравномерности, зависят, прежде всего, от структуры колебаний подвижной системы, то есть характера распределения амплитуд и фаз смещений на поверхности диафрагмы и подвесов.

Подвесы

В области *низких частот* (от начала диапазона до частоты примерно 300-400 Гц) колебания диафрагмы носят поршневой характер. Основное влияние на форму АЧХ оказывают резонансные колебания подвесов, зависящие от их конструктивных и физико-механических параметров. Выбор конфигурации внешних гофрированных подвесов и шайб определяется требованиями к обеспечению заданной резонансной частоты громкоговорителя, большой амплитуды смещения и линейности упругих характеристик (то есть зависимости смещения от величины приложенной силы). В соответствии с этими требованиями подбираются и специальные материалы для их изготовления.

Основные виды конфигураций подвесов, используемых в настоящее время в производстве громкоговорителей, показаны на рис. 5. В основном, это подвесы с синусоидальной гофрировкой постоянной или переменной высоты (а, б), подвесы в виде дуг окружностей (в), тангенциальной (г), тороидальной (д) или S-образной формы (е).



На линейность упругих характеристик и значение резонансной частоты оказывают влияние форма, толщина, высота гофрировки, радиус кривизны, место и способ закрепления краев и т. д. Оптимизация конструктивных элементов выполняется в настоящее время методами компьютерного моделирования. Как правило, в низкочастотных мощных громкоговорителях используются подвесы тороидальной или S-образной формы, так как они обеспечивают возможность получения больших смещений диафрагмы. В среднечастотных и высокочастотных громкоговорителях чаще применяются синусоидальные подвесы.

Материалы для подвесов громкоговорителей должны обладать:

- способностью сохранять приданную им форму (синусоидальную, тороидальную, тангенциальную и т.д.) в широком диапазоне упругих воздействий;
- линейной упругостью в возможно более широком диапазоне изменений амплитуд смещений;
- большим коэффициентом затухания в заданном частотном диапазоне и сравнительно малой плотностью;
- стабильностью во времени, влаго- и температурной устойчивостью.

В низкочастотных громкоговорителях используются, как правило, специальные материалы для подвесов.

1. Резины и резиновые смеси: бутиловые резины, резины из натуральных латексов, синтетические резины, хлоропреновый каучук и др. Подвесы изготавливаются из сырой смеси методом прямого формования (вулканизация в горячей пресс-форме).

2. Пористые вспененные материалы: полиуретан (фирмы Onkyo, Sony), неопрен (фирма Celestion), пенополиуретан (фирма Tannoy), пластифицированный поропласт (фирма Siare), пористая резина и т. д. Подвесы также изготавливаются методом горячего формования. Они имеют существенно меньшую, чем у резины, плотность и относительно большой коэффициент демпфирования.

3. Пластифицированные (пленочные) материалы: поликарбонат, бексифлекс, полиэстер, поливинилхлорид, полиуретан, фенол и т. д.

4. Тканевые материалы с различными пропитками и покрытиями, например, ткань, покрытая бутиллатексом; прорезиненные ткани капроновые и натуральные; синтетические ткани различных плетений с покрытиями из полимеров.

Центрирующие шайбы

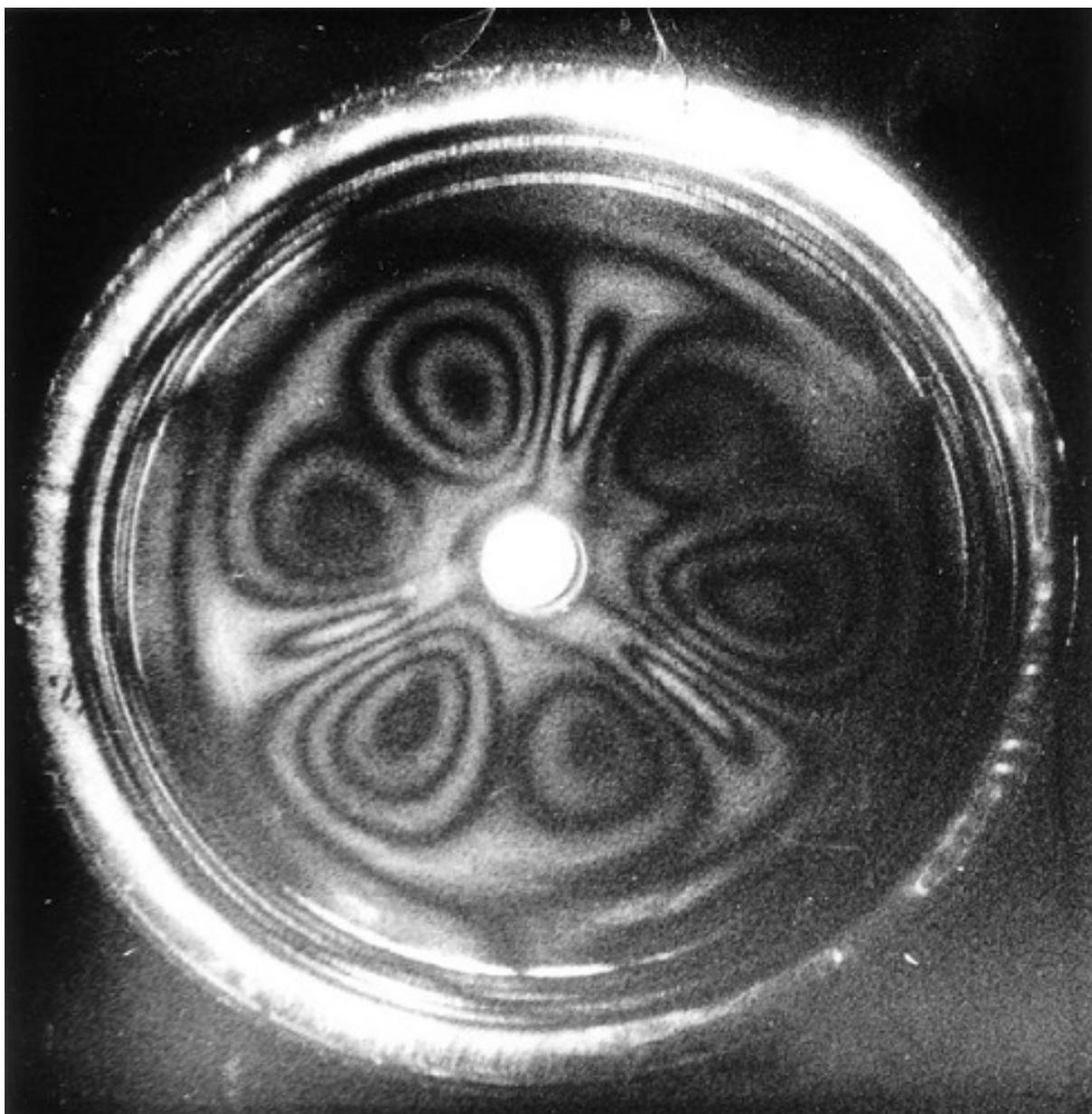
К материалам, применяемым для изготовления центрирующих шайб, также предъявляются особые требования: материал должен обладать хорошей воздухопроницаемостью для снижения нелинейных искажений, обусловленных сжатием воздуха в объеме под шайбой, особенно при больших смещениях головки громкоговорителя. Всем этим условиям в наилучшей мере удовлетворяют натуральные хлопчатобумажные и шелковые ткани, которые пропитываются различными лаками. За последние годы были созданы различные синтетические ткани, такие как акриловые; тефлоновые с металлическими нитями для улучшения теплоотвода от катушки; из полипропиленовых волокон со связующим из фенольной, полиэфирной или акриловой смолы и т. д. В широкополосных и среднечастотных громкоговорителях подвесы часто прессуются вместе с диафрагмой из одного и того же материала.

Необходимо отметить, что, несмотря на достижения в технологии и оптимизации конструкции подвесов и шайб, добиться строгой

линейности их упругих характеристик в большом диапазоне смещений не удается, что является одной из причин возникновения нелинейных искажений в громкоговорителях.

Диффузоры

В области *средних частот*, начиная примерно с частоты 300...1000 Гц, на диффузоре формируется волновая картина распределения амплитуд и фаз с *радиальными узловыми линиями* (рис. 6). По мере повышения частоты число волн по окружности возрастает от четырех до восьми, причем устанавливаются они на некотором расстоянии от катушки ближе к подвесу. Этот вид резонансных колебаний с радиальными узловыми линиями носит паразитный характер, так как в силу их симметричности радиальные резонансы компенсируют друг друга и мало влияют на форму АЧХ на оси. Однако при нарушении однородности диффузоров, перекосов при сборке, симметричность нарушается, и эти резонансы могут оказывать существенное влияние на неравномерность АЧХ, измеренной на оси и под углами, и на уровень нелинейных искажений.

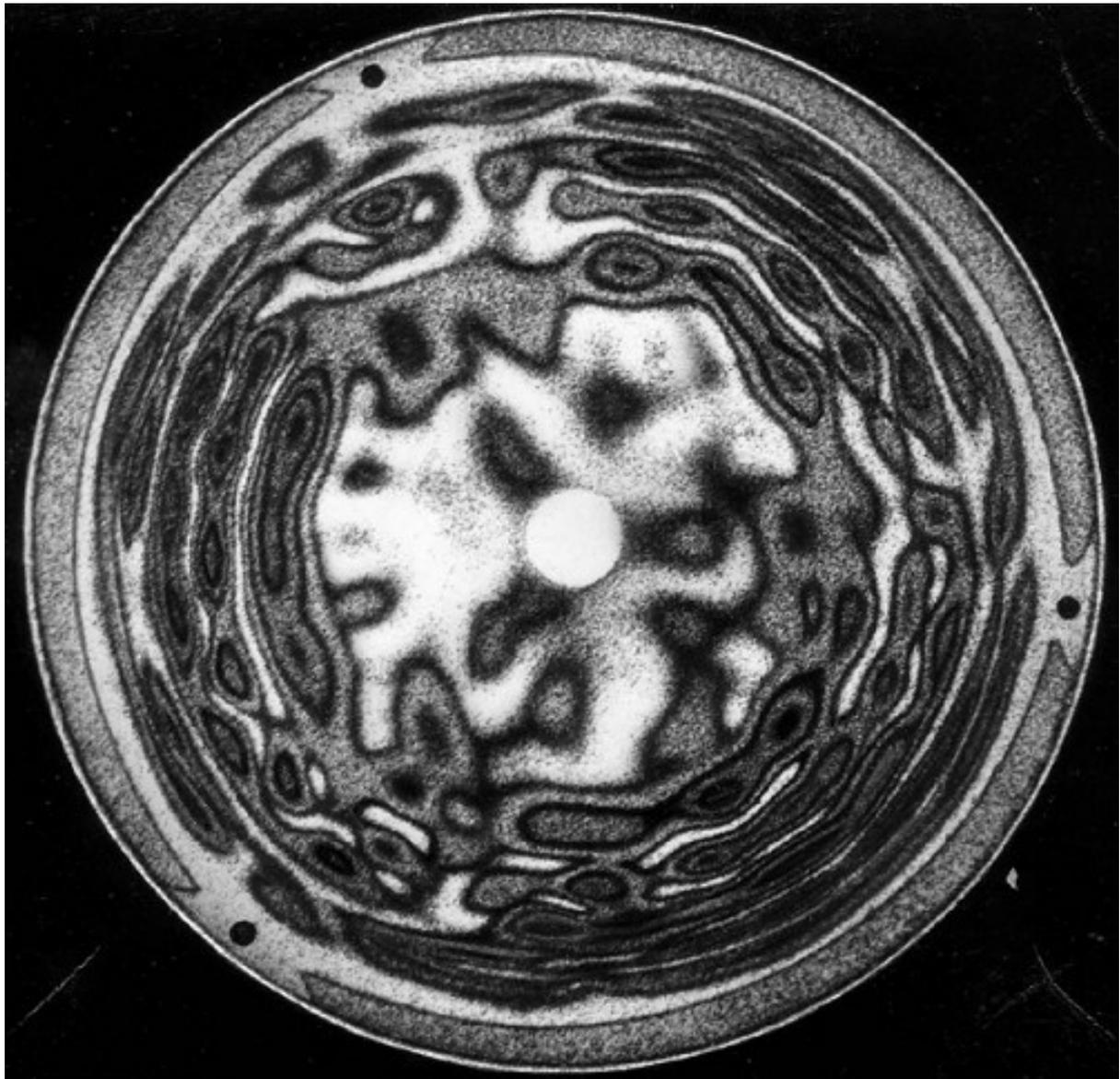


Для борьбы с этими резонансами используют различные методы повышения жесткости диффузоров в окружном направлении: за счет направленной укладки бумажных волокон при отливке, нанесения кольцевых ребер жесткости, применения анизотропных материалов и т. д. В частности, влияние направленной укладки волокон целлюлозы вдоль окружности, проверенное на партиях серийных диффузоров, показало, что оно позволяет увеличить модуль упругости в 1,5-2 раза в окружном направлении и поднять уровень АЧХ на

3...4 дБ в области средних частот. Пример громкоговорителя с диафрагмой с ребрами жесткости специальной формы показан на рис. 7.

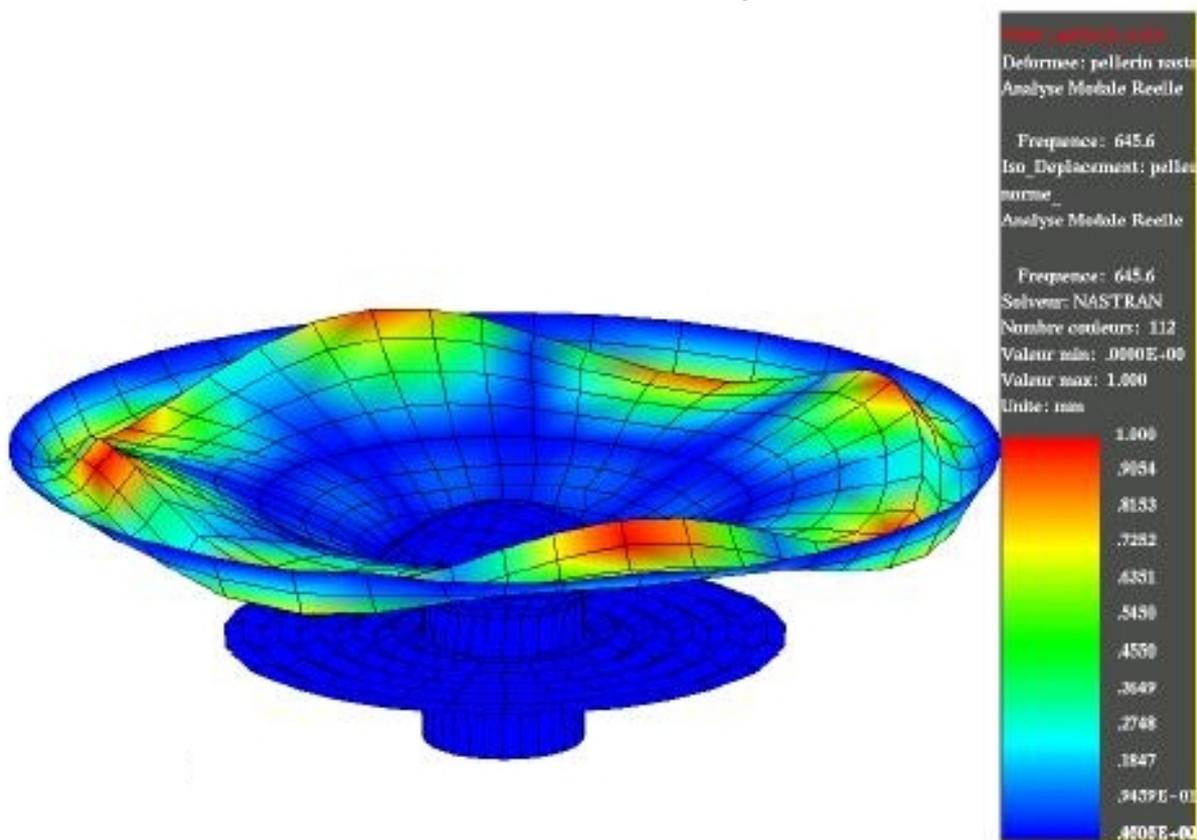


В области *высоких частот*, от 1,5 кГц, основное влияние на АЧХ оказывают резонансы с окружными узловыми линиями (рис. 8). По мере повышения частоты волновая картина перераспределяется: на резонансных частотах (в воспроизводимом диапазоне обычно оказывается 10-13 резонансных частот диффузора) устанавливается целое число окружных узловых линий; при увеличении частоты их число увеличивается, расстояния между узловыми линиями сокращаются, и, когда оно становится меньше длины звуковой волны на той же частоте, уровень излучения падает.



Резонансным частотам с окружными узловыми линиями обычно соответствуют пики-провалы в области средних и высоких частот на АЧХ. Для уменьшения амплитуд резонансов на этих частотах применяются различные меры с целью увеличения демпфирования в материале диффузора (пропитки, смазки и т. д.), а также конструктивные меры (выбор формы образующей диафрагмы, распределение толщины и плотности и т. д.). Таким образом, задача выбора формы диафрагмы и материала, из которого она изготовлена, сводится к тому, чтобы подобрать такую

конфигурацию, при которой резонансы были бы сдвинуты в высокочастотную область, и поршневой характер движения сохранялся в как можно более широком диапазоне частот. Именно поэтому диафрагмы делают или в виде конуса с криволинейной формой образующей, или в виде полусферы (поскольку у криволинейных поверхностей жесткость выше), подбирают специальное распределение толщины, дополнительные ребра жесткости и специальные материалы. Оптимизация формы диафрагмы выполняется с помощью компьютерного моделирования. Пример рассчитанных колебаний подвижной системы показан на рис. 9.



Использование современных техник аурализации (создания трехмерных компьютерных моделей звуковых полей) позволяет прослушать звучание музыкальных программ на различных моделях

подвижных систем с широким спектром изменяемых параметров еще до их реализации в реальной конструкции.

Причем выбор материала идет по двум направлениям: увеличение жесткости или нанесение специальных демпфирующих материалов для уменьшения амплитуд резонансных колебаний. Все эти меры направлены на снижение неравномерности АЧХ громкоговорителей, то есть снижение линейных искажений в них.

Материалы для диафрагм

Выбор материалов для диафрагм представляет особые трудности, так как в соответствии с указанными выше требованиями они должны иметь большие внутренние потери; сравнительно малую плотность; высокую климатическую, температурную и временную стабильность; удобство переработки; доступность по цене для серийного производства громкоговорителей.

Поиск материалов для диффузоров, удовлетворяющих этим требованиям, ведется по следующим основным направлениям.

Натуральная целлюлоза различных, в основном, хвойных пород древесины, и ее композиции с органическими и неорганическими волокнами (повышающими ее прочность, жесткость и демпфирующие свойства; например, волокнами шерсти, льна, лиственных пород дерева, углестекловолокнами, графитовыми чешуйками, металлическими волокнами и др.), обработанные влагозащитными и демпфирующими пропитками. О степени сложности таких композиций можно судить

по тому, что в них для некоторых видов диафрагм используются до десяти-пятнадцати составляющих. То, что с момента появления диффузорных электродинамических громкоговорителей в серийном производстве с 30-х годов и до настоящего времени основным материалом для изготовления диффузоров в мировой промышленности остается целлюлоза, объясняется уникальными природными свойствами этого продукта переработки древесины различных сортов. Существует широко распространенное заблуждение, что диффузоры делают из бумаги. Это абсолютно неверно — общим с бумагой у них являются только некоторые исходные продукты (различные сорта целлюлозы), а дальше состав композиций и технологические процессы переработки для получения конечного продукта (бумаги или диафрагмы громкоговорителя) совершенно разные.

Для производства громкоговорителей используется несколько видов целлюлоз (хвойных, лиственных, растительных) и их композиций, что позволяет с помощью специальных технологических процессов (размола, отлива, прессования, пропитки и др.) получать материалы для диффузоров с хорошим сочетанием физико-механических свойств.

Естественность тембра, "мягкость", "натуральность" звучания лучших динамических громкоговорителей в значительной степени обуславливается свойствами природного материала — целлюлозы.

Металлические и композитные металлические материалы за последние годы нашли широкое

применение в производстве средне- и высокочастотных громкоговорителей. Полученные из этих материалов диафрагмы позволили создать линейку громкоговорителей, обеспечивающих расширенный диапазон воспроизводимых частот (от 30 Гц до 40 кГц), повышенную характеристическую чувствительность (95...98 дБ/Вт), высокую тепловую устойчивость, надежность и т. д. Ряд фирм используют их в моделях средне- и высокочастотных излучателей для высококачественных акустических систем, например, фирмы Audax (Франция), JBL (США), Kenwood (Япония), Yamaha (Япония) и др. Как правило, в качестве материалов для диафрагм используются металлы с малой удельной массой и большой жесткостью (бериллий, бор, титан, алюминий и др.), композитные материалы на их основе, а также слоистые металлические соединения, анодированный алюминий и др. Наилучшее сочетание параметров имеет бериллий, самый легкий в мире металл с наибольшей жесткостью, однако он по степени ядовитости в процессе изготовления почти равен мышьяку, поэтому технология изготовления из него диафрагм громкоговорителей была освоена только совсем недавно и применяется сравнительно редко. В зависимости от вида материала для изготовления диафрагм (как правило, купольных для высокочастотных громкоговорителей) используется разная технология: метод штамповки из фольги или метод вакуумного напыления, что дает возможность изготовления многослойных диафрагм

из разных металлов, например, титан и слой бора, или алюминий и бериллий. Наибольшее распространение для изготовления купольных диафрагм нашли технологии штамповки или вакуумного напыления алюминия. Иногда применяется дополнительно метод анодного окисления, что позволяет создать на диафрагме слой окиси алюминия, а это увеличивает ее жесткость.

Шедевром современной технологии является одна из последних разработок фирмы Tannoy — высокочастотный громкоговоритель Prestige ST-200 с купольной диафрагмой диаметром 25 мм из титановой фольги толщиной 25 микрон, полученной методом вакуумного напыления, покрытой сверху слоем осажденного золота 24 карата.

Громкоговоритель с такой диафрагмой (рис. 10) позволяет получить следующие параметры: паспортную мощность 125 Вт, пиковую 550 Вт, чувствительность 96 дБ/Вт/м, частотный диапазон от 14(16) Гц до 54 кГц (при спаде -6 дБ) и 100 кГц (при спаде -18 дБ).



Преимуществом всех громкоговорителей с такими диафрагмами является поршневой характер движения, возможность воспроизводить широкий высокочастотный диапазон, широкая характеристика направленности. Недостатком (относительным) можно считать некоторую жесткость звучания за счет малого коэффициента затухания.

Пленочные, синтетические, тканые материалы с различными вибродемпфирующими пропитками, с большим коэффициентом демпфирования; например, на основе полиолефинов (полипропилена и полиэтилена) и композиционные материалы на основе высокомодульной ткани "кевлар" и др.

Натуральные и синтетические тканые материалы также довольно широко применяются для изготовления купольных диафрагм средне- и высокочастотных громкоговорителей. Тканые материалы используются в основном в двух вариантах: либо с пропиткой латексами, термостойкими смолами, поливинилхлоридами и т. д. (фирмы Yamaha, Audax и др.), либо в композиции с пленочными покрытиями, например, ткань, покрытая пленкой типа полиэстер (фирма Sansui). В 80-годы впервые появились диффузоры, изготовленные из сверхпрочных волокон, известных под названием **кевлар** (фирма DuPont). Введение волокон кевлара в бумажную массу позволяет сохранить вес и увеличить при этом жесткость. Такие конусы из целлюлозы с кевларовыми волокнами используются в громкоговорителях, обеспечивающих большой динамический диапазон и четкость звучания, что особенно важно для цифровых записей. К основным достоинствам этих материалов следует отнести: возможность использования чрезвычайно прогрессивной технологии изготовления диффузоров методом горячего прессования или термовакуумного формования из листа; большие внутренние потери в материале и высокая влагостойкость, что исключает необходимость использования дополнительных пропиток и смазок. В частности, полипропилен стал почти универсальным, так как он обладает высоким внутренним демпфированием, малым удельным весом, что позволяет получить гладкую

характеристику и высокую чувствительность. Кроме того, он обладает еще одним большим преимуществом: высокой влагостойкостью. Примерами громкоговорителей с диффузорами из полипропилена могут быть следующие модели: ScanSpeak 18W/8543 7", Dynaudio 17W-75 Ext. 7", Vifa P13WH-00-08 5.5" и др. Пример громкоговорителя с полипропиленовым диффузором фирмы KEF показан на рис. 11.

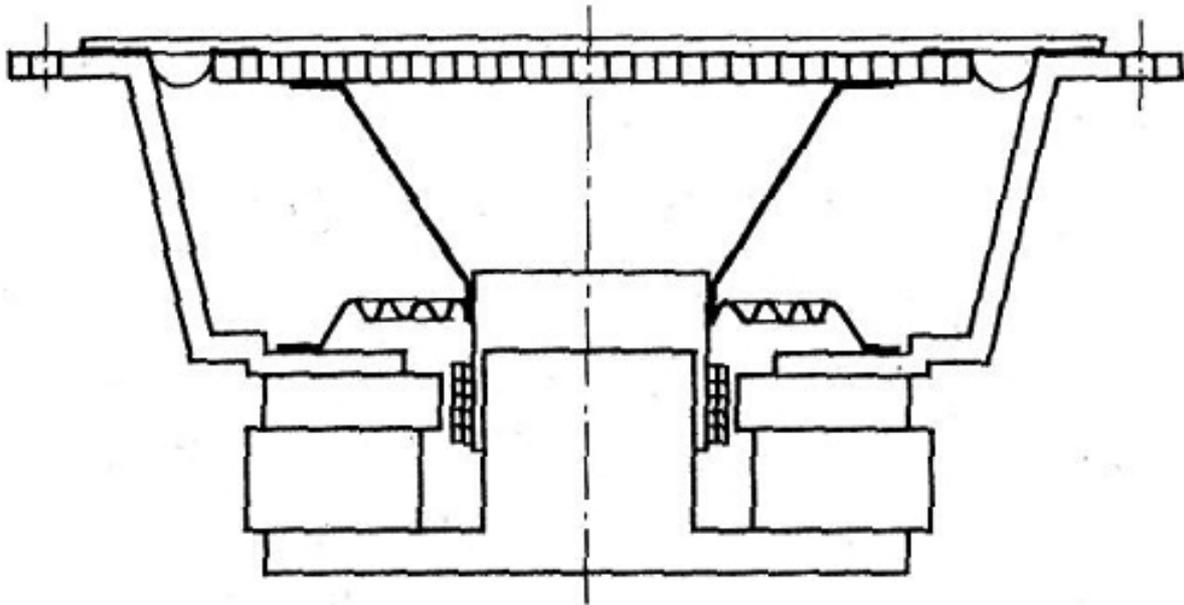


В современной практике разработок и производства громкоговорителей широко используются все вышеперечисленные направления для изготовления диафрагм, как "жесткие", так и "мягкие". Однако следует обратить внимание на то, что каждый из этих материалов придает свои спектральные характеристики и, следовательно, свой тембр звучания громкоговорителю, и иногда применение в одной акустической системе громкоговорителей, изготовленных из разных материалов, например, "мягкие" среднечастотники и "жесткие"

высокочастотники создает значительное расхождение по тембру.

Многослойные жесткие конструкционные материалы (типа сэндвич): в 60-е годы фирма Leak (Франция) разработала технологию изготовления диафрагм из вспененного гранулированного пенополистирола, армированного с двух сторон фольгой. В 90-е годы появились новые технологии изготовления диафрагм громкоговорителей из вспененных металлов, армированных с двух сторон тонкой фольгой. Были опробованы различные виды пенометаллов, но лучшие результаты были получены со вспененным никелем.

Обычно из таких конструкций изготавливаются плоские диафрагмы, общая конструкция подвижной системы существенно усложняется за счет использования дополнительного конуса (рис. 12). На базе таких материалов в 80-е годы японские фирмы Technics, Sony, Sanyo, Mitsubishi и др. разработали ряд моделей головок громкоговорителей с плоскими круглыми и квадратными диафрагмами из слоистых конструкций с различными сотовыми металлическими и полимерными заполнителями. Например, знаменитая фирма KEF использовала диафрагмы из вспененных материалов для низкочастотного громкоговорителя B139.



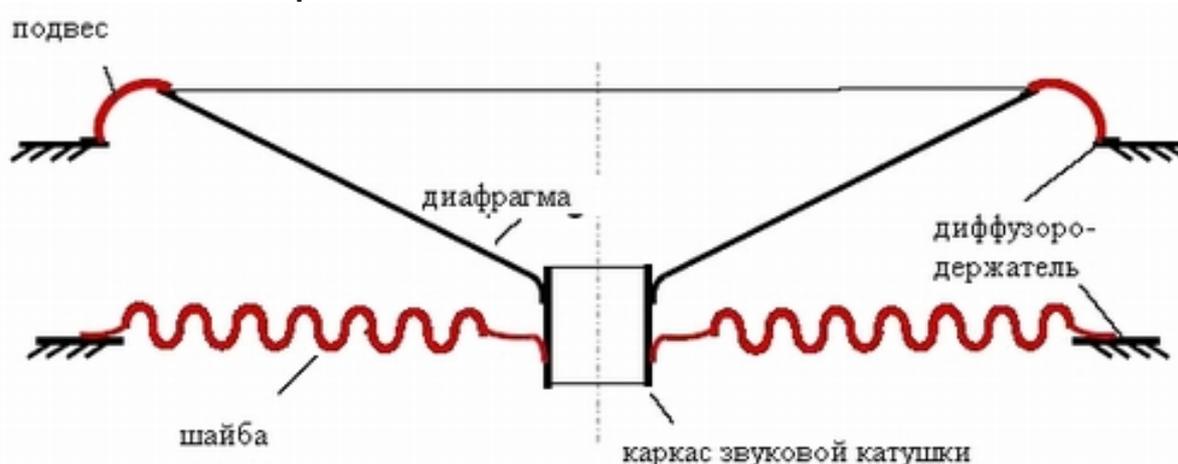
Разумеется, рассмотренные выше материалы не исчерпывают всех видов композиций, применяемых в современных промышленных громкоговорителях. Каждая фирма старается представить все новые и новые композиции и технологии, поскольку прогресс в развитии громкоговорителей идет именно в этих направлениях (изменение конструкций происходит менее быстрыми темпами). Причины, заставляющие их это делать, заключаются в поиске способов снижения как линейных, так и нелинейных искажений, возникающих при передаче музыкальных и речевых сигналов. Об основных причинах возникновения нелинейных искажений и мерах (как конструктивных, так и технологических) по их снижению будет рассказано в следующей статье.

Часть 3.2. Конструкция электродинамических громкоговорителей. Причины возникновения нелинейных искажений.

Физические процессы, приводящие к возникновению *нелинейных искажений* в электродинамических громкоговорителях, связаны, прежде всего, с нелинейной зависимостью выходного сигнала (звукового давления) от входного сигнала (приложенного напряжения к звуковой катушке громкоговорителя). Эта зависимость обусловлена нелинейностью упругих колебаний элементов подвижной системы (подвесов, шайб, диафрагм) и нелинейностью процессов электромагнитного преобразования в системе "магнитная цепь + звуковая катушка".

Подвижная система

Начнем с анализа причин возникновения нелинейных искажений в подвижной системе громкоговорителей, основные элементы которой показаны на рис. 1.

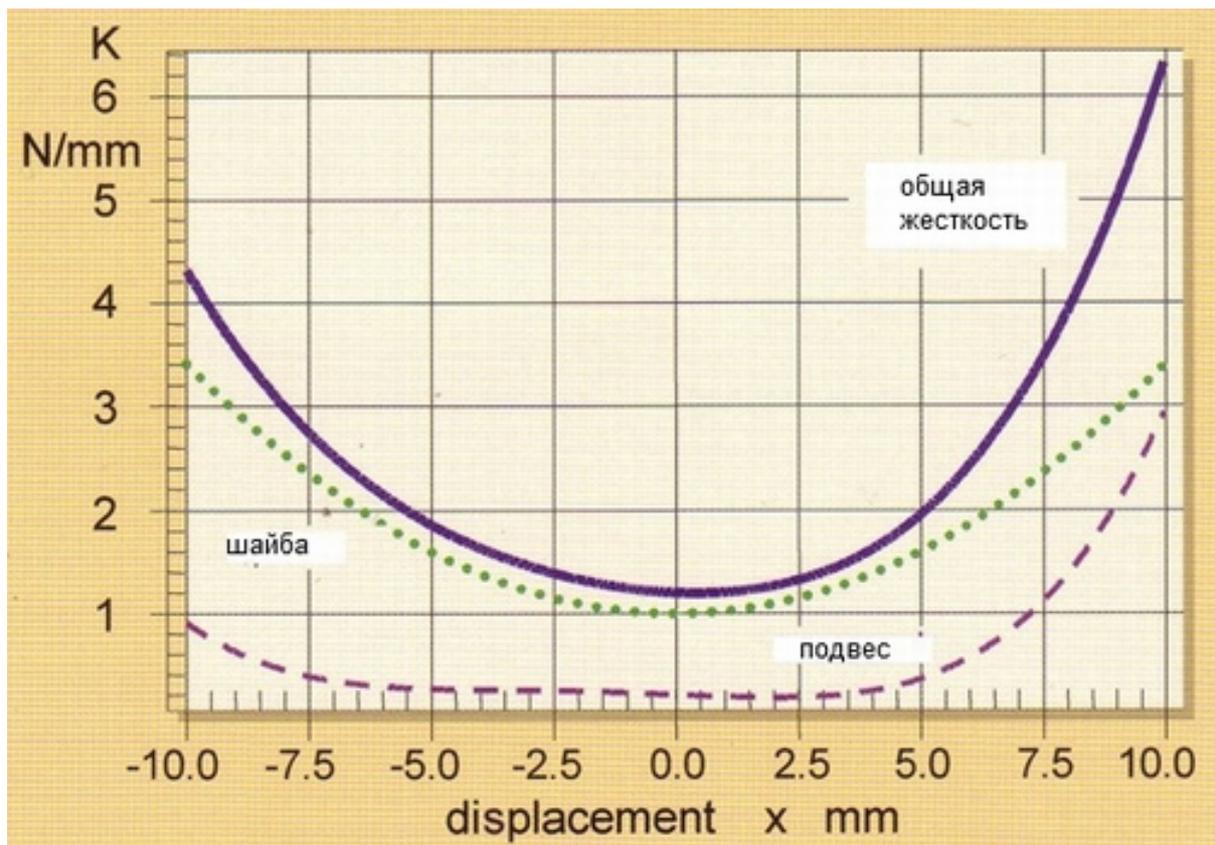


В области низких частот появление дополнительных гармоник в спектре (так же, как и интермодуляционных искажений) определяется, в основном, нелинейностью упругих характеристик (то есть зависимостью смещения от приложенной силы) в подвесах и центрирующих шайбах. В области средних и высоких частот начинают

вносить свой вклад в нелинейные процессы резонансные и параметрические колебания диафрагм. Кроме того, при наличии определенных дефектов в подвижных системах в спектре выходного сигнала могут появиться гармоники высших порядков ("дребезг").

Как уже было сказано, в реальных громкоговорителях связь между силой, приложенной к подвижной системе громкоговорителя со стороны звуковой катушки, и ее смещением в области низких частот имеет нелинейный характер: $F = k_1x + k_2x^2 + k_3x^3$, где k_1 , k_2 , k_3 — коэффициенты нелинейной жесткости, зависящие от физико-механических параметров материалов, из которых сделаны подвес и шайба (резина, поролон, целлюлоза, ткань и др.), и от их конструктивных параметров (вида и глубины гофрировки, толщины и т. д.).

Измерения величины общей жесткости (упругости) подвижной системы в зависимости от величины смещения, представленные на рис. 2, показывают, что с увеличением смещения (при больших мощностях) система становится все более жесткой (коэффициент нелинейных искажений при этом возрастает). Необходимо отметить также, что жесткость зависит от частоты и условий окружающей среды (температуры, влажности и т. д.).

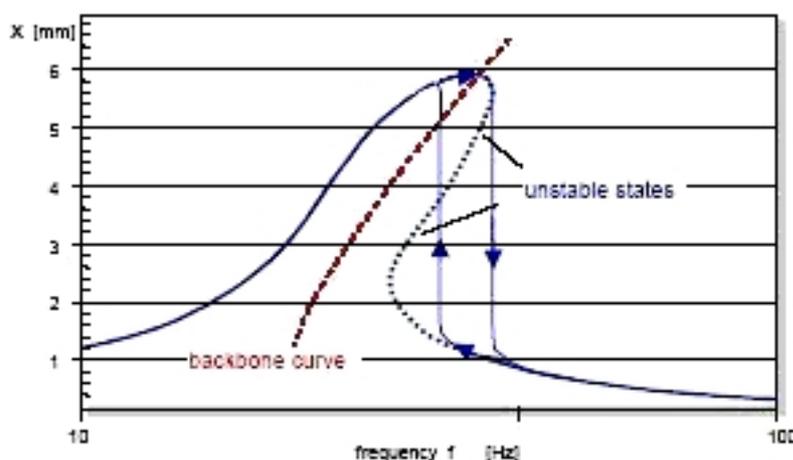


Интересно отметить, что центрирующие шайбы вносят больший вклад в нелинейность громкоговорителя, чем подвес. В некоторых случаях, например, при смещении шайбы от положения равновесия ("провисания"), минимум кривой жесткости (рис. 2) может не совпадать с положением равновесия громкоговорителя, что вызывает появление дополнительных гармоник в спектре. Это требует соответствующей корректировки при сборке подвижной системы, например, некоторого сдвига плоскости приклейки подвеса.

При разработке громкоговорителей выбор конструктивных параметров подвеса и шайбы представляет значительные трудности, так как, с одной стороны, необходимо обеспечить достаточно большое смещение подвижной системы, чтобы получить высокий уровень чувствительности (90-94

дБ/Вт/м), с другой стороны — обеспечить относительную линейность упругих характеристик. Методы их компьютерного расчета и оптимизации детально разработаны (описание некоторых из них имеется в книге автора "Электродинамические громкоговорители").

Одним из самых эффективных методов снижения нелинейных искажений в области низких частот, особенно на первом резонансе подвеса или шайбы, является увеличение демпфирования (снижения добротности). При больших добротностях, то есть малом затухании, может иметь место явление "скачка" — резкого изменения амплитуды вблизи вершины резонансной кривой, при этом колебания подвижной системы становятся неустойчивыми и при понижении и повышении частоты возбуждения могут иметь разные амплитуды, соответствующие разным точкам на резонансной кривой (рис. 3).



Такое явление называется *потерей устойчивости* и приводит к появлению субгармоник в спектре (то есть частот, равных $1/2$, $1/3$ и др. от основной частоты). Эффект "потери устойчивости" может проявляться и на более высоких частотах при больших смещениях за счет нелинейных эффектов

при колебаниях диафрагмы. Как уже было показано в предыдущей статье, диафрагма имеет собственные резонансы в области средних частот, и при воздействии на громкоговоритель сигналом достаточно большой мощности с частотой, равной удвоенной резонансной частоте диафрагмы, также могут возникать субгармоники.

Применение для подвесов и шайб материалов с высокими демпфирующими свойствами (например, резины) или использование дополнительных пропиток вязкими лаками приводит к снижению добротности, уменьшению амплитуды на резонансе и симметризации резонансных кривых, что вызывает существенное снижение нелинейных искажений системы. Это особенно важно при проектировании мощных низкочастотных громкоговорителей, где смещения подвесов могут достигать 10-15 мм в области частот 20-40 Гц. Именно поэтому в них используют, в основном, тороидальные подвесы из специальной резины (или прессованного поролона) и мостиковые гофрированные шайбы из пропитанных тканей.

Звуковая катушка и магнитная цепь

Как уже было сказано ранее, общие нелинейные искажения сигналов в громкоговорителях в области низких частот определяются как нелинейной упругостью подвесов, так и нелинейностью электромагнитных процессов преобразования в узле "звуковая катушка + магнитная цепь".

При движении звуковой катушки в зазоре магнитной цепи возникает сила, действующая со стороны магнитного поля на звуковую катушку,

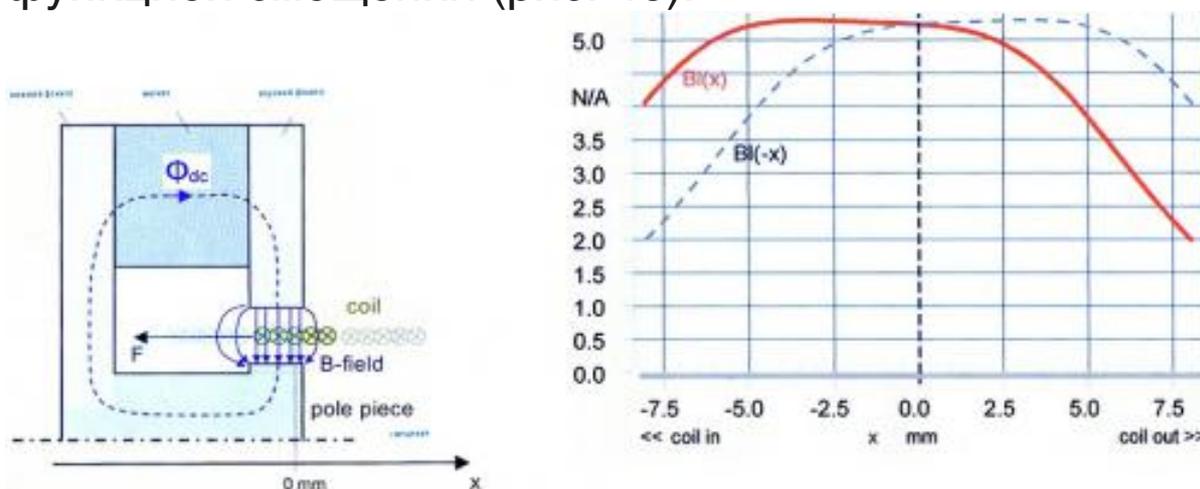
которая приводит к смещению подвижной системы громкоговорителя. Эта сила равна $F=BLI$ (B — индукция в зазоре, L — длина проводника, I — ток). Поскольку магнитный поток (как постоянный, так и переменный), пронизывающий катушку, изменяется по нелинейному закону, то и зависимость силы F от смещения катушки также имеет нелинейный характер, что и вносит свой вклад в возникновение нелинейных искажений в громкоговорителе.

Существуют несколько причин, обуславливающих нелинейную зависимость механической вынуждающей силы F от приложенного к звуковой катушке напряжения U :

- неоднородность и несимметричность распределения магнитного поля в зазоре, что определяет нелинейную зависимость средней индукции $B_{cp}(x)$ от величины смещения звуковой катушки;
- нелинейный характер взаимодействия переменного магнитного поля вокруг звуковой катушки с постоянным магнитным полем в зазоре;
- нелинейное изменение индуктивности звуковой катушки в зависимости от ее смещения;
- нелинейная зависимость активного сопротивления звуковой катушки от тока при больших уровнях подводимого напряжения.

В настоящее время все эти процессы основательно исследованы как экспериментальными, так и численными методами. Остановимся только на общих физических принципах влияния этих процессов на нелинейные искажения и конструктивных методах их снижения.

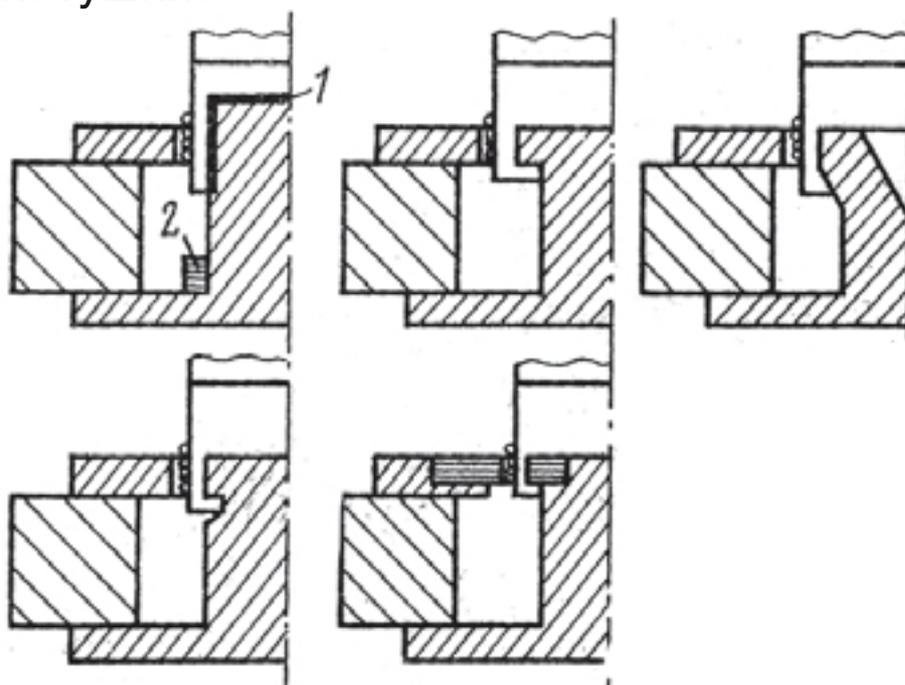
Распределение магнитных силовых линий внутри и вне зазора неоднородно (плотность их вне зазора значительно меньше) и несимметрично (выше и ниже зазора характер их распределения существенно различается), рис. 4а. Поскольку при смещении звуковую катушку пересекает разное число линий магнитного потока, возникающая в ней электродвижущая сила становится нелинейной функцией смещения (рис. 4б).



Распределение магнитного потока зависит от конфигурации фланцев, ширины и высоты зазора, объема и типа магнита и т. д. Численные расчеты коэффициента гармонических нелинейных искажений, обусловленного этими причинами, показали, что несимметричность магнитного поля приводит к появлению второй гармоники, а неоднородность — к третьей. Кроме того, этот эффект приводит к возрастанию интермодуляционных искажений, особенно в области низких частот, где смещения звуковой катушки особенно велики.

Для снижения влияния неоднородности магнитного поля на нелинейные искажения в практике разработок громкоговорителей используются

различные конструктивные меры: изменение высоты катушки, высоты зазора, конфигурации фланцев и т. д. (рис. 5). Как показали расчеты, существенное влияние на величину нелинейных искажений оказывает также увеличение высоты катушки.



Переменный магнитный поток

Значительный вклад в общий уровень вносят искажения, обусловленные взаимодействием переменного магнитного потока (возникающего вокруг звуковой катушки при подведении к ней переменного напряжения звуковой частоты) с постоянным магнитным полем.

Переменный поток Φ_{zk} звуковой частоты определяется через индуктивность (точнее, коэффициент самоиндукции L) как $\Phi_{zk} = LI$. Поскольку звуковая катушка находится в непосредственной близости от центрального полюсного наконечника (керн) и верхнего фланца, этот переменный поток замыкается через магнитопровод и рабочий зазор, создавая

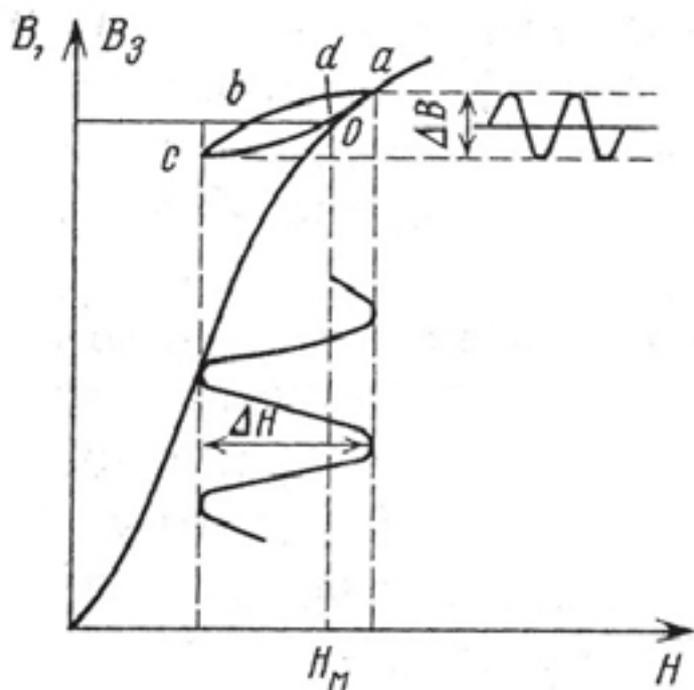
переменную составляющую рабочей индукции в зазоре. Расчеты переменного потока показали, что магнитный поток распределяется в непосредственной близости к звуковой катушке, то есть на расстоянии нескольких миллиметров от катушки в близлежащих частях центрального полюсного наконечника и верхнего фланца, и лишь 10% переменного потока распределяется в остальных частях магнитопровода.

Следует отметить, что, поскольку величина $\Phi_{зк}$ зависит от длины намотки звуковой катушки (через коэффициент l), то в низкочастотных громкоговорителях поток глубже проникает в детали магнитопровода, чем в высокочастотных. При перемещениях звуковой катушки область, охватываемая переменным магнитным потоком, также смещается вместе с ней.

Искажения, вносимые *переменным магнитным потоком*, определяются рядом факторов.

Во-первых, нелинейностью магнитных характеристик материала магнитопровода.

Изменение магнитного состояния материала магнитопровода при воздействии переменного магнитного потока показано на рис. 6, где представлена основная кривая намагничивания материала магнитопровода (обычно низкоуглеродистая сталь марки Э-12 или сталь 10) и частная петля гистерезиса — а, б, с.



Известно, что при воздействии на намагниченный постоянным магнитным полем ферромагнитный материал переменного магнитного поля магнитное состояние этого материала изменяется не по основной, а по частной петле гистерезиса a, b, c . При этом в звуковой катушке индуцируется ток, искажающий форму основного тока, что приводит к появлению искажений в воспроизводимом громкоговорителем звуковом сигнале.

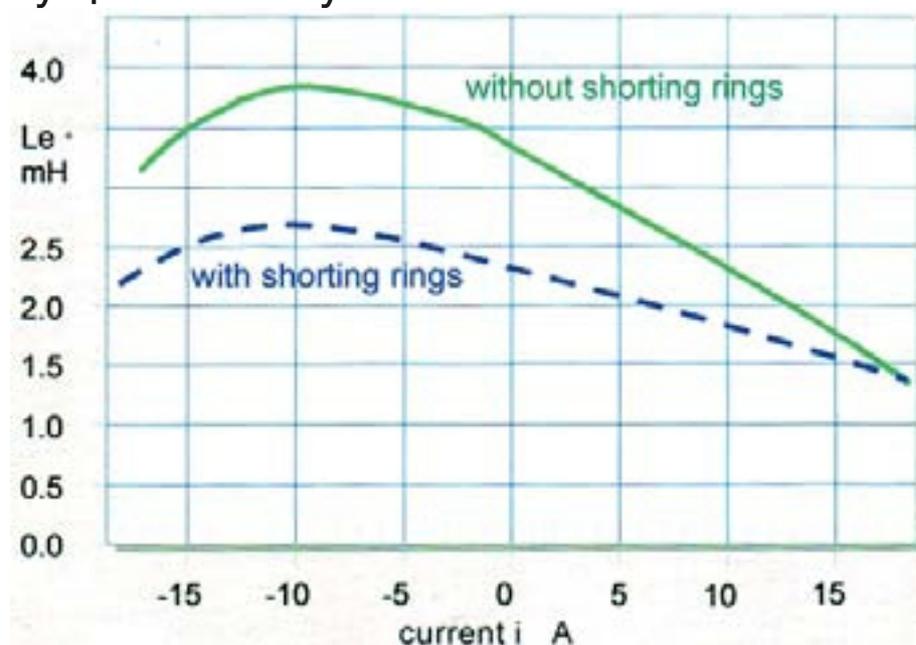
Во-вторых, под действием этого же переменного потока в массивных частях магнитопровода возникают индукционные (вихревые) токи. Так как сплошной металлический массивный проводник (фланец, керн) имеет малое сопротивление, то сила индукционных токов (токов Фуко) может достигать больших значений, особенно на высоких частотах, поскольку она пропорциональна скорости изменения переменного магнитного потока. Область влияния этих токов ограничивается поверхностным эффектом (глубина их

проникновения — доли миллиметра). Магнитное поле этих токов направлено противоположно вызывающему их переменному магнитному полю, поэтому они оказывают некоторое "сглаживающее" действие на форму тока.

Следует отметить, что искажения, обусловленные переменным магнитным потоком, особенно сильно сказываются при использовании цепей с ферритовыми магнитами, так как в них из-за низкого магнитного сопротивления магнитопровода величина переменного потока, а следовательно и уровень искажения, довольно значительны (что может вызывать так называемый "ферритовый" звук в громкоговорителе).

Уровень нелинейных искажений, вносимых переменным потоком звуковой катушки, может быть снижен двумя путями: уменьшением абсолютной величины потока и повышением линейности характеристик магнитопровода. Наиболее эффективным способом уменьшения переменного потока звуковой катушки является использование индуктивно связанных с ней короткозамкнутых проводящих витков в виде колпачка, одеваемого на торец керна, или кольца, располагаемого внутри магнитной системы (рис. 5). Переменный поток звуковой катушки индуцирует в короткозамкнутом витке противо-ЭДС, поток которой направлен противоположно магнитному потоку звуковой катушки. Степень уменьшения потока обратно пропорциональна сопротивлению витков, поэтому они выполняются из материалов с высокой электропроводностью. Для колпачков и

кольцо используется, в основном, медь. В ряде конструкций применяется короткозамкнутое кольцо, плотно одеваемое на керн, в сочетании со ступенчатым керном, что позволяет сохранить величину индукции и симметризовать поток в зазоре. Изменение индуктивности звуковой катушки (L) в зависимости от величины тока (I) без короткозамкнутого витка и с ним показаны на рис. 7, откуда видно, что степень этой зависимости существенно уменьшается.



Еще одним способом уменьшения переменного магнитного потока является увеличение сопротивления магнитопровода вдоль пути этого потока. С этой целью участки магнитопровода, образующие зазор, выполняются в виде набора тонких кольцевых пластин из электротехнических кремнистых сталей. Слоистые полюсные вставки мало влияют на постоянный магнитный поток, так как он распространяется вдоль пластин, где магнитное сопротивление вставок мало, в то же время они имеют высокое магнитное

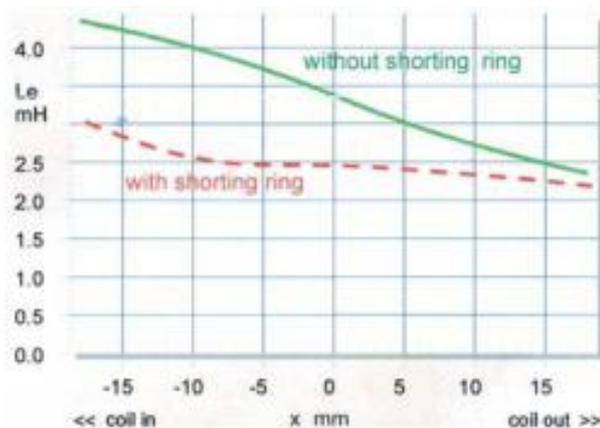
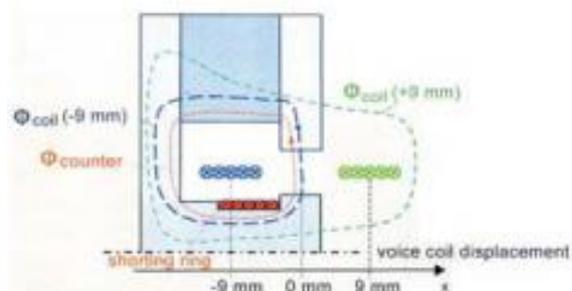
сопротивление переменному потоку, который распространяется перпендикулярно к ним. Повышение линейности магнитных характеристик магнитопровода также снижает нелинейные искажения, обусловленные переменным магнитным потоком. Оно может обеспечиваться перемещением рабочей точки магнитомягких материалов в область насыщения. В этой области (для низкоуглеродистой стали, из которой обычно делаются керны и фланцы, она начинается с индукции порядка 1,8 Тл) кривая намагничивания становится практически линейной, а частная петля гистерезиса превращается в прямую линию. При этом гармонические искажения уменьшаются. Перемещение рабочей точки достигается двумя путями: уменьшением сечения деталей магнитопровода на участках, прилегающих к рабочему зазору, и применением полюсных вставок из материалов с низкой индукцией насыщения. В первом случае используются конструкции керна с выборкой в торцевой части, при этом в оставшейся части индукция достигает значений 1,8...2 Тл. Еще большего эффекта можно достичь сочетанием насыщенного керна с медным колпачком (что целесообразнее использовать для средне-высокочастотных громкоговорителей). Во втором случае применяются полюсные вставки, например, из материала, получившего название FN-ring. Все перечисленные решения увеличивают трудоемкость изготовления магнитной цепи и требуют увеличения объема магнита для компенсации некоторого уменьшения индукции в

зазоре, поэтому они применяются, в основном, в громкоговорителях для высококачественной и профессиональной аппаратуры.

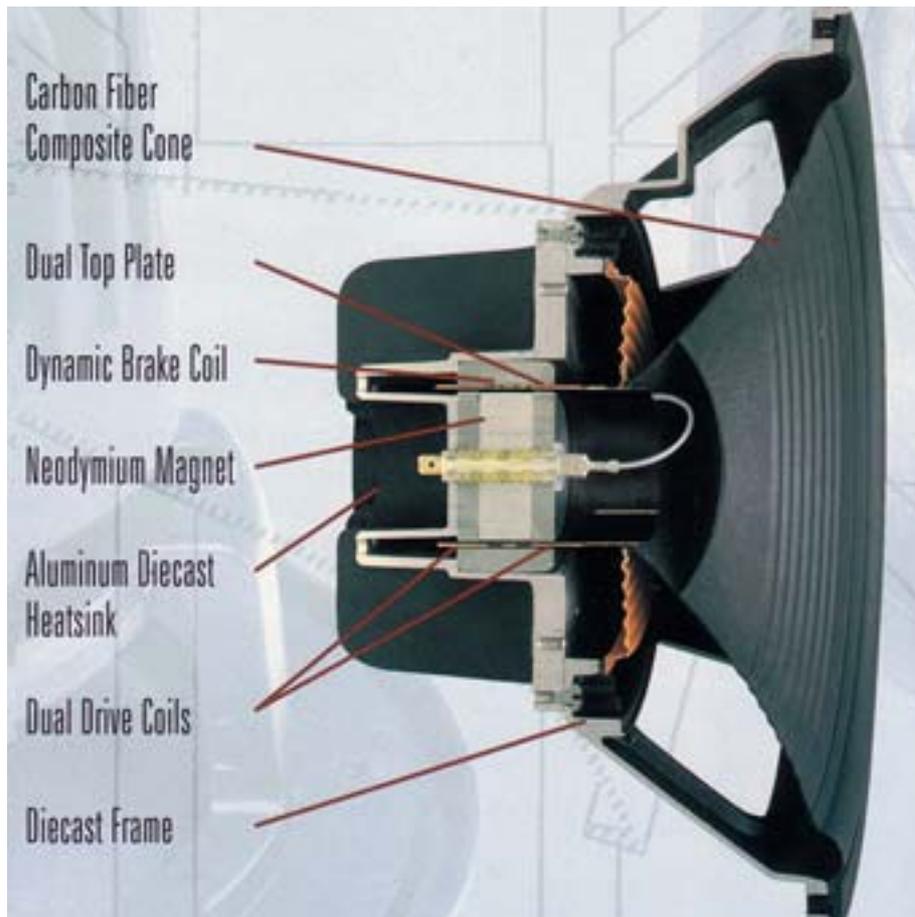
Изменение индуктивности звуковой катушки

Следующим фактором, определяющим возникновение нелинейных, в первую очередь интермодуляционных искажений, является изменение индуктивности звуковой катушки L при смещении ее из среднего положения. В один полупериод колебаний звуковая катушка "надвигается" на керн магнитной цепи (L увеличивается), в другой — частично выходит за пределы керна и фланца, при этом влияние ферромагнитного материала ослабляется. Характер изменения индуктивности звуковой катушки при различных ее положениях внутри магнитной системы был экспериментально измерен для различных типов громкоговорителей. Результаты показаны на рис. 8а,б. Как показали исследования, изменение индуктивности $L(x)$ приводит к значительной модуляции высокочастотного сигнала низкочастотным (глубина модуляции может достигать 20%). Кроме того, изменение индуктивности оказывает существенное влияние на уровень переходных искажений в громкоговорителе: время нарастания импульса сигнала в нижнем положении катушки значительно больше, чем в верхнем. Например, для громкоговорителя диаметром 250 мм при смещении звуковой катушки на 5 мм вверх $t = 200$ мс, а вниз $t = 450$ мс. Это ухудшает воспроизведение

нестационарных сигналов и, соответственно, качество звучания.



Как показали экспериментальные и теоретические исследования, способами уменьшения интермодуляционных искажений, обусловленных изменением индуктивности при смещении катушки, являются увеличение высоты керна, применение катушек с двойной намоткой и др. Примером такой конструкции может служить низкочастотный громкоговоритель LSR фирмы JBL (рис. 9). Кроме того, для этих целей также широко используются короткозамкнутые витки, например, медные колпачки на керне. Существенное влияние на значение L оказывает длина медного колпачка, наибольшее снижение интермодуляционных искажений дает использование медного колпачка на всю длину керна.



Скорость изменения индуктивности

Имеется еще один вид нелинейных искажений, обусловленный скоростью изменения индуктивности звуковой катушки как функции смещения. В любой катушке, питаемой током, возникают силы притяжения к ферромагнитному телу, находящемуся вблизи нее.

В электродинамических громкоговорителях звуковая катушка находится именно в таких условиях, поэтому при ее перемещении в узком зазоре магнитной цепи в дополнение к основной силе $F(I)$ возникает сила притяжения. Наличие такой дополнительной силы приводит к появлению второй гармоники. Кроме того, она имеет постоянную составляющую, что может приводить к смещению нейтрального положения катушки и, соответственно, увеличению искажений.

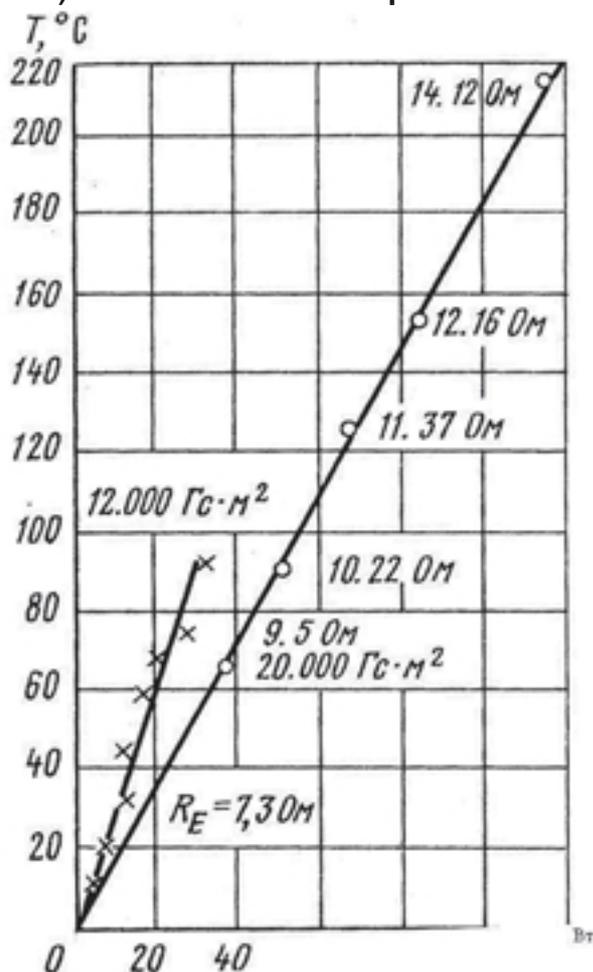
Присутствие этой силы приводит и к увеличению уровня интермодуляционных составляющих. Для уменьшения этих видов искажений используются те же конструктивные меры, что и для линеаризации $L(x)$ (короткозамкнутые витки, увеличение высоты керна и т. д.).

Нагрев звуковой катушки

Следует отметить, что при больших уровнях подводимого напряжения из-за значительного повышения температуры нагрева катушки активное сопротивление также становится нелинейной функцией тока, что может вносить свой вклад в общую нелинейность зависимости силы F от подводимого напряжения U .

В процессе преобразования сигнала подводимая к громкоговорителю электрическая энергия частично преобразуется в акустическую (1...5%), остальная рассеивается в виде тепла, поэтому при проектировании громкоговорителей стремятся обеспечить максимальный теплоотвод в конструкции и теплоустойчивость ее элементов. Тем не менее, при воспроизведении современных музыкальных программ температуры звуковых катушек могут достигать значительных величин, например, температура звуковой катушки низкочастотного громкоговорителя может составлять: 100 градусов (рояль соло), 120 градусов (рок-группа), 150 градусов (симфонический оркестр). Изменение температуры звуковой катушки в низкочастотном громкоговорителе диаметром 315 мм и соответствующее изменение ее сопротивления в зависимости от подводимой

мощности при разной индукции в зазоре (1,2 и 2,0 Тл) показаны на рис. 10.



Значительный нагрев звуковой катушки и элементов магнитной цепи вызывает такие нежелательные явления, как механическое повреждение звуковой катушки, изменение магнитных свойств, возрастание активного сопротивления звуковой катушки (значения R_E при разной величине подводимой мощности показаны на рис. 7) и др. Изменение активного сопротивления в 1,5...2 раза при нагреве до 200 градусов приводит к изменению тока при больших мощностях, поэтому по мере повышения мощности деформируется форма АЧХ, нарушается "динамическая линейность", происходит своего

рода компрессия. Кроме того, такое значительное изменение активного сопротивления звуковой катушки приводит к рассогласованию громкоговорителя с фильтрующими цепями в акустической системе, что вызывает ухудшение параметров и качества звучания громкоговорителя. Таким образом, при проектировании магнитных цепей громкоговорителей огромное внимание уделяется не только выбору параметров и конфигурации основных ее элементов, обеспечивающих заданную индукцию в зазоре (для обеспечения соответствующего уровня звукового давления), но и подбору всех элементов узла "магнитная цепь + звуковая катушка", обеспечивающих снижение нелинейных искажений в громкоговорителях.

Заключение

Проведенный в последних двух статьях краткий анализ причин возникновения линейных и нелинейных искажений в электродинамических громкоговорителях, конечно, не исчерпывает всех проблем, связанных с их конструированием и технологией изготовления.

В частности, при установке громкоговорителя в корпус могут возникать искажения за счет воздушных потоков в фазоинверторе, за счет эффектов Доплера при взаимодействии низкочастотных и высокочастотных громкоговорителей, и др.

Десятки крупнейших фирм (например, JBL, Altec Lansing, Peavey и др.) затрачивают большие средства на исследовательские и конструкторские

работы в этом направлении. Выпускаются специальные журналы, книги, статьи и пр. Читатели, желающие ознакомиться с этим подробнее, должны изучать профессиональную техническую литературу (к сожалению, в популярных изданиях нередко встречаются художественные вымыслы на эту тему). В последующих статьях будут рассмотрены нетрадиционные виды излучателей, достаточно широко используемые в современных акустических системах (электростатические, ленточные, пьезоэлектрические и др.).

Часть 4.1. Нетрадиционные громкоговорители: ленточные и излучатели Хейла.

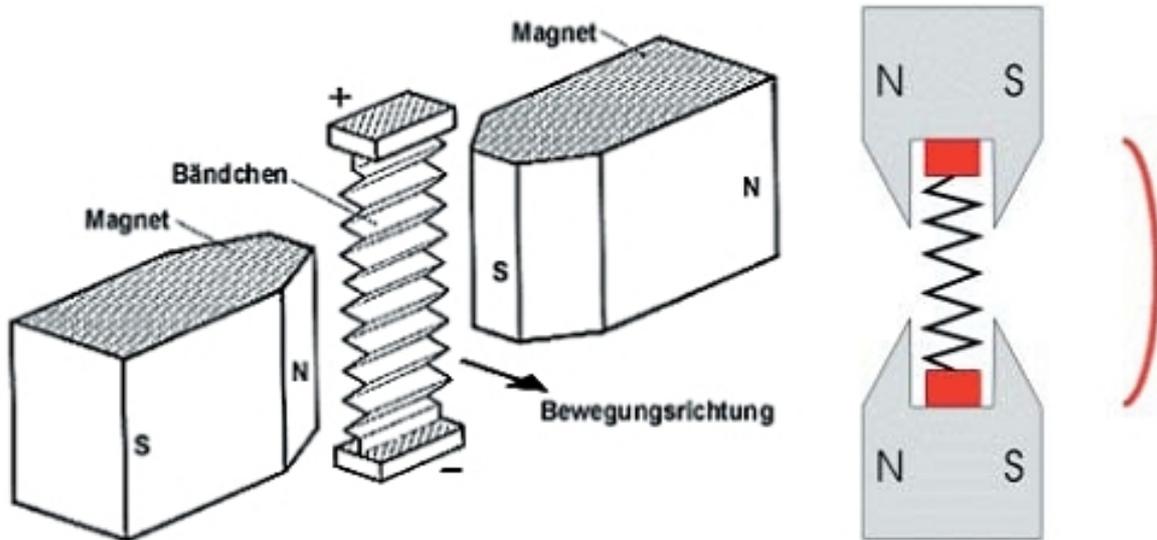
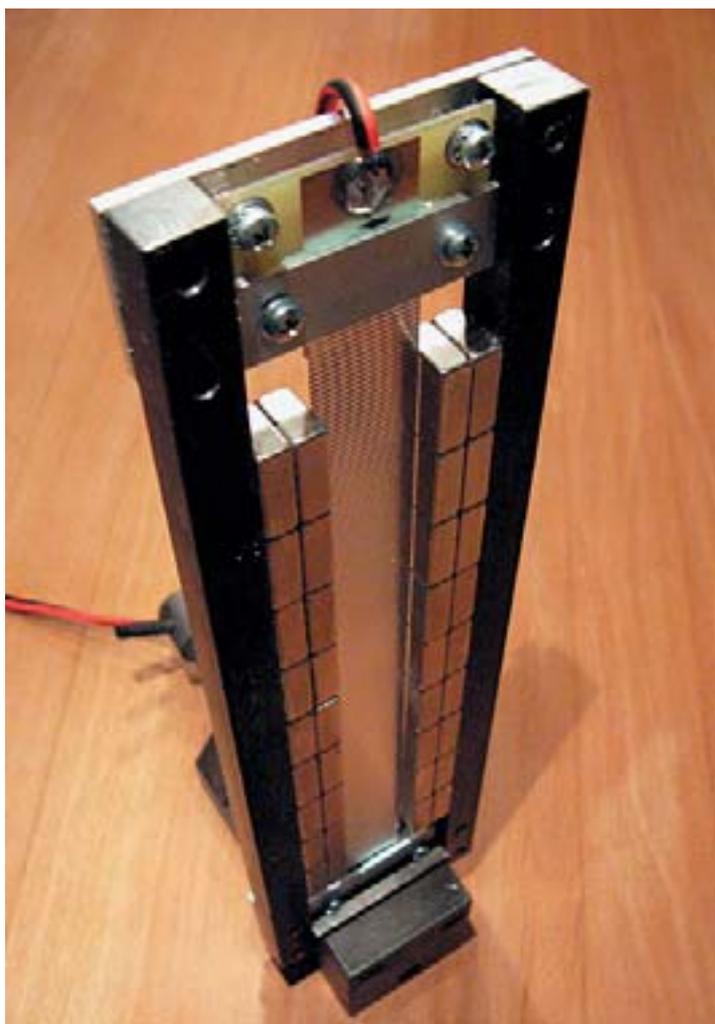
В предыдущих статьях серии был выполнен анализ принципов работы электродинамических громкоговорителей. Однако в современных акустических системах, как бытовых, так и профессиональных, довольно широко используются излучатели, работающие на других способах и принципах преобразования энергии: электростатические, ленточные, плазменные, цифровые и прочие. Объем выпуска таких излучателей составляет примерно 20% от общего производства громкоговорителей. Поскольку над их развитием работает много фирм, и каждый из этих типов излучателей имеет свои преимущества и особенности, имеет смысл в нескольких последующих статьях рассказать о них. Возможно, в ближайшие годы некоторые из

нетрадиционных громкоговорителей (в частности, цифровые излучатели) могут получить широкое распространение.

Начнем с анализа работы ленточных громкоговорителей и излучателей Хейла. Оба эти типа относятся к электродинамическим громкоговорителям, но используют несколько другие способы преобразования энергии.

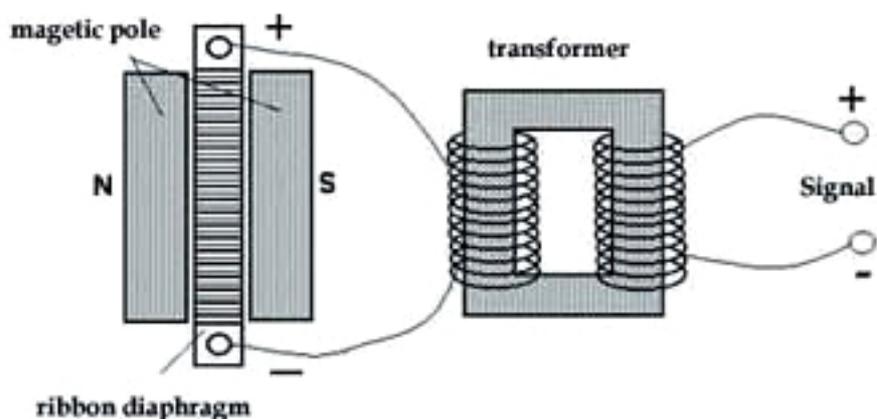
Конструкция ленточных громкоговорителей

Конструкцию ленточных громкоговорителей запатентовал в 1928 году инженер Gerlah из European Acoustic Laboratories. Однако начать их производство оказалось возможным только в 30-е годы, когда появились постоянные магниты. Общий принцип построения ленточных громкоговорителей показан на рис. 1: длинная тонкая гофрированная ленточка из алюминиевой фольги помещается между полюсами магнита, расположение полюсов на котором выбрано в соответствии с рис. 2.



При приложении переменного тока к алюминиевому проводнику, находящемуся в магнитном поле, на него начинает действовать механическая сила Лоренца, направленная перпендикулярно поверхности ленточки и равная $F = BLI$, где B —

индукция в зазоре магнита, L — длина проводника, I — сила тока. Поскольку ленточка очень легкая, то она получает достаточно большое смещение при малой величине приложенного тока. Так как ленточка получается довольно широкой (относительно диаметра проводника звуковой катушки), то ее активное сопротивление достаточно мало (порядка 0,047 Ом), поэтому излучатели обычно используются с входными трансформаторами (что позволяет повысить их входное сопротивление), рис. 3.



Ленточка обычно гофрируется, чтобы уменьшить нежелательные резонансные колебания, а также увеличить ее гибкость. Сзади ленточки часто делают замкнутый объем, гибкость воздуха которого создает дополнительную упругость. Чтобы уменьшить резонансы этой воздушной полости, ее обычно забивают пористым поглощающим материалом. Отсутствие резонансов диафрагмы позволяет получить однородную АЧХ до очень высоких частот.

Для уменьшения искажений, вызванных несимметричностью и неоднородностью магнитного поля в зазоре (что представляет большую проблему

для обычных электродинамических громкоговорителей), конструкция полюсов магнитной цепи оптимизируется таким образом, чтобы получить максимально однородное поле в зазоре. Индукция в зазоре обычно получается небольшая, ~2500 Гс, но из-за малой массы ленточки этого оказывается достаточно для получения большой чувствительности (~95 дБ/Вт/м). Связь требуемой чувствительности с площадью ленточки может быть получена с помощью следующей приближенной формулы:

$$S = 1,52 \cdot 10^2 \cdot 10^{L_{дБ}/20} / f^2 \text{ н} \cdot A,$$

где S — площадь ленточки, $L_{дБ}$ — уровень характеристической чувствительности громкоговорителя, A — амплитуда смещения ленточки в мм, f н — нижняя граничная частота.

Допустим, проектируется ленточный высокочастотный громкоговоритель с чувствительностью 110 дБ/Вт/м и нижней граничной частотой 5000 Гц. Амплитуда смещения ленточки не должна превышать 0,2 мм для обеспечения низкого уровня нелинейных искажений, тогда из формулы получается:

$$S = 1,52 \cdot 10^2 \cdot 10^{110/20} / 5000^2 \text{ н} \cdot 0,2 = 9,6 \text{ кв. см}$$

Если взять ширину ленточки 0,8 см, то длина при площади 9,6 кв. см будет равна 12 см, что обычно и используется в высокочастотных громкоговорителях. Поскольку ленточка имеет значительную площадь, она быстро охлаждается, и поэтому на громкоговоритель можно подавать довольно большую мощность.

Из-за большой длины и узкой ширины громкоговоритель имеет широкую характеристику в горизонтальной плоскости (до 70 градусов на 20 кГц), что полезно для обеспечения широкого стереообраза. Правда, в вертикальной плоскости громкоговоритель имеет узкую характеристику направленности. Иногда это бывает полезным, так как помогает избежать нежелательных отражений от потолка и пола.

Несомненными преимуществами ленточных громкоговорителей перед обычными электродинамическими являются малое время атаки и спада звучания из-за небольшого веса ленточки (масса $\sim 0,01$ г, толщина 9 мкм), низкий уровень нелинейных и интермодуляционных искажений, ровная АЧХ и др., что позволяет получить прозрачное и чистое звучание на высоких частотах.

Производство ленточных громкоговорителей

Хотя основы конструкции промышленных ленточных громкоговорителей были описаны в 70-е годы, особенно широкого распространения они не получили из-за необходимости применения довольно большой и дорогостоящей магнитной цепи, низкого импеданса, невысокой надежности и большой стоимости.

В 1997 году А. L. Butler на конгрессе ASA (Acoustical Society of America) сделал доклад "Новое рождение ленточного громкоговорителя", что послужило толчком к новому всплеску интереса к нему. В этот период появились новые магнитные материалы, позволившие значительно снизить габариты

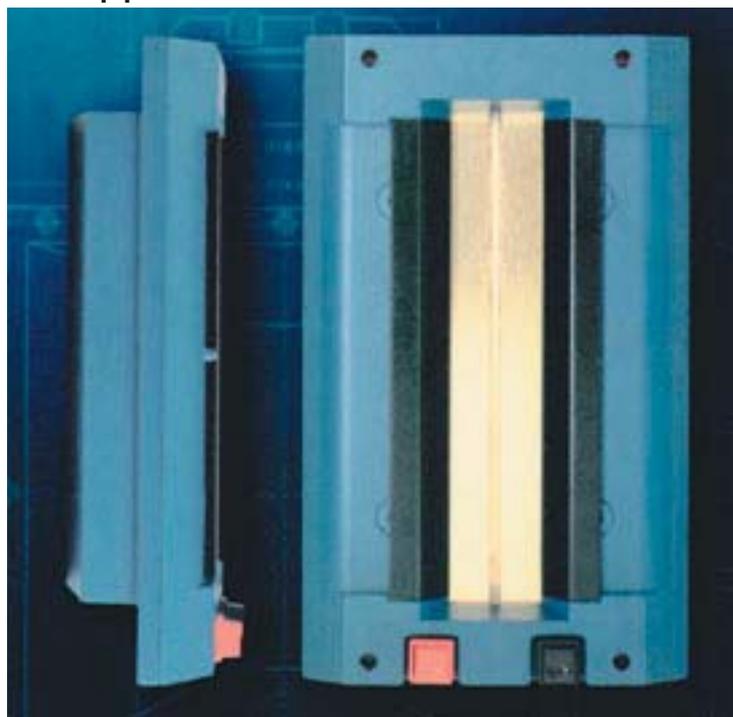
магнитной цепи. Наибольшее распространение получили такие магнитные материалы, как неодим, которые имеют магнитную энергию почти в три раза выше, чем обычные феррит-бариевые магниты. Изменилась и технология изготовления ленточек (в некоторых случаях используется прочный полиимид, ламинированный слоем алюминия, например, в модели SA8535 фирмы Stage Accompany), и т. д. В результате современные конструкции ленточных излучателей обладают достаточной надежностью и приемлемой ценой. В настоящее время производством таких громкоговорителей и акустических систем с ними занимаются десятки фирм: Stage Accompany (Голландия), Exponential (Германия), Philips (Голландия), Bohlender-Graebener (США), Apogee Sound (США), Image Acoustics (США), Dali (Дания), Newform Research (Канада), Wisdom Audio (США) и другие.

Обычно ленточные громкоговорители используются в качестве высокочастотного звена в сочетании с низкочастотным блоком электродинамических громкоговорителей, однако имеются модели широкополосных ленточных громкоговорителей. Ленточные громкоговорители находят широкое применение в бытовой аппаратуре. За последние годы они начали применяться и в автомобильной акустике, в аппаратуре для озвучивания и др.

Модели ленточных громкоговорителей

Из выпускаемых в настоящее время ленточных излучателей можно остановиться на некоторых моделях.

Ribbon Compact Driver SA8535 фирмы Stage Ascompany (рис. 4) воспроизводит диапазон 1-30 кГц, выдерживает пиковую мощность до 1000 Вт, имеет ширину характеристики направленности 70 x 40 град, в области 2 кГц имеет чувствительность 107 дБ.



Raven — серия ленточных излучателей (R-1, R-2, R-3), разработанных во Франции. Их распространением занимается фирма ORCA Design & Manufacturing Corp. В настоящее время выпускаются три модели. Все излучатели обладают высокой чувствительностью, низким уровнем искажений (меньше 1% при 105 дБ) и чистым прозрачным звучанием; они используются многими фирмами в профессиональной и бытовой аппаратуре. Излучатели продаются со специальными трансформаторами, обладающими малыми потерями и низким уровнем искажений. Излучатель R-3 габаритами 206 x 207 мм воспроизводит диапазон от 500 Гц (то есть

фактически обеспечивает воспроизведение средне-высокочастотного участка), имеет чувствительность 99 дБ/Вт/м и паспортную мощность 60 Вт.

4Pi Tweeter, Jet Tweeter — ленточные излучатели фирмы ELAC. Используют либо чисто алюминиевую гофрированную фольгу, либо полиимидную пленку, ламинированную металлом.

Широкополосный ленточный излучатель дипольного типа (излучение в обе стороны) применен в системах **SL-1** — **SL-6** (рис. 5) фирмы Soundline Audio. Системы довольно дорогие (2500\$), но, как утверждают разработчики, прозрачность звучания и конкретность стереообраза оправдывают эту цену.



Platinum IV Ribbon Driver — новая модель ленточного дипольного излучателя фирмы Carver. Излучатель работает с частоты 200 Гц. В нем используется алюминиевая пленка толщиной 10 мкм, скрепленная по особой технологии с тонкой (12 мкм) пленкой из каптона (особо прочный

полиимид). Для придания пленке жесткости на ее поверхности с помощью особой машины создается морщинистая структура. Специальная технология используется также для обеспечения равномерного натяжения пленки на раме. Сильное магнитное поле обеспечивается применением магнитов из неодима.

В акустической системе **AL-III Plus** (тоже Carver) излучатель используется как диполь в диапазоне 100-20000 Гц, частота раздела с низкочастотным звеном составляет 150 Гц. Общая чувствительность системы 86 дБ/Вт/м. Акустическая система получила очень хорошие отзывы специалистов, которые отмечали чистоту, четкость и прозрачность звучания.

Можно отметить интересное решение дизайна фирмы Fostex (рис. 6). В акустической системе используются ленточные громкоговорители как среднечастотное звено (**FS41RP** с диапазоном 200-1000 Гц) и как два высокочастотных звена (**FS21RP** с диапазоном 1-10 кГц и **FT7RP** с частотой до 38 кГц).



RD28-1, RD-40, RD-50, RD-75 — серия ленточных громкоговорителей фирмы Bohlender-Graebener. Фирма была создана только в 1994 году и специализируется на выпуске ленточных излучателей. Новое производство было открыто в Америке в 1998 году. Излучатели поставляются и другим фирмам, выпускающим с ними акустические системы (MPS, Genesis и др.). Производственные возможности фирмы позволяют ей выпускать излучатели размером от 9 см до 6 м (набор из нескольких ленточных излучателей). Излучатели могут конструироваться как диполи (излучение в переднюю и заднюю плоскость со сдвигом по фазе на 180 градусов), так и как монополи (заднее излучение демпфируется). В качестве материала для ленточек используется полиэстерная или полиимидная пленка с нанесенным на нее алюминиевым или медным проводником. Магниты используются из неодима, но могут применяться

магниты из очень дорогого (но эффективного) материала самарий-кобальт. Рамки изготавливаются из стали, но имеются модели с пластмассовой рамкой. Излучатели воспроизводят полный диапазон до семи с половиной октав, обладают высокой чувствительностью, низким уровнем нелинейных и интермодуляционных искажений и большой мощностью. Излучатели таких размеров и мощности находят себе применение не только в бытовой, но и в профессиональной технике (например, для аппаратуры в системах озвучивания). Подводя итоги современной ситуации на рынке аудиоаппаратуры с ленточными громкоговорителями, можно отметить следующее. Решение технологических вопросов по изготовлению надежной пленки, применению высокоэффективных магнитов и т. п. открыло дорогу разработке этих громкоговорителей и их широкому использованию в акустических системах разного назначения, как бытовых, так и профессиональных. Что вполне отвечает достоинствам ленточных громкоговорителей: низкому уровню переходных и нелинейных искажений, широкой характеристике направленности в горизонтальной плоскости, чистоте и прозрачности звучания.

Излучатели Хейла

Стремление повысить КПД громкоговорителей привело к созданию нового типа электродинамического преобразователя, получившего название излучатель Хейла или Air

Motion Transformer (AMT). Этот излучатель запатентовал в 1973 году в США известный ученый Oskar Heil — физик и один из изобретателей полевых транзисторов. Он работал над созданием такого преобразователя несколько лет, первая его работа на эту тему была опубликована в 1964 году. Принцип устройства излучателя заключается в следующем: излучающий элемент представляет собой прямоугольную мембрану, которая изготавливается из тонкой тефлоновой (или майларовой) пленки толщиной ~10 мк. На нее методом напыления наносится проводник из алюминия в виде прямоугольных полосок (рис. 7а). Затем мембрана гофрируется в продольном направлении (расположение проводника на гофрированной мембране показано на рис. 7b) и закрепляется в прямоугольной рамке.

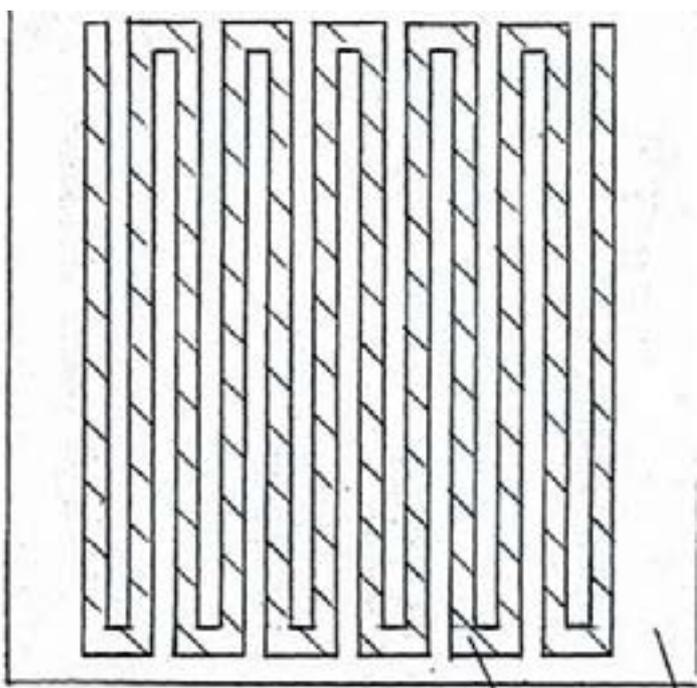


Рис.7а-пленка с нанесенным металлическим проводником

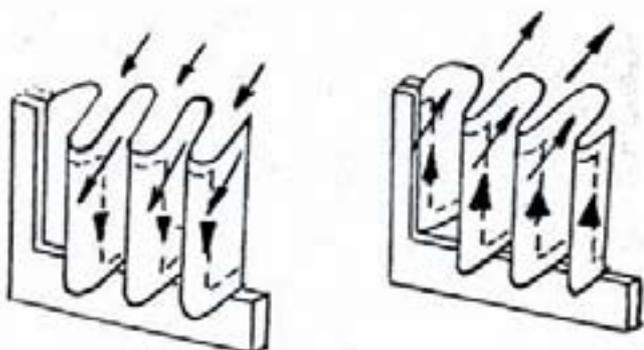
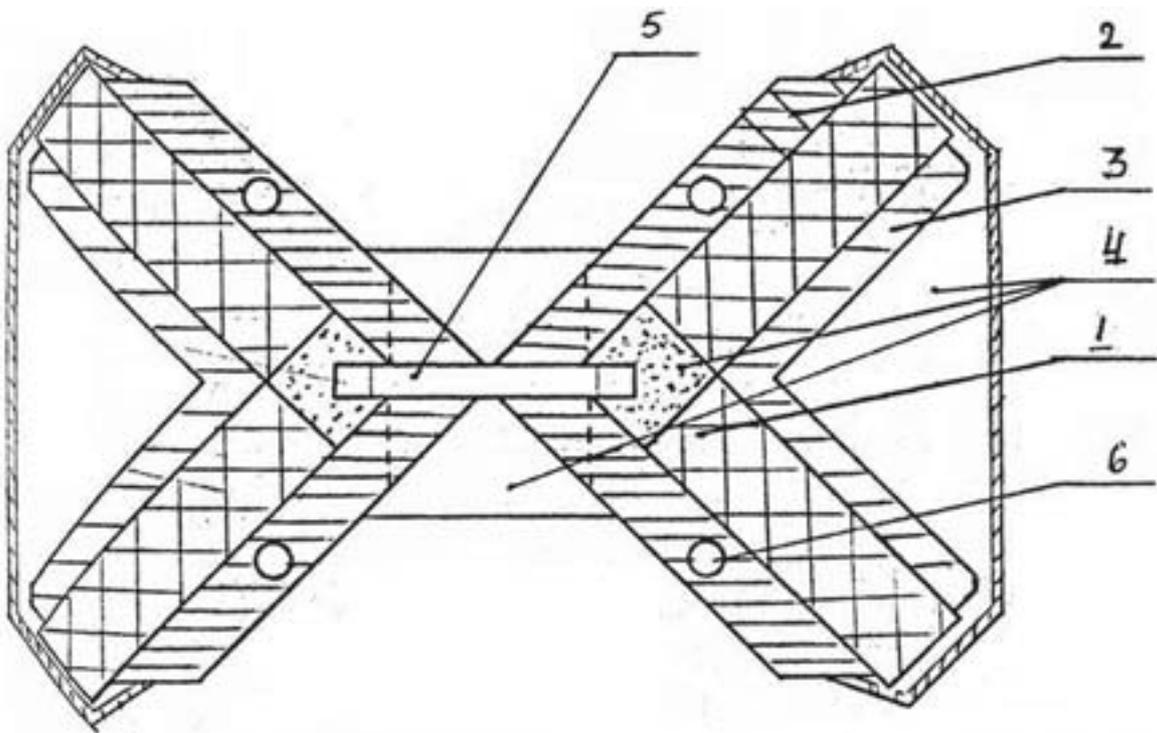
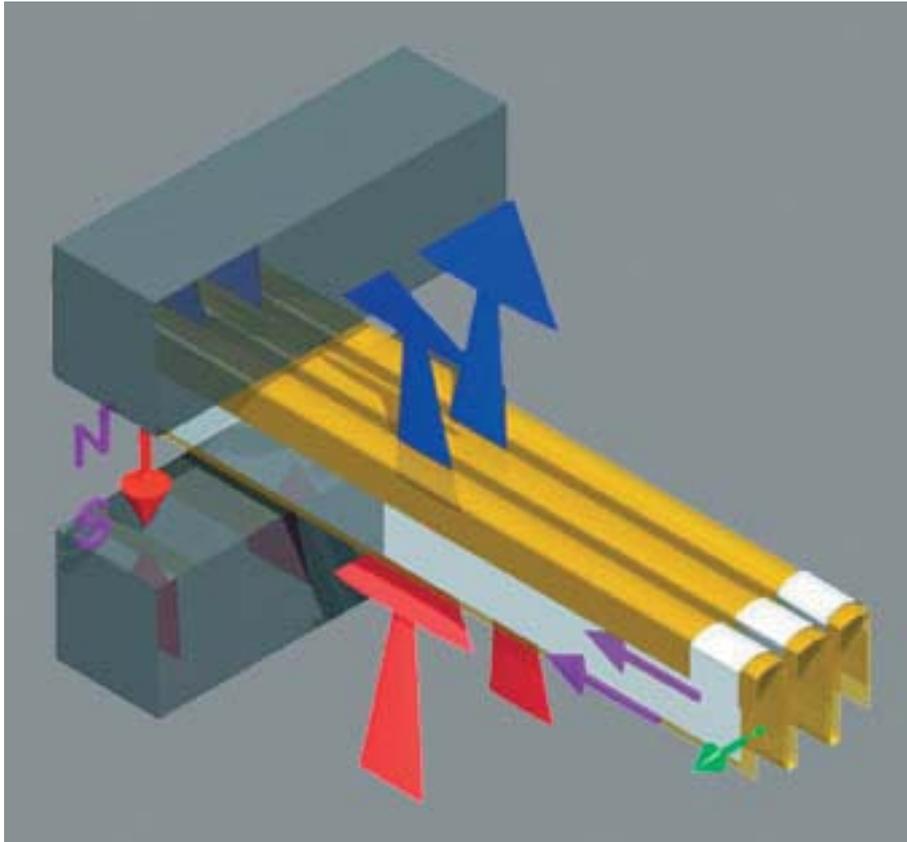


Рис.7b-расположение проводника на гофрированной пленке

Рамка с гофрированной мембраной помещается в сильное магнитное поле между полюсами магнитов. Общая конструкция магнитной цепи (которая выполняет также роль акустической линзы) показана на рис. 8. Она состоит из четырех прямоугольных ферритовых магнитов (1), наборных магнитопроводов (2), уголкового магнитопровода (3), рамы-корпуса (4) и магнитного зазора (5), куда вставляется рамка с мембраной.



Как и во всех электродинамических преобразователях, на проводник с током, помещенным в магнитное поле, действует механическая сила $F = B l I$. Направление действия силы зависит от направления магнитных силовых линий и направления тока. В случае гофрированной мембраны, показанной на рис. 7b, механическая сила будет действовать на каждый гофр с противоположных направлений, то есть сжимать и разжимать гофрированную мембрану. При этом происходит всасывание и выталкивание воздуха (рис. 9 — направления стрелок показывают движение воздуха при работе диафрагмы). Скорость воздуха за счет такого преобразования увеличивается в отношении 5:1 к скорости мембраны, что позволяет увеличить КПД громкоговорителя, так как излучаемая акустическая мощность пропорциональна сопротивлению среды и колебательной скорости.



Использование гофрированной мембраны позволило существенно уменьшить размеры излучающей поверхности, тем самым обеспечив расширение характеристики направленности на высоких частотах. Кроме того, поскольку вес тонкой пленочной диафрагмы много меньше, чем вес подвижной системы обычного громкоговорителя, то, соответственно, уровень переходных искажений в ней значительно ниже, чем в диффузорных громкоговорителях (за счет меньшей инерционности).

Производство и применение излучателей Хейла

После того, как излучатель был запатентован, фирма ESS, основанная в начале 70-х годов в США, получила лицензию и начала выпуск акустических систем с таким излучателем в 1973 г. Первая модель, АМТ-1, стала довольно популярной, в ней

излучатель Хейла использовался в качестве высокочастотного звена.

Измерения этого излучателя, выполненные в 80-е годы, показали, что он имеет следующие параметры: частотный диапазон 1-25 кГц, неравномерность +/-3 дБ, чувствительность 98 дБ, полное электрическое сопротивление 3,6 Ом, суммарный коэффициент гармонических искажений 1%. Проведенные прослушивания показали, что он действительно обладает чистым и прозрачным звуком.

В 1974 году фирма ESS выпускала уже пять моделей акустических систем такого типа, к 1980 году их выпуск составил четырнадцать моделей. В 1977 году фирма разработала акустическую систему Transor ATD полностью на излучателях Хейла, которые использовались в качестве низко-, средне- и высокочастотного звена. Однако дальнейшего развития эта идея не получила, так как магнитные системы для НЧ- и СЧ-звена оказались слишком дорогими. В настоящее время фирма продолжает выпускать акустические системы с излучателями Хейла как для домашнего использования (серия АМТ), так и в качестве студийных контрольных агрегатов. Параметры одного из них, Monitor АМТ 1D, показаны в таблице.

Мощность	400 Вт
Частотный диапазон	35-23 (+3 дБ)
Частота раздела	800 Гц
Чувствительность SPL @1w/1m	91 дБ
Среднечастотный контроль	от 800 Гц до 5 кГц (+3/-6 дБ)
Высокочастотный контроль	5-23 кГц (+5 дБ)
Низкочастотный громкоговоритель	12" полипропилен
Средне-низкочастотный громкоговоритель	12" EPS вспененный/ламинированный
Neil Air-Motion — излучатель Хейла	общая площадь излучения 21,5 кв. дюйма
Коэффициент трансформации	5,3:1
Масса магнитной цепи	5,6 кг
Габариты корпуса	927 x 413 x 413 мм
Масса	40 кг
Импеданс	6 Ом
Направленность	120 град горизонт., 30 град вертикальная
Отделка	Черный орех

Некоторое время фирма ESS была единственным производителем таких излучателей, хотя они и были запатентованы в Японии, Англии, Франции и других странах. Несколько фирм (например, Consept) выпускали акустические системы с использованием излучателей Хейла под торговой маркой ESS.

Затем наступил период значительной потери интереса к производству такого типа излучателей, даже фирма ESS сократила выпуск до восьми моделей к 1986 году. Очевидно, причина заключалась в том, что, несмотря на несомненные преимущества (высокая чувствительность, низкие переходные и нелинейные искажения и др.), для их обеспечения требовались мощные и дорогие магнитные цепи.

Однако за последние годы интерес к преобразователю Хейла резко вырос, так как появились новые материалы и новые технологии. Например, фирма Orchid Precision Audio выпустила двухполосную акустическую систему **LWO** с излучателем Хейла, работающем в диапазоне от

1500 Гц, а фирма Precide SA — акустическую систему **Aulos** (рис. 10).

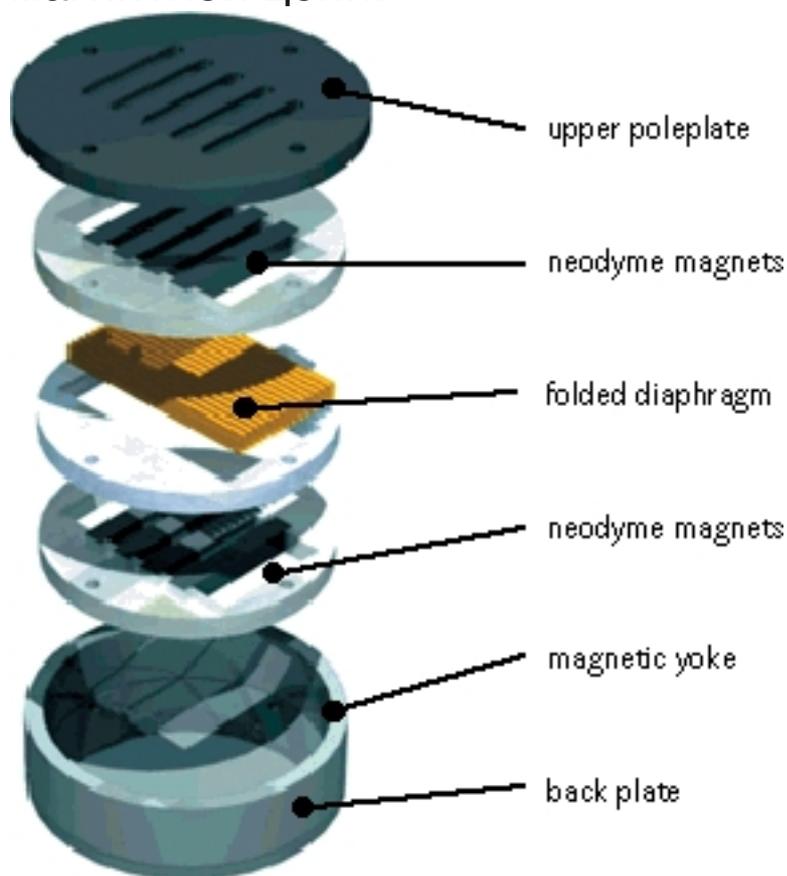


На 106-м конгрессе AES в 1998 году фирма ADAM Audio (Германия) представила доклад и показала образцы разработанных ею новых излучателей, использующих принцип излучателя Хейла.

Излучатель получил название A.R.T. (Accelerated Ribbon Technology). Изменения коснулись, в первую очередь, материала и технологии изготовления диафрагмы.

Общая конструкция такого высокочастотного излучателя показана на рис. 11. Диафрагма изготовлена из каптона с нанесенным (методом горячего прессования) проводником из алюминия. Такая диафрагма выдерживает температуру до 400 градусов, что позволяет увеличить паспортную мощность громкоговорителя. Применение глубокой гофрировки позволяет существенно увеличить эффективную площадь диафрагмы по сравнению с обычным купольным громкоговорителем. В качестве магнита используется новый

высокоэффективный материал неодим, что позволяет существенно уменьшить габариты магнитной цепи.



Излучатель обеспечивает диапазон частот 1-25 кГц, быстрый спад переходных процессов (30 дБ за 0,5 мс), низкий уровень нелинейных искажений (0,2% выше 2 кГц), чувствительность 93 дБ/Вт/м. С аналогичными диафрагмами был разработан среднечастотный громкоговоритель с чувствительностью 89 дБ/Вт/м. С этими громкоговорителями был создан студийный контрольный агрегат, имеющий отдельный хорошо задемпфированный корпус для среднечастотного излучателя.

Отечественные разработки

История отечественных систем с использованием в качестве высокочастотного звена излучателя

Хейла началась в 1984-86 годах, когда в ИРПА им. Попова была разработана конструкция высокочастотного излучателя, использующая принцип "акустического трансформатора". Там же были отработаны макеты акустических систем с таким излучателем, которые были переданы на ряд предприятий для освоения. На одном из них (НПО "Ферроприбор") были отработаны промышленные образцы акустических систем и запущены в производство.

Акустические системы состояли из низкочастотного блока с пассивным излучателем (один из вариантов был с фазоинвертором) и отдельного средне-высокочастотного блока с излучателем Хейла. Параметры одной из таких моделей, 100 АСАТ-001, следующие: диапазон воспроизводимых частот 40-25000 Гц, чувствительность 91 дБ/Вт/м, долговременная шумовая мощность 150 Вт, частота раздела 1500 Гц. Сравнительные субъективные экспертизы (с акустической системой фирмы ESS АМТ-1) показали, что система обладала чистотой и прозрачностью звучания, особенно при воспроизведении струнных инструментов и фортепиано. Что еще раз подтверждает — принципы, заложенные в основу создания "акустического трансформатора" (излучателя Хейла), заслуживают того внимания, которое уделяется им в настоящее время.

Часть 4.2. Нетрадиционные громкоговорители:
электростатические и пьезопленочные.

Ранее были рассмотрены такие виды нетрадиционных громкоговорителей, как ленточные и излучатели Хейла. Остановимся теперь на более известных излучателях — электростатических и пьезопленочных. Самым распространенным видом нетрадиционных излучателей являются, безусловно, электростатические, которые занимают первое место как по объему выпуска, так и по количеству производимых моделей акустических систем, использующих их или в качестве высокочастотного звена, или для воспроизведения полного частотного диапазона.

Электростатические излучатели

История появления электростатических излучателей начинается в 20-х годах прошлого века. Создание и совершенствование их конструкции было защищено несколькими патентами: одним из первых был американский патент 1921 года, в котором описывалась конструкция электростатического излучателя для телефонов (авторы Joseph Masolle, Hans Vogt и Josef Engl). В 1927 году Hans Vogt продемонстрировал на выставке в Берлине свою первую модель электростатического громкоговорителя. Позднее им же были защищены еще два патента (США 1928 г и Великобритания 1930 г), где были предложены усовершенствования, касающиеся улучшения изоляции электродов для электростатических излучателей.

В эти же годы были зарегистрированы два патента Эдварда Келлога (Edward Washburn Kellogg, один из

знаменитых изобретателей электродинамического громкоговорителя), посвященных конструкции электростатических излучателей (США и Великобритания, 1929-1934 годы). В частности, он предложил идею сегментации диафрагмы электростатического громкоговорителя. В последующее десятилетие были зарегистрированы еще несколько патентов, но существенным шагом вперед стал американский патент 1953 года (автор Arthur A. Janszen), в котором была описана конструкция высокочастотного электростатического громкоговорителя. На его основе была создана первая династатическая (динамическая и электростатическая) акустическая система AR-1, где в качестве низкочастотного звена использовался динамический громкоговоритель. Janszen продолжил разработку широкополосного электростатического излучателя и к 1962 году создал модель KLN-9 (размером 11 x 11 дюймов). В 1955-1980 годах появились патенты, в которых была описана подробная технология изготовления излучателей, обеспечивающая высокий уровень изоляции и защиты электродов от пробоев. Так, например, в 1955 и 1957 годах Peter James Walker и David Theodore Nelson Williamson зарегистрировали два патента (в США и Великобритании), где также была предложена технология разбиения электродов на секции для контроля характеристик направленности. Именно эти патенты послужили базой для создания знаменитой серии

широкополосных электростатических громкоговорителей фирмы Quad.

В 1973 году William Wright предложил интересный патент, где предлагалось установить электростатический излучатель в закрытый корпус, заполненный газом, что позволило бы подвести более высокое поляризующее напряжение и тем самым увеличить чувствительность излучателя.

Канадская фирма Dayton Wright в 80-е годы реализовала эту идею и организовала выпуск широкополосных газонаполненных электростатических систем XG1060 с диапазоном 38-18000 Гц (+/-3 дБ).

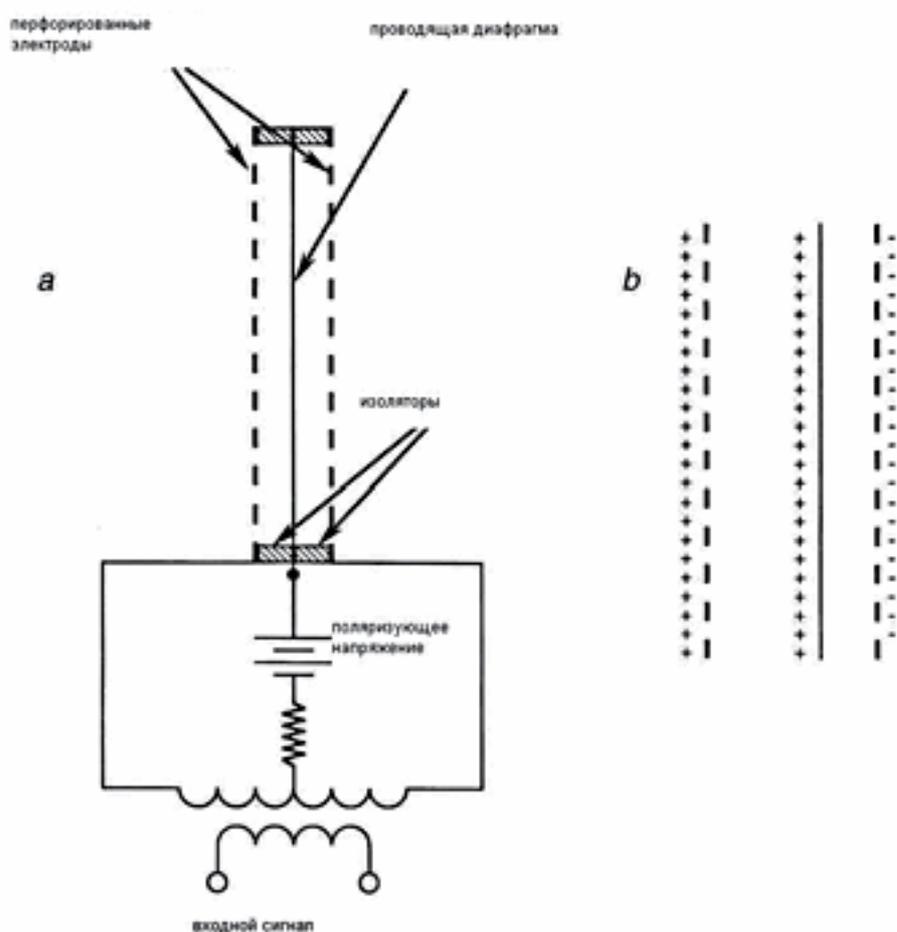
В этом же году Harold Beveridge опубликовал патент, в котором было предложено использовать рассеивающие линзы для расширения характеристики направленности электростатических излучателей, что и было реализовано в промышленных образцах, создаваемых его фирмой. Кроме того, был запатентован ряд конструкций усилителей и трансформаторов для таких излучателей.

Хотя основы конструкции электростатических излучателей были подробно описаны в этих патентах, первые коммерческие модели появились только в конце 60-х годов, поскольку возникли значительные трудности с технологией их производства.

Принцип работы электростатических излучателей

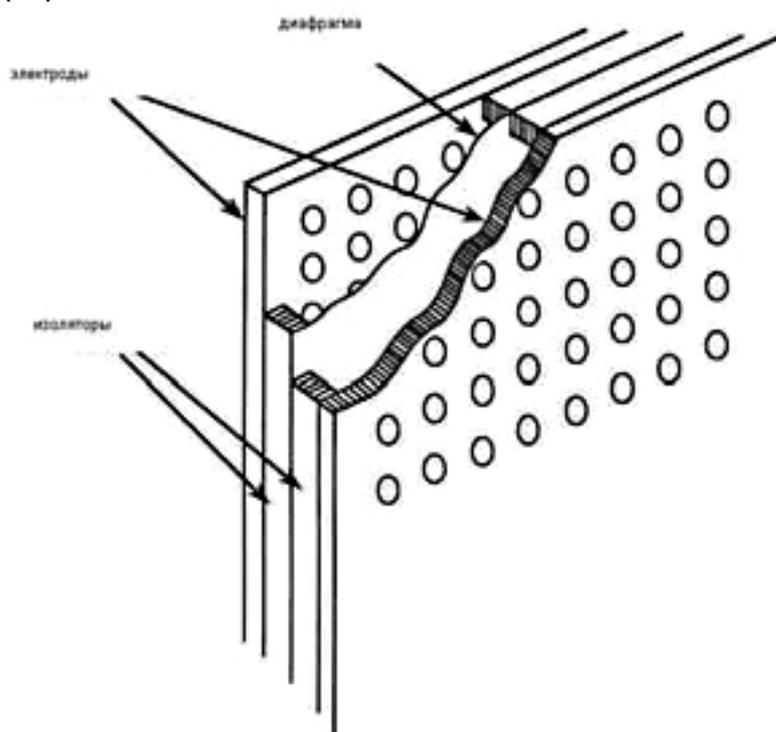
Принцип работы электростатического громкоговорителя, теорию которого подробно

описали в своих работах Frederick V. Hunt (1954), Edward James Jordan (1963), Peter J. Baxandall (1988) и Ronald Wagner (1993), показан на рис. 1. Тонкая пленка (толщиной порядка 8 мкм), покрытая проводящим слоем, помещается между двумя перфорированными электродами из металлизированного диэлектрика. Между диафрагмой и электродами прикладывается высокое поляризующее постоянное напряжение (от 3 до 10 кВ), звуковой сигнал (переменное напряжение) подается через трансформатор на электроды.



Под действием переменного напряжения диафрагма перемещается между электродами (рис. 2), при этом происходит излучение звука через отверстия в перфорированных электродах (по

принципу действия — это конденсатор переменной емкости). Общий электрический заряд в такой системе равен: $Q=SE/4\pi d^2$, где S — общая площадь диафрагмы на обеих сторонах (кв. м), E — поляризующее напряжение (В), d — расстояние от диафрагмы до одного из электродов (м). Сила, действующая на диафрагму, будет при этом равна: $F=8,854 \times 10^{-12} \epsilon_{\text{sig}} SE/d^2$ (Н), таким образом сила, приложенная к диафрагме, пропорциональна переменному напряжению звукового сигнала ϵ_{sig} (В).



Импеданс электростатического громкоговорителя линейно уменьшается с частотой: $X_c=(1,59 \times 10^{-1})/(f \times C)$, где C — емкость громкоговорителя. При этом на низких и средних частотах он равен десяткам Ом, поэтому громкоговорители используются с трансформатором.

Верхний частотный диапазон электростатического громкоговорителя ограничивается способностью усилителя работать на емкостную нагрузку, а

воспроизведение низких частот — пределами смещения диафрагмы между двумя неподвижными электродами. Поскольку величина зазоров в современных громкоговорителях составляет 1-1,5 мм, то смещения диафрагмы не могут быть большими и уровень излучения низких частот определяется, главным образом, размерами площади электростатического излучателя (так, например, последняя модель ESL 989 фирмы Quad имеет габариты 1335 x 670 x 315 мм). Однако слишком большая площадь поверхности приводит к узкой с большими боковыми лепестками характеристике направленности на высоких частотах, поэтому обычно широкополосные электростатики конструируются в виде набора отдельных пластин для воспроизведения различных частотных диапазонов.

Масса диафрагмы электростатика существенно меньше массы подвижной системы динамического громкоговорителя, а масса воздуха в слое между диафрагмой и электродами и в отверстиях электродов довольно большая (масса воздуха на единицу площади примерно в пять раз больше чем масса самой диафрагмы на единицу площади), и она демпфирует колебания диафрагмы. Именно поэтому уровень переходных искажений в электростатических излучателях существенно меньше, чем в обычных громкоговорителях.

Одной из серьезных проблем при конструировании электростатических громкоговорителей является пробой из-за высоких напряжений за счет ионизации слоя воздуха и нарушения изоляции

электродов. Максимальная сила, которая может быть приложена к электродам на единицу площади, не должна превосходить значений $F/S = u^2/16\pi(1,11 \times 10^{-5}) \text{дин/см}^2$, где u — максимальное удельное напряжение (В/см) до начала ионизации воздуха.

Общее звуковое давление, излучаемое громкоговорителем, может быть приближенно определено по формуле: $p \sim I_{\text{sig}} E / 2\pi c r d$, где I_{sig} — переменный ток входного сигнала (А), E — поляризующее напряжение (В), c — скорость звука (м/с), r — расстояние до микрофона (м), d — расстояние между диафрагмой и электродами (м), p — звуковое давление (Па).

Несмотря на относительную простоту принципов построения, для промышленного освоения электростатических громкоговорителей понадобились десятилетия напряженной работы. Необходимо было решить такие проблемы, как выбор материалов для мембран и электродов, отработка технологии нанесения электроизоляционных покрытий, разработка специальных усилителей и т. д. В современных конструкциях диафрагма изготавливается из тонкого пленочного синтетического материала (например, майлара толщиной 8 мкм с нанесенным на поверхность проводящим графитовым покрытием).

Поскольку сила за счет электростатического взаимодействия мала, необходимо большое поляризующее напряжение (8-10 кВ), из-за чего возникают серьезные проблемы с изготовлением

электродов. Электроды должны быть очень жесткими (чтобы в них не возникали изгибные колебания), но акустически прозрачными, то есть иметь достаточное количество отверстий, на острых краях которых и возникает максимальная опасность пробоя.

Отработка технологии нанесения проводящего покрытия на поверхность краев отверстий представляет непростую проблему. Электроды должны иметь исключительно ровную и однородную поверхность для равномерного распределения заряда. Обычно используются перфорированные металлизированные пластины или металлические сетки. Изоляторы между мембраной и электродами должны обеспечивать равномерную центровку мембраны относительно электродов (в противном случае возникают значительные нелинейные искажения) и обеспечивать изоляцию при больших напряжениях (до 10 кВ). Пробой при таких напряжениях представляет значительную опасность.

Таким образом, много факторов влияет на параметры и качество звучания излучателей: выбор размеров и материалов для электродов, расстояние между мембраной и электродами, однородность конструкции, надежность изоляции, технология нанесения токопроводящих покрытий, величина поляризующего напряжения и другие. Однако, несмотря на технологические проблемы, потребовавшие много лет для их решения в промышленном масштабе, существует немало

фирм, выпускавших и продолжающих выпускать электростатические излучатели.

Достоинства и недостатки электростатических громкоговорителей

Производители руководствуются несомненными преимуществами электростатических громкоговорителей перед электродинамическими в качестве звучания. Такой прозрачности и чистоты звука, особенно при воспроизведении классической музыки, которые можно услышать через электростатические излучатели, не удастся получить с применением электродинамических громкоговорителей. Это связано, прежде всего, с тем, что легкая и тонкая мембрана обладает значительно меньшей инерционностью по сравнению с подвижной системой громкоговорителя.

Как было отмечено ранее, мембрана электростатика движется в однородном электрическом поле, что приводит к отсутствию нелинейных искажений (которые обусловлены движением катушки в зазоре динамического громкоговорителя, где ей приходится смещаться в неоднородном и несимметричном магнитном поле). Наконец, тонкая мембрана сильно натянута и демпфируется слоями воздуха, поэтому для нее нехарактерны выраженные резонансные колебания, типичные для диафрагм динамических громкоговорителей.

Однако, наряду с несомненными преимуществами, электростатические громкоговорители имеют ряд недостатков. Поскольку смещение мембраны мало,

возникают проблемы с воспроизведением низких частот. Как уже было сказано, требуется большая площадь, а это, в свою очередь, вызывает обострение характеристики направленности в области средних и высоких частот. Кроме того, поскольку диафрагма излучает в обе стороны, то есть это излучающий диполь, то чрезвычайно критичным является установка электростатических излучателей в помещении. Наконец, значительные проблемы связаны с согласованием этих излучателей с усилителем, поскольку они представляют собой чисто емкостную нагрузку.

Модели электростатических громкоговорителей

Ведущим производителем лучших электростатических излучателей была и остается английская фирма Quad, которую в 1936 году основал Peter Walker. Первоначально она занималась разработкой акустики и усилителей для озвучивания, а в 1949 году было начато производство высокочастотного ленточного излучателя, в этот же период компания получила название QUAD (Quality Unit Amplified Domestic). В 1955 году фирма приступила к производству первого в мире широкополосного электростатического громкоговорителя, который позже был назван ESL 57 (рис. 3).



Многие компании пытались повторить эту конструкцию, однако такой чистоты и прозрачности звучания достичь не удалось. Для ESL 57 были разработаны специальные усилители: Quad 303, затем 405 и др. Выпуск излучателя продолжался до 1985 года, всего было продано 60000 экземпляров. Репутация этой модели была настолько высока, что в 1978 году фирме была присуждена Королевская премия за достижения в технологии, чего не случалось никогда раньше в индустрии бытовой аудиотехники.

В 1981 году фирма начала производство нового излучателя ESL 63, который иначе называли FRED (Full Range Electrostatic Doublet). В нем была применена принципиально новая технология изготовления диафрагм в виде концентрических круглых колец, включенных через линии задержки, что позволило существенно улучшить характеристики направленности. Параметры этого громкоговорителя следующие: диапазон 35-20000

Гц (спад на краях 6 дБ), неравномерность 2 дБ, максимальное звуковое давление 100 дБ.



В 2000 году было начато производство моделей ESL 988 и ESL 989 (рис. 4), в которых были использованы практически совершенно новые технологии изготовления мембран и электродов, новые трансформаторы и усилители, хотя принцип кольцевых излучателей с линиями задержки сохранился. Все это позволило получить прекрасные параметры и, по отзывам многочисленных экспертов, необычайно чистое, прозрачное звучание. Например, ESL 988 имеет диапазон 20-20000 Гц, максимальное звуковое давление 100 дБ, индекс направленности 125 Гц — 5 дБ, 500 Гц — 6,4 дБ, 1 кГц — 7,2 дБ, 8 кГц — 10,6

дБ, габариты 940 x 670 x 315 мм. В модели ESL 989 введена добавочная низкочастотная панель для улучшения воспроизведения басов.

В настоящее время выпуском электростатических громкоговорителей и многочисленных моделей акустических систем с ними занимаются 87 фирм, всего представлено на рынке более 250 моделей. Следует, правда, отметить, что подавляющее большинство акустических систем представляют собой комбинированные (династатические) модели, в которых низкочастотное звено динамическое (часто отдельный низкочастотный блок — субвуфер), а средне- и высокочастотное звено — электростатическое. Такие совмещенные системы имеют большой динамический диапазон на низких частотах, но переход от одного типа излучателей (электродинамических) к другим (электростатическим) создает много проблем с однородностью тембра звучания.

Среди производителей электростатических излучателей можно отметить такие всемирно известные компании, как Telefunken, Isophon, Grundig (Германия), Sony (Япония), Koss, Infinity, ESS, Beveridge, Martin Logan (США), B&W (Великобритания). Каждая из них внесла свой вклад в модернизацию конструкции и улучшение технологии электростатических излучателей.

Пьезопленочные излучатели

Следующим довольно распространенным видом нетрадиционных излучателей являются *пьезокерамические* (с недавнего времени — *пьезопленочные*) излучатели.

Принцип их действия основан на пьезоэлектрическом эффекте, открытом братьями Пьером и Жаком Кюри еще в 1880 году, и заключающемся в том, что в некоторых кристаллах (кварц, турмалин, сегнетова соль и др.) под действием приложенных механических сил на их гранях образуются электрические заряды. В зависимости от вида кристалла, заряды могут появиться и при сдвиге, изгибе и кручении. Кроме вышеописанного "прямого" эффекта существует и обратный эффект (который был теоретически предсказан в 1881 году Липманом и экспериментально подтвержден в работах Кюри). Если приложить электрическое напряжение к обкладкам пьезокристалла, то кристалл начнет деформироваться: удлиниться, изгибаться, скручиваться и т. д. Идея использовать такие кристаллы в конструкции электроакустических преобразователей появилась очень давно и была реализована в период 1920-1940 годов в звукоснимателях, микрофонах, акселерометрах, ультраакустических преобразователях и пр. Естественно, что на протяжении длительного периода времени изучались возможности использования этого эффекта и в акустических излучателях в звуковом диапазоне частот. В период 1940-1965 годов различные группы исследователей в Америке, Японии и России вели интенсивные исследования по созданию нового поколения пьезоматериалов с высокими значениями пьезомодуля. Наиболее распространенные для применения в

аудиоаппаратуре пьезокерамические материалы были созданы на основе титаната бария и цирконата-титаната свинца со стронцием и ниобием. Наиболее известные марки пьезокерамики, используемые в излучателях: PZT-5 (США), РСМ-5 (Япония), Р1-60 (Франция). Отечественная керамика с аналогичными параметрами — ЦТС-19.

Для увеличения чувствительности обычно используется биморфный элемент, то есть конструкция, состоящая из двух прочно склеенных пластин пьезокерамики, работающих на поперечном пьезоэффекте и возбуждаемых противофазно. Интерес к созданию громкоговорителей на основе пьезокерамики (судя по огромному количеству патентов) был чрезвычайно высок (в основном для высокочастотных громкоговорителей и громкоговорителей для оповещения).

Разработчиков привлекала необычайная простота конструкции, отсутствие магнитных цепей, довольно высокий уровень чувствительности, стабильность параметров и т. д. Однако пьезокристаллический элемент, используемый для возбуждения диафрагмы, имеет ярко выраженную резонансную характеристику, поэтому применение его для возбуждения излучателей в широком диапазоне частот потребовало многолетних работ по отработке конструкции.

Прежде всего, для проектирования широкополосных излучателей пьезоэлемент должен быть сконструирован таким образом, чтобы

его резонансная частота лежала на нижней границе рабочего диапазона. Резонансная частота пьезоэлемента связана с его радиусом и толщиной следующим образом:

$$F_0 = 0,412t/r^2 \sqrt{\frac{E}{\rho(1-\sigma^2)}},$$

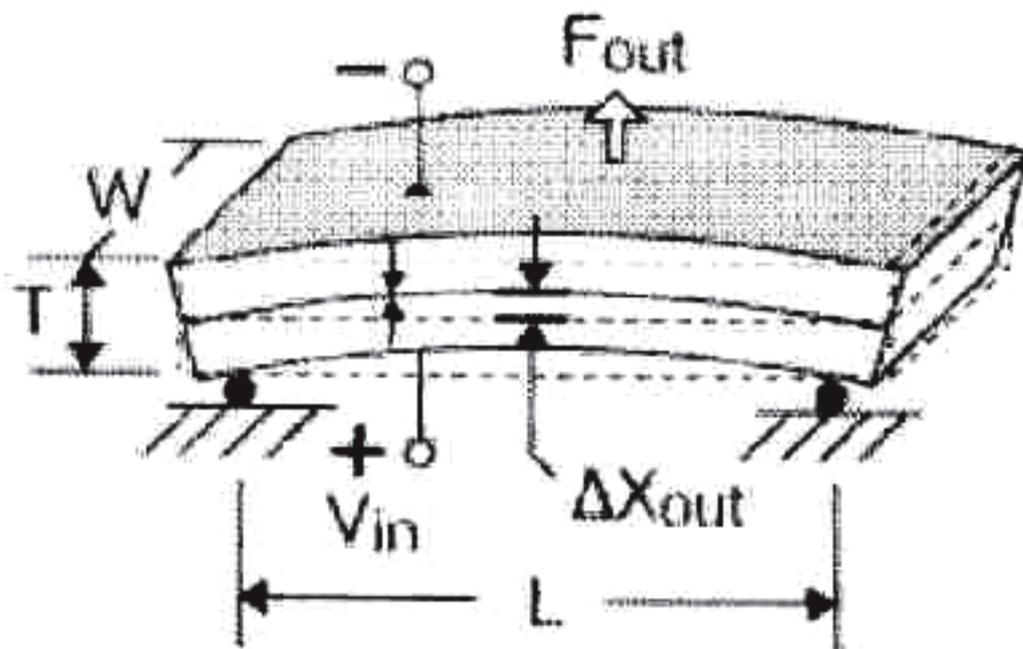
где t — толщина пьезоэлемента, r — радиус пьезоэлемента, E , ρ , σ — модуль Юнга, плотность и коэффициент Пуассона. Следовательно, для снижения резонансной частоты необходимо увеличивать радиус и уменьшать толщину. Увеличивать размеры не позволяет общая конструкция высокочастотных излучателей, а над снижением толщины и подбором специальных конфигураций пьезоэлементов в настоящее время продолжают работать многие фирмы. Необходимо отметить также, что излучатели с пьезоэлементом имеют емкостной характер нагрузки и требуют применения повышающего трансформатора.

Модели с пьезоизлучателями

Несмотря на указанные проблемы, только в период 80-90 годов примерно 43 фирмы выпускали более ста моделей акустических систем с высокочастотными пьезоизлучателями. К числу таких фирм относятся Motorola, Pioneer, Gemini, Celestion и др.

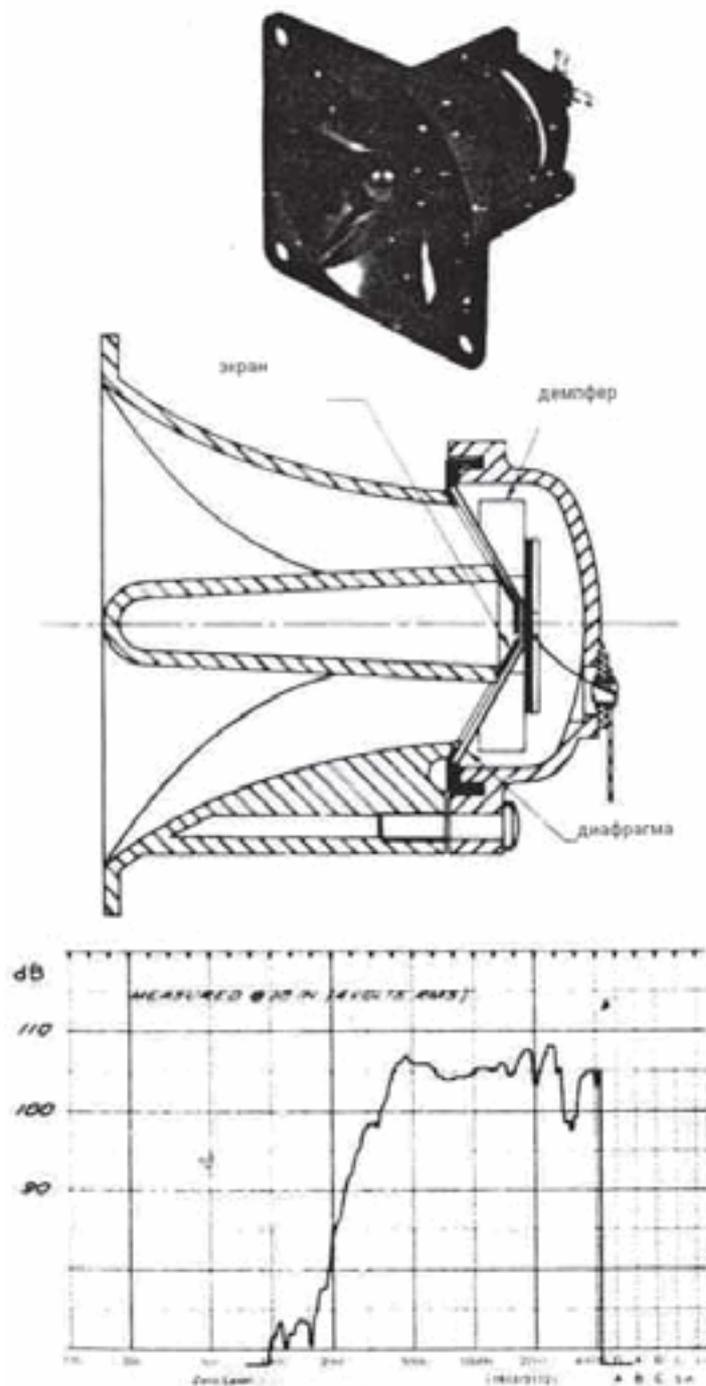
Бесспорным лидером в создании высококачественных пьезоизлучателей, которые нашли широкое применение во многих типах акустических систем целого ряда других фирм, была и остается компания Motorola. Многолетние исследования (что подтверждают многочисленные

патенты) позволили им выбрать конструкцию, обеспечивающую излучение в достаточно широком диапазоне частот. Излучатель состоит из биморфного пьезокерамического элемента на металлической подложке (рис. 5), демпфирующих элементов, опорного кольца диффузора и диффузордержателя.



Этот излучатель нагружается на рупор специальной формы. С помощью рупора удастся согласовать высокий механический импеданс пьезокерамического вибратора с низким импедансом воздушной среды, что позволяет повысить эффективность излучения. Фирма Motorola после многочисленных экспериментов предложила широкогорлую конструкцию рупора (диаметр горла которого совпадает с диаметром диафрагмы излучателя), но для повышения эффективности его излучения разработала специальную форму экспоненциального рупора с множеством продольных ребер внутри него.

Наибольшее применение находят в настоящее время две конструкции: KSN 1005 и KSN 1025. Общий вид и АЧХ модели KSN 1005 показаны на рис. 6. В излучателе используется дисковый биморфный пьезоэлемент диаметром 22,6 мм. Рупор снабжен шестью ребрами жесткости, толщина которых меняется от 10 мм в области горловины до 2,5 мм в области устья. Длина рупора 72 мм, площадь входного отверстия 135 кв. мм, выходного 871 кв. мм.



Наряду с пьезокерамическими излучателями, в 70-е годы, после создания новых видов материалов — пьезоэлектрических полимеров, стало развиваться особое направление в создании громкоговорителей, использующих этот эффект. В 1969 году японский физик Н. Камаи открыл пьезоэффект у поливинилиденфторидной пленки (ПВДФ). ПВДФ является высокомолекулярным,

высококristаллическим полимером, отличающимся высокой прочностью, жесткостью, стойкостью к износу и др. Физические свойства его зависят от типа кристаллической структуры.

Процесс, который придает высокополимерным пленочным материалам пьезоэлектрические свойства, имеет сложную технологию и включает в себя следующие операции:

- при температуре 60-100 градусов пленка растягивается в одном или двух направлениях в четыре или шесть раз;

- на обе стороны пленки напыляются металлические электроды, обычно из алюминия;

- вытянутые (ориентированные) пленки поляризуются при температуре 80-100 градусов в течение 30-60 минут в высоком постоянном электрическом поле, при этом происходит окончательная ориентация диполей, пленка приобретает пьезоэлектрические свойства.

Если пленка растягивается в одном направлении, то она обладает разными пьезомодулями в разных направлениях и называется

одноосноориентированной. На первом этапе была отработана технология изготовления именно таких пленок.

Если теперь такую пленку изогнуть и закрепить ее концы, то при приложении

переменного электрического напряжения

перпендикулярно ее поверхности она начнет

деформироваться, пульсировать и излучать звук.

Первые образцы высокочастотных излучателей в виде пленки, свернутой и натянутой на цилиндр,

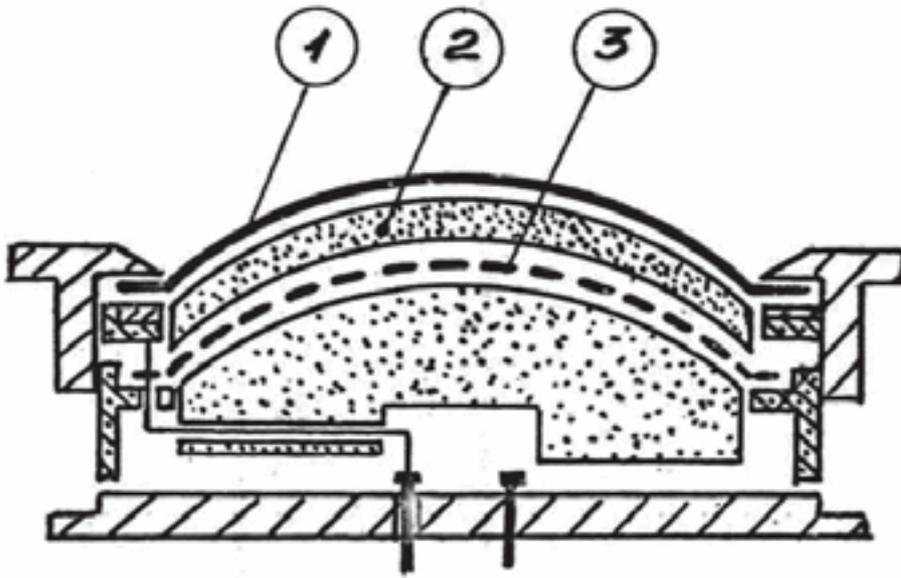
создала фирма Pioneer (Япония). На их базе

компания разработала и выпускала на протяжении длительного времени линейку акустических систем НРМ-40, НРМ-60, НРМ-100, НРМ-150, НРМ-200, НРМ-1100. Несомненным преимуществом таких излучателей является простота конструкции и отсутствие дорогостоящих магнитов. К недостаткам можно отнести емкостный характер сопротивления и необходимость применения повышающего трансформатора.

В 80-е годы в Японии была отработана надежная технология поляризации двуосноориентированных пленок с одинаковым пьезомодулем в двух направлениях. Это дало возможность фирмам Audax и Brandt Electronique разработать и в 1980 году представить на выставке в Париже акустические системы с купольными пьезопленочными громкоговорителями.

Конструкция одного из них показана на рис. 7.

Громкоговоритель содержит изогнутую пьезопленку (1), демпфирующую прокладку (2) и специальную сетку (3). Параметры представленных высокочастотных громкоговорителей оказались следующими: диапазон воспроизводимых частот 5-20 кГц с неравномерностью +/-1 дБ, чувствительность 90 дБ/Вт/м, максимальное звуковое давление 110 дБ.



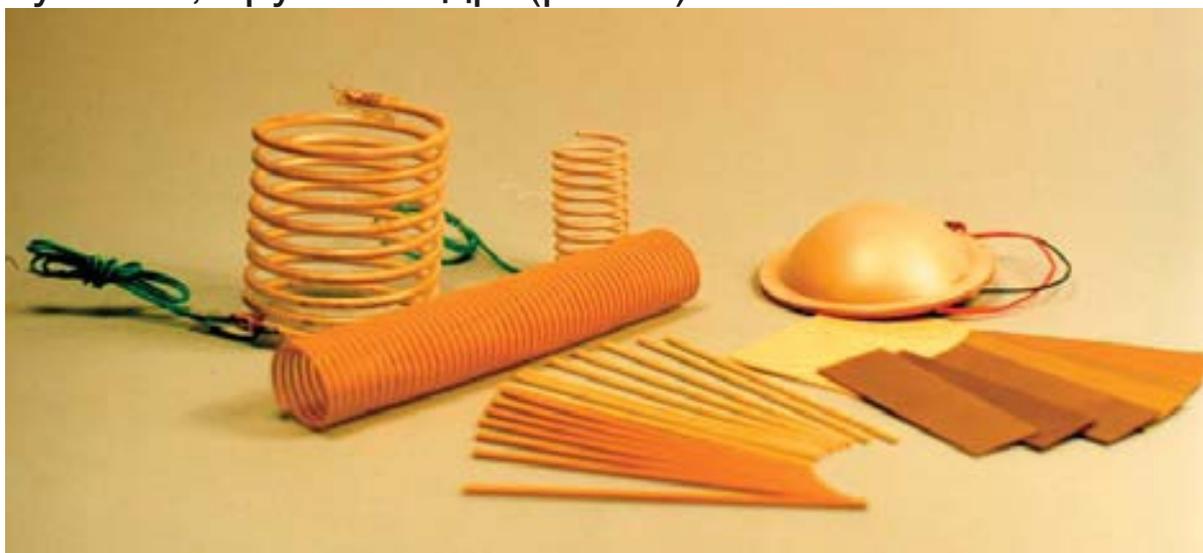
Работы по совершенствованию параметров двуосноориентированной пьезопленки продолжались в Германии, Японии, США и других странах все последние годы. Это дало возможность фирме Audax выпустить новое поколение высокочастотных излучателей и акустических систем с ними. Представителем этого нового поколения является высокочастотный громкоговоритель HD3P. В качестве материала для диафрагмы используется пьезополимерная пленка, покрытая с обеих сторон золотом (методом вакуумного напыления). Пленка натянута в виде эллиптического купола и закреплена на эллиптическом кольце. За диафрагмой находится закрытая камера с воздухом под некоторым давлением, поддерживающим форму купола. К электродам на обеих поверхностях диафрагмы подводится сигнал, под действием которого диафрагма изгибается и излучает звук. Громкоговоритель, естественно, не имеет ни магнитной цепи, ни звуковой катушки. Поскольку движущая масса диафрагмы примерно в двадцать

раз меньше, чем масса электродинамического громкоговорителя соответствующего размера, то переходные искажения очень малы, звук необычайно чистый и прозрачный.

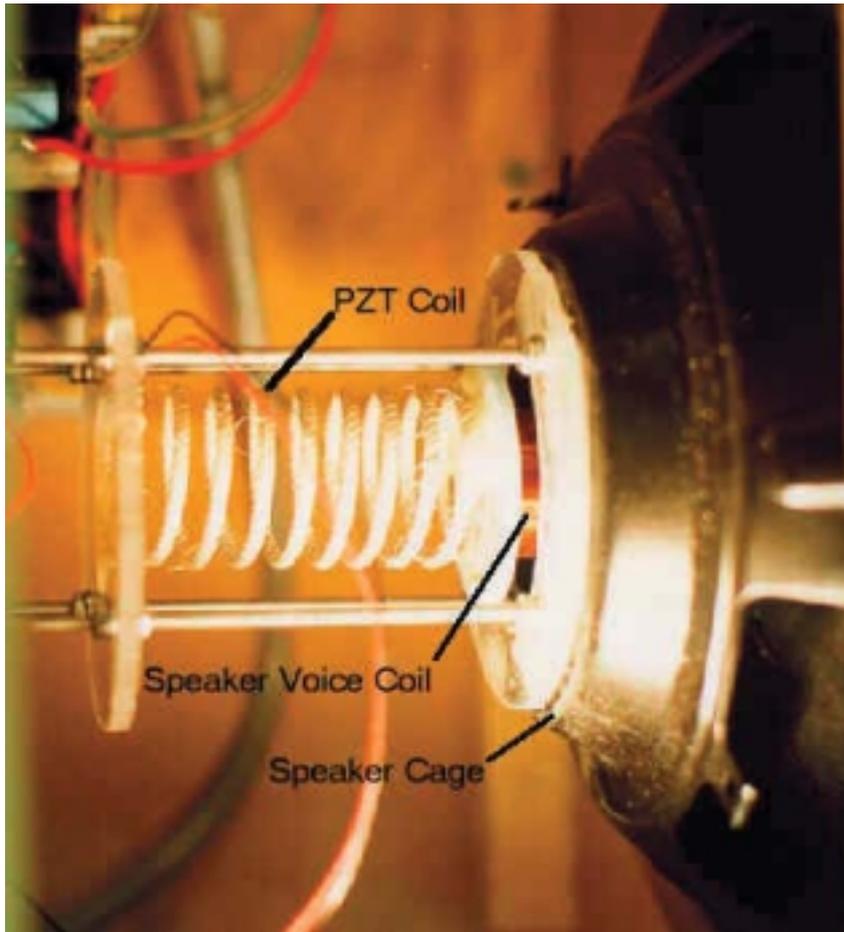


На базе этого громкоговорителя была создана новая линейка контрольных агрегатов. В частности, фирма World Audio выпустила небольшие студийные мониторы ближнего поля KLS10 (рис. 8) с использованием высокочастотного пьезопленочного излучателя HD3P фирмы Audax. Агрегат относительно недорог, но при этом обладает хорошими параметрами: мощность 60 Вт, чувствительность 89 дБ/Вт/м, диапазон 40-30000 Гц, габариты 190 x 310 x 230 мм. Контрольный агрегат KLS3 Gold использует последнюю разработку фирмы Audax: эллиптический высокочастотный пьезогромкоговоритель. Общий объем — 60 куб. дм, чувствительность 90 дБ/Вт/м. По мнению экспертов, агрегат имеет необычайно чистые и прозрачные высокие частоты благодаря применению пьезоизлучателя.

Неожиданное развитие за последние годы получило направление создания пьезогромкоговорителей в связи с разработкой "мягкой" пьезокерамики, из которой можно формовать диафрагмы и элементы громкоговорителей разных конфигураций. Наибольших успехов в этом направлении добился Междисциплинарный Исследовательский Центр при университете в Бирмингеме (Великобритания), где на протяжении многих лет велись работы по созданию мягких керамических материалов PZT (толстопленочных) и разнообразных изделий из них. Успехи технологии позволили создать биморфные пьезокерамические элементы самых разнообразных конструкций: в виде сферических куполов, пружин и др. (рис. 9).



Появление таких пьезоэлементов позволило приступить к разработке новых конструкций излучателей, в частности, создать низкочастотный громкоговоритель, где вместо звуковой катушки использован пьезоэлемент (рис. 10).



Перспективы пьезоизлучателей

Анализ процессов создания пьезоизлучателей, работающих в звуковом диапазоне частот, позволяет выявить три устойчивые тенденции в их развитии:

- создание пьезокерамических биморфных элементов и разработка конструкций рупорных высокочастотных громкоговорителей на их основе (лидером в этом направлении является фирма Motorola, с использованием громкоговорителей которой различными компаниями создана целая линейка акустических систем);
- разработка пьезопленочных высокочастотных излучателей и акустических систем с их использованием (ведущими являются фирмы Pioneer и Audax);

- создание нового поколения мягких пьезокерамических материалов (толстых пьезопленок PZT) и отработка на их основе конструкций не только высокочастотных, но и низкочастотных громкоговорителей.

Большие достижения в технологии пьезокерамических материалов и их широкое использование в разных областях техники позволяют ожидать значительного прогресса в развитии излучателей на их основе.

Наряду с вышеперечисленными видами излучателей проводятся работы по созданию плазменных, пневматических и других видов громкоговорителей, но они еще не выпускаются промышленно. В последние годы большое внимание уделяется созданию цифровых излучателей (своего рода акустического ЦАП), но пока эта работа находится на стадии научных исследований.

Часть 5.1. Корпуса акустических систем. Конструкции.

В предыдущих статьях были рассмотрены конструкции различных видов излучателей, которые являются основными элементами всех видов акустических систем. Однако неотъемлемой частью любой акустической системы является также корпус.

Корпус (рис. 1) выполняет многообразные функции. В области низких частот он блокирует эффект "короткого замыкания", возникающий за счет сложения излучаемого звука от передней и тыловой поверхностей диафрагмы в противофазе,

что приводит к подавлению низкочастотного излучения. Применение корпуса позволяет увеличить интенсивность излучения на низких частотах.



Кроме того, он увеличивает механическое демпфирование громкоговорителей, что позволяет "сгладить" резонансы и уменьшить неравномерность амплитудно-частотной характеристики. Корпус оказывает существенное влияние не только в области низких, но и в области средних и высоких частот за счет дифракционных эффектов и за счет колебаний стенок корпуса, что, естественно, вносит существенный вклад в увеличение линейных и нелинейных искажений и в качество звучания акустических систем. Именно поэтому вопросам проектирования корпусов

акустических систем (выбору конфигурации, материала стенок, вибродемпфирующих и виброизоляционных покрытий и т. д.) все фирмы-производители уделяют большое внимание. Наиболее распространенными типами низкочастотного оформления в конструкциях современных корпусов акустических систем являются: бесконечный экран (infinite baffle), закрытый корпус (closed box, acoustical suspensions, sealed box), корпус с фазоинвертором (vented-box, ported-box, bass-reflection и др.), лабиринт (labyrinth), трансмиссионная линия (transmission-line), корпус с симметричной нагрузкой (bandpass enclosure), с пассивным радиатором (passive radiator, drone cone) и др.

Остановимся на конструкции наиболее известных из них.

Бесконечный экран

Этот тип оформления должен удовлетворять двум условиям: представлять бесконечно большую поверхность, в которой установлен громкоговоритель, и иметь большой объем воздуха позади нее. Максимальным приближением к такому оформлению является установка громкоговорителя в стене комнаты с достаточно большим объемом за ним. Только при выполнении обоих условий обеспечивается полное предотвращение эффекта короткого замыкания и эффекта демпфирования колебаний со стороны воздушного объема.

Частотная характеристика громкоговорителя в таком "истинно бесконечном экране" зависит от значения его резонансной частоты и спадает со

скоростью 12 дБ/окт. Следует, правда, отметить, что отсутствие демпфирования при установке громкоговорителя в такой вид оформления приводит к эффекту "бубнения" на низких частотах (особенно слышимому у громкоговорителей больших размеров).

Использование плоских экранов конечных размеров или "свернутых" экранов (то есть экранов с согнутыми краями — открытых корпусов) в качестве низкочастотных оформлений было довольно широко распространено в начальный период развития производства выносных акустических систем в 30-50 годы. Однако это приводило к созданию акустических систем с очень большим объемом корпуса (600-800 куб. м), поскольку минимальный размер, при котором не будет короткого замыкания, определяется соотношением: $2L = \lambda/2$, где L — расстояние от центра до края экрана, λ — длина волны. Например, для частоты 100 Гц, где длина волны $\lambda = 3,4$ м, величина L составляет 0,85 м.

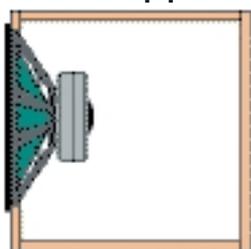
Если экран свернуть, то есть перейти к открытому оформлению, то его размер можно уменьшить только процентов на тридцать. В противном случае получаются слишком длинные боковые стенки (типа трубы), в которых возникают резонансные явления, и явление дифракции на открытых краях, окрашивающее звук. Поэтому в выносных акустических системах такие типы оформлений практически не используются, хотя встроенные в стены АС применяются достаточно часто, особенно в аппаратных студий звукозаписи (они называются

"in-wall", "in-ceiling infinite baffle", "wall-mount panel" и т. д.).

Термин "infinite baffle" употребляется иногда также для оформлений типа "закрытый ящик" достаточно больших размеров, в которых не происходит сдвига резонансной частоты громкоговорителя по сравнению с излучением в свободное пространство (при этом отношение гибкости подвеса к гибкости воздуха должно быть меньше, чем 3).

Закрытый корпус

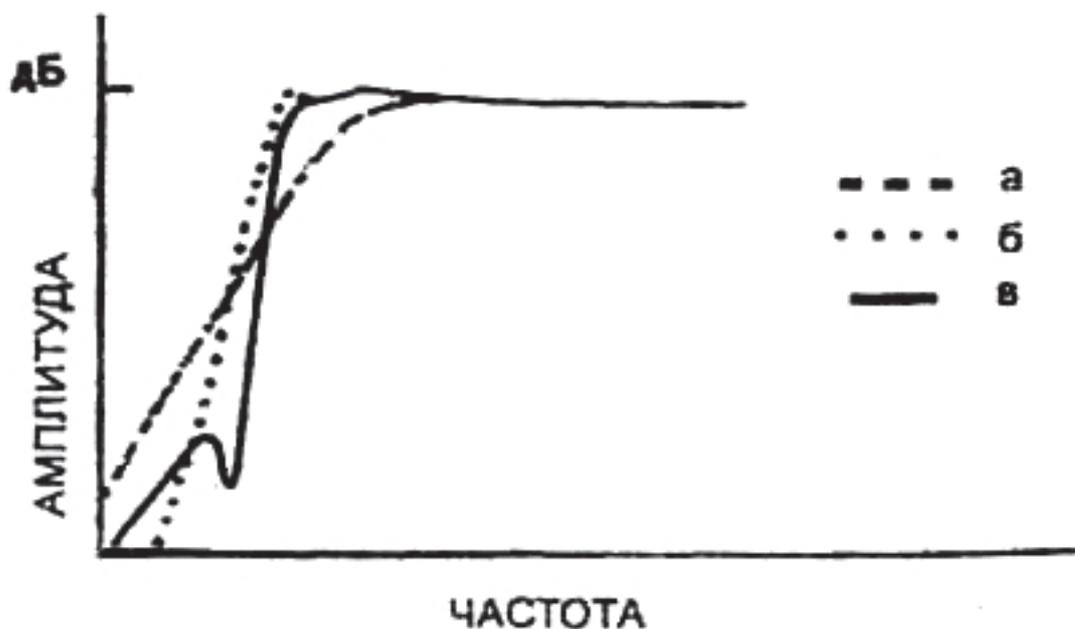
В период значительного увеличения объемов массового производства выносных акустических систем, то есть примерно в пятидесятые годы, начали активно применяться закрытые корпуса "компрессионного" типа, что позволило значительно уменьшить размеры АС, сделать их удобными для применения в жилых комнатах и при этом сохранить воспроизведение низкочастотной части диапазона (рис. 2).



Принцип работы компрессионного оформления состоит в том, что в нем используются громкоговорители с очень гибким подвесом и большой массой, то есть низкой резонансной частотой. В этом случае упругость воздуха в корпусе становится определяющим фактором. Именно она начинает вносить основной вклад в восстанавливающую силу, приложенную к диафрагме (при этом отношение гибкости подвеса

к гибкости воздуха должно быть не меньше, чем 3...4). Поскольку воздух — среда линейная (при относительно малых уровнях звукового давления), то это позволяет, кроме возможности уменьшить объем корпуса, уменьшить также нелинейные искажения.

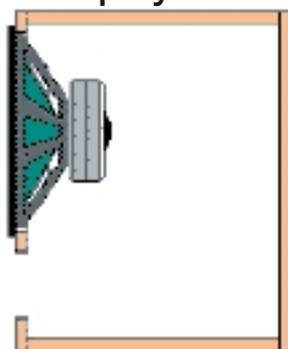
Низкочастотные громкоговорители для таких систем должны проектироваться особым образом (иметь большую гибкость подвеса, большую массу диафрагмы, особую конструкцию звуковой катушки и магнитной цепи для обеспечения больших смещений и т. д.). Теория проектирования закрытых корпусов была изложена в работах Small-Thiele, в настоящее время их проектирование производится с помощью компьютерных программ. При правильно подобранных электромеханических параметрах громкоговорителей и корпуса в акустических системах такого типа можно получить максимально гладкую форму АЧХ (рис. 3) на низких частотах, обеспечить чистое, сухое звучание басов. Именно поэтому многие ведущие фирмы (например, KEF, Tannoy и др.) при создании акустических систем категории Hi-Fi и контрольных агрегатов применяют корпуса закрытого типа.



Форма АЧХ в области низких частот: закрытого корпуса (а), корпуса с фазоинвертором (б), корпуса с пассивным излучателем (в)

Корпус с фазоинвертором

Это корпус, в котором сделано отверстие, что позволяет использовать излучение тыльной поверхности диффузора (рис. 4). Максимальный эффект достигается в области частоты резонанса колебательной системы, образуемой массой воздуха в отверстии или трубе и гибкостью воздуха в корпусе.

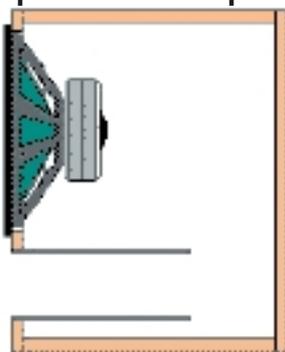


Наличие небольшого отверстия не нарушает компрессионного принципа работы громкоговорителя в корпусе, но дает возможность значительно увеличить уровень звукового давления

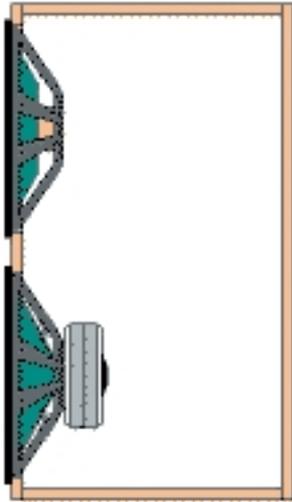
на частоте резонанса (сравнительная форма АЧХ в области низких частот показана на рис. 3), уменьшить уровень нелинейных искажений, значительно расширить возможности настройки параметров акустической системы. Следует отметить, что наличие фазоинвертора требует значительно большего искусства при проектировании, так как неточная настройка приводит к появлению переходных искажений ("затянутых басов").

В современных моделях используются несколько разновидностей фазоинверсных систем.

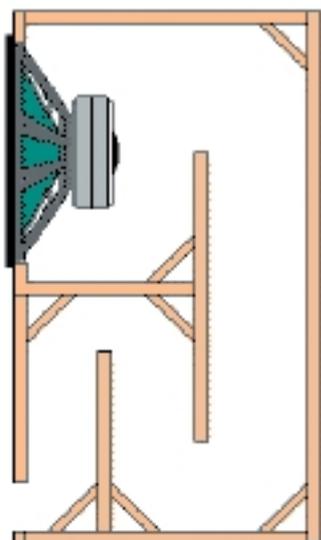
1. Корпус со специальной *трубой*, нагруженной на отверстие (ducted port enclosures) — это позволяет уменьшить размеры корпуса и с помощью изменения размеров трубы улучшить настройку фазоинвертора (рис. 4а).



2. Корпус с *пассивным излучателем* (passive radiator, рис. 5); в отверстие корпуса устанавливается пассивный (то есть без магнитной цепи) громкоговоритель, колебания которого возбуждаются за счет колебаний объема воздуха, заключенного в корпус. Регулируя массу и гибкость такого громкоговорителя, можно получать такой же эффект, как и при настройке фазоинвертора.



3. *Лабиринт* (labyrinth, рис. 6) представляет собой вариант низкочастотного корпуса с фазоинвертором, в котором устанавливаются специальные перегородки, создающие своего рода лабиринт для потока воздуха. Когда длина лабиринта достигает $1/4$ длины волны на частоте резонанса низкочастотного громкоговорителя, он действует аналогично соответствующим образом настроенному фазоинвертору. Применение лабиринта расширяет возможности для настройки на более низкие частоты. Лабиринт обычно имеет серию резонансных пиков на гармониках, соответствующих основной резонансной частоте трубы. Они демпфируются размещением специальных звукопоглощающих материалов на стенках корпуса.

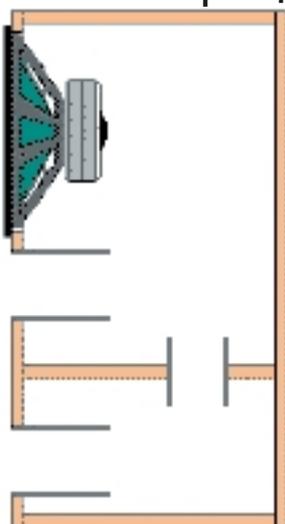


4. *Трансмиссионная линия* (transmission line) является вариантом лабиринта. В современных конструкциях акустических систем используются ее многочисленные разновидности: четвертьволновая (quarter wave), первого порядка (first order), с переменным сечением (tapered), трапецеидальная (trapezoidal) и т. д.

Трансмиссионная линия отличается от лабиринта тем, что звукопоглощающим материалом забивается весь объем корпуса, и поперечное сечение линии делается переменным — больше у конуса, меньше у отверстия. Звукопоглощающий материал подбирается таким образом, чтобы обеспечить демпфирование высокочастотных резонансов. Корпуса такого типа очень сложны для настройки, поэтому существуют их упрощенные варианты (типа "tapered pipe"), в которых используется просто труба переменного сечения с обратным соотношением площадей: больше у диффузора, меньше у отверстия с заполнением объемным поглотителем.

5. *Фазоинверсное оформление с двойной камерой* (double-chamber, рис. 7) или с несколькими

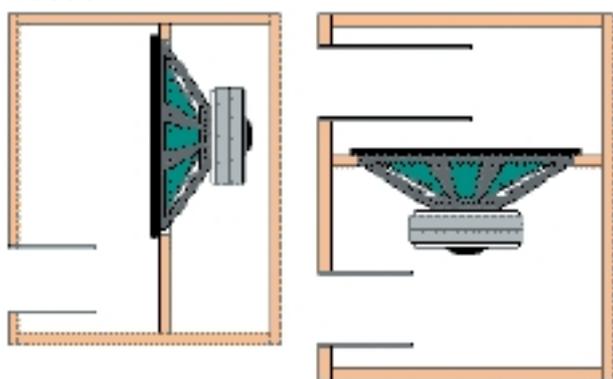
камерами (multichamber port). Применение двойных или нескольких камер позволяет обеспечить согласование нагрузки с низкочастотным громкоговорителем в значительно более широком диапазоне частот. На амплитудно-частотной характеристике такой системы отчетливо видны два резонансных пика: один соответствует настройке низкочастотного громкоговорителя на полный объем двух камер, другой — на одну камеру; если эти камеры равных объемов, то эти частоты разделены ровно на октаву.



Обычно двойная камера имеет одно отделение в два раза больше другого. Оформления с двойными камерами обеспечивают большее демпфирование колебаний громкоговорителей, что дает значительные преимущества при использовании их в мощных акустических системах, например, для дискотек, музыкальных ансамблей и др., так как снижает вероятность перегрузки и выхода из строя низкочастотных громкоговорителей.

6. Оформления типа *полосовых фильтров* (bandpass systems, рис. 8) — это также разновидность фазоинверсных систем, в которых

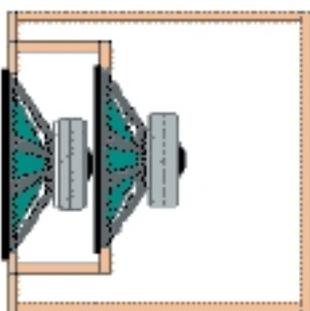
громкоговоритель установлен внутри закрытого корпуса и излучает не прямо в окружающую среду, а через корпус с фазоинверсным отверстием. Применение таких систем позволяет регулировать спад АЧХ не только в сторону низких частот, но и в сторону высоких частот (то есть действует подобно полосовому фильтру). Подбирая размеры и тип камеры (закрытый, с фазоинвертором, "двойным фазоинвертором" и др.), можно менять крутизну спада АЧХ, поэтому по аналогии с фильтрами их называют "полосовыми" оформлениями. Например, полосовое оформление четвертого порядка содержит переднюю камеру с фазоинвертором, заднюю — закрытую, скорость спада при этом в сторону высоких частот 24 дБ/окт, то есть соответствует фильтру четвертого порядка; полосовое оформление шестого порядка имеет обе камеры с фазоинвертором, при этом спад — 36 дБ/окт.



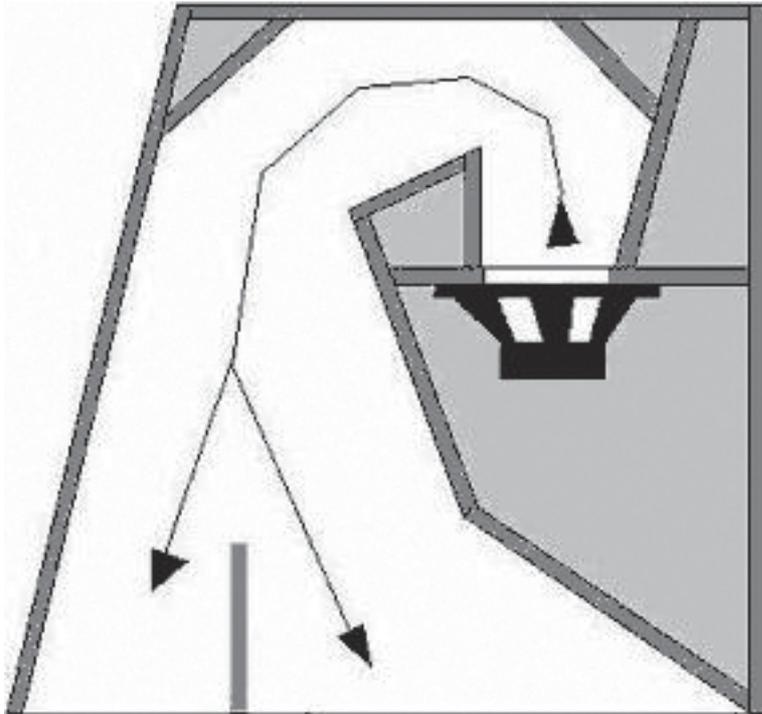
Если в корпусе установлены два одинаковых громкоговорителя на один фазоинвертор, то это называется "низкочастотное оформление с симметричной нагрузкой" (если громкоговорители включены в противофазе, то такое соединение называется "push-pull"). Такого типа оформления часто используются в настоящее время в

низкочастотных блоках (субвуферах), которые широко применяются в аппаратуре для домашнего кинотеатра и др.

В этих же блоках используются *двойные оформления* (типа Isobarik), когда два низкочастотных громкоговорителя нагружены на закрытую дополнительную камеру. Один работает на внутренний объем (закрытый или с фазоинвертором), другой излучает во внешнюю среду — это позволяет снизить частоту среза, уменьшить уровень гармоник, особенно четных, и уменьшить общий объем системы (рис. 9).



7. *Рупорное оформление* (horn) используется как "акустический трансформатор", обеспечивающий улучшение условий согласования (то есть повышающий акустическое сопротивление) громкоговорителя со средой. Это позволяет существенно (в три и более раза) увеличить КПД акустической системы и улучшить характеристики направленности. Однако для низких частот размеры рупора получаются слишком большими, поэтому в некоторых мощных акустических системах используются свернутые рупоры (folded horn, рис. 10), иногда со специальными компрессионными камерами, что позволяет получать большие уровни звукового давления на низких частотах.



Кроме перечисленных, наиболее распространенных видов оформлений, в каталогах, журналах, рекламах упоминаются и другие.

Теория расчета основных видов низкочастотных оформлений глубоко проработана и практически полностью переведена на компьютерные методы. Приближенные методы расчета будут приведены в следующей статье.

Вопрос о достоинствах и недостатках каждого вида оформлений довольно сложен, конкретный выбор зависит от назначения и спецификации данной акустической системы.

Влияние формы корпуса на АЧХ

В области средних и высоких частот существенное влияние на форму амплитудно-частотной характеристики и качество звучания акустических систем оказывает внешняя конфигурация корпуса (то есть его форма, наличие отражающих выступов и впадин, характер округления углов ширина и степень демпфирования его передней стенки и пр.),

что обусловлено влиянием дифракционных эффектов. В последние годы, когда параметры высококачественных акустических систем существенно улучшились, вклад дифракционных эффектов в общий уровень искажений стал более заметен, поэтому анализу их влияния на выходные характеристики акустических систем посвящены многочисленные исследования.

Результаты расчетов и эксперименты показали, что использование корпусов со сглаженными углами, обтекаемой формы (в виде сфер, эллипсоидов, цилиндров и др.), с несимметричным расположением громкоговорителей значительно уменьшает неравномерность АЧХ и снижает фазовые искажения (рис. 11).



Однако в связи с тем, что технология изготовления таких корпусов значительно сложнее и дороже, подавляющее большинство акустических систем выпускается в корпусах прямоугольной формы. При этом применяются специальные меры для уменьшения дифракционных эффектов на углах передней панели: специальное заглушение панели, оптимизация соотношения размеров передней

панели и глубины корпуса, подбор несимметричного расположения громкоговорителей и др.

Стремление сдвинуть дифракционные пики-провалы на АЧХ в более высокочастотную область и тем самым снизить их влияние, заставляет использовать максимально узкие передние панели (насколько позволяют размеры низкочастотного громкоговорителя). Современная техника цифровых измерений дает возможность количественно оценить вклад дифракционных эффектов в общий уровень неравномерности АЧХ (он может достигать 4 дБ) и рассчитать искажения ГВЗ (до 0,5 мс). Полученные значения оказались достаточно высоки, что заметно сказывается на качестве звучания, поэтому сложные внешние конфигурации многих современных акустических систем обусловлены не только эстетическими соображениями, но и стремлением улучшить их параметры и качество звучания.

Влияние вибрации корпуса на АЧХ

Корпус акустической системы в области средних и высоких частот вносит также значительные искажения в воспроизводимый сигнал из-за колебаний стенок корпуса и заключенного в них объема воздуха. Это приводит к изменению формы АЧХ: снижению уровня звукового давления на низких частотах и увеличению неравномерности на средних; возрастанию нелинейных искажений и увеличению переходных процессов, что ухудшает качество звучания акустических систем, внося так называемые "ящичные" (boxes) призвуки.

Анализ механизмов возникновения звукоизлучения из-за вибраций стенок корпуса показывает, что существуют два пути передачи колебаний от громкоговорителя к стенкам корпуса:

- возбуждение колебаний внутреннего объема воздуха в корпусе от тыльной поверхности диафрагмы и передача через него колебаний на стенки корпуса;
- прямая передача вибраций от диффузородержателя на переднюю стенку, а от нее на боковые и на заднюю.

В области частот примерно до 600 Гц существенный вклад вносят оба механизма передачи, на более высоких частотах в основном играет роль второй механизм. Для уменьшения влияния этих явлений используют различные конструктивные меры, а также различные способы звуко- и виброизоляции и поглощения.

Для уменьшения передачи колебаний за счет внутреннего объема корпуса и демпфирования его внутренних резонансов применяют различные методы звукопоглощения: обычно корпус полностью или частично заполняется тонковолокнистыми упругопористыми материалами (синтетические волокна, минеральная вата и др.). Для увеличения коэффициента поглощения в области низких частот необходимо увеличивать толщину и плотность заполнения. Однако чрезмерное заполнение корпуса звукопоглощающим материалом может привести к снижению уровня звукового давления на низких частотах и к излишней "сухости" басов.

Рекомендуемая плотность заполнения составляет 8-11 кг на куб. м. За последние годы создано новое поколение звукопоглощающих материалов, обеспечивающих эффективное демпфирование резонансных колебаний внутреннего объема в заданной области частот. В некоторых моделях используются перфорированные и сотовые панели поглотителей внутри корпуса. Внесение поглотителя значительно снижает неравномерность АЧХ.

Для уменьшения колебаний стенок корпуса необходимо применение мер, направленных на увеличение его звукоизолирующей способности. Звукоизолирующая способность корпуса акустической системы состоит в следующем: часть звуковой энергии, излучаемой внутрь корпуса диафрагмой громкоговорителя, поглощается в слоях звукопоглощающего материала, часть попадает на стенки корпуса.

В стенках происходят следующие процессы: некоторая доля энергии возвращается обратно внутрь корпуса, другая рассеивается в материале стенок из-за потерь на трение и остаточную деформацию, третья проходит в окружающую среду за счет упругих продольных и поперечных колебаний стенок и через щели и поры в материале. Задача выбора конструкций стенок корпуса состоит в том, чтобы максимально увеличить коэффициент звукоизоляции, то есть уменьшить долю прошедшей энергии по отношению к падающей.

Коэффициент звукоизоляции существенно зависит от жесткости и массы стенок. Поэтому для уменьшения общего уровня звукоизлучения от стенок (то есть для повышения их звукоизоляции) применяются различные меры для повышения их жесткости и массы.

1. Использование для стенок тяжелых и жестких материалов: кирпича, мрамора, пенобетона и др. Эффект звукоизоляции получается очень хороший (до 30 дБ и более), соответственно улучшается качество звучания акустических систем. Но такие корпуса оказываются слишком тяжелыми и дорогими для широкого применения, что затрудняет их изготовление и эксплуатацию. Поэтому в качестве материалов для корпусов обычно используются: многослойная фанера, древесностружечная плита (ДСП), древесноволокнистая плита (ДВП) и др. (толщина фанеры для боковых стенок выбирается в пределах 18...20 мм, для лицевых — 20...40 мм).

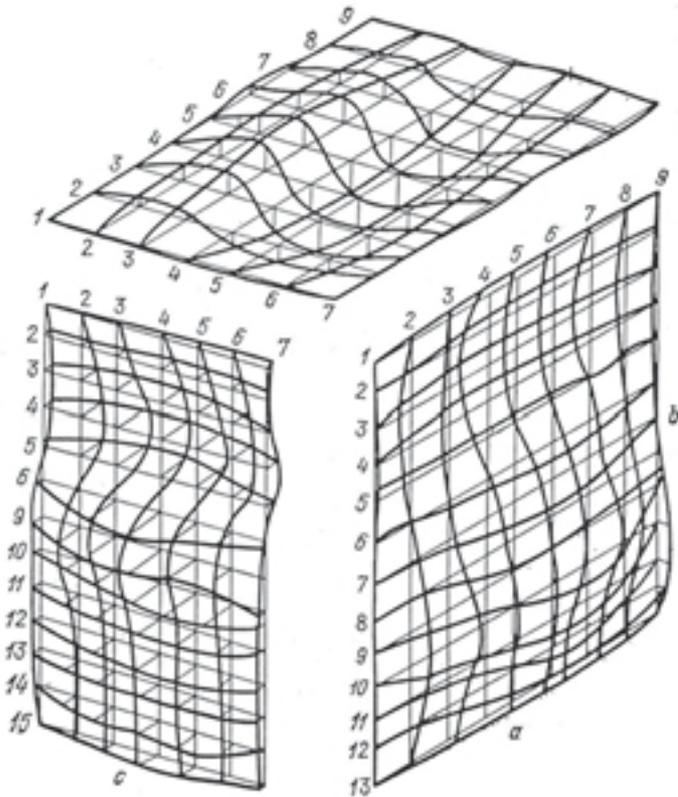
2. Применение многослойных материалов из слоев различной жесткости и плотности, что позволяет существенно уменьшить колебания стенок.

3. Использование специальных вибропоглощающих покрытий стенок корпуса. В зависимости от диапазона резонансных частот стенок выбираются "жесткие", "мягкие" или армированные покрытия.

4. Применение конструктивных мер: ребер жесткости, стяжек, распорок между стенками, разделение корпуса на отдельные отсеки и т. д. Анализ второго способа возбуждения колебаний стенок корпуса показывает, что при колебаниях

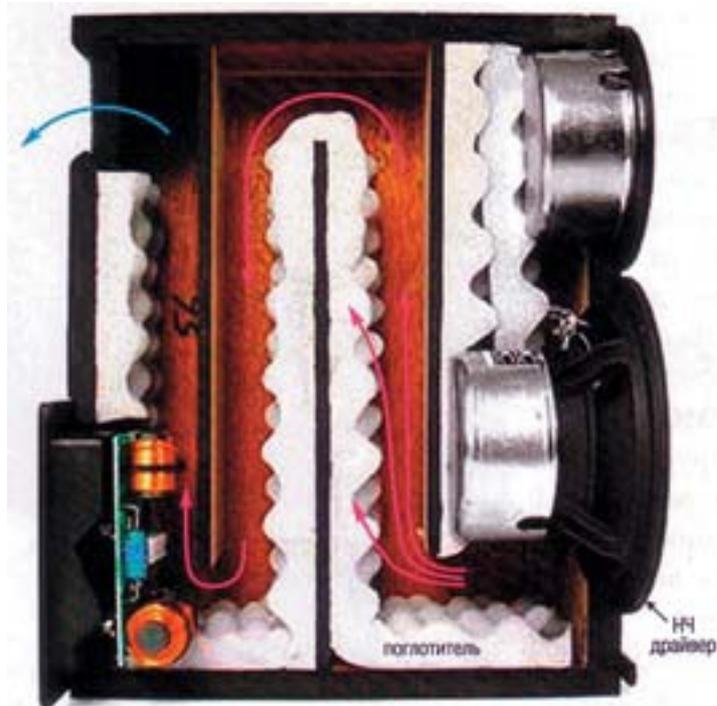
подвижной системы громкоговорителя возбуждаются колебания диффузородержателя, которые передаются на переднюю панель. Затем возникают интенсивные продольные колебания боковых стенок, которые передают вибрации на заднюю и верхние панели.

В области низких частот стенки корпуса колеблются синфазно. В этой области уровень виброускорения на стенках (а, следовательно, и уровень звукоизлучения от них) определяется их общей упругостью и упругостью заключенного в них объема воздуха. По мере повышения частоты начинаются интенсивные изгибные колебания всех стенок корпуса, амплитуды которых имеют максимальные значения на резонансных частотах. Измерения виброускорения на стенках корпусов показывают, что наибольшие амплитуды вибраций имеют место на передней и задней стенках, затем на верхней и боковых. Общая картина распределений на стенках корпуса показана на рис. 12.



Для борьбы с прямой передачей вибраций применяют методы виброизоляции и вибропоглощения. Эффект виброизоляции обеспечивается применением упругих амортизаторов при креплении громкоговорителя к корпусу, а иногда и передней стенки корпуса к боковым. При конструировании высококачественных акустических систем применяют сплошные резиновые прокладки между диффузородержателем и передней панелью, локальные опорные виброизоляторы для крепления винтов, амортизирующие прокладки для крепления передней панели к боковым, развязку диффузородержателя от передней панели за счет дополнительной опоры его на дно и т. д. Все эти меры позволяют уменьшить передаваемый уровень вибрации на боковые и задние стенки корпуса на 10...11 дБ.

В современных высококачественных акустических системах корпус представляет собой чрезвычайно сложную и дорогостоящую конструкцию (рис. 13). В качестве критерия эффективности принятых мер по звукоизоляции корпуса принято считать разницу между уровнем звукового давления, излучаемого стенками корпуса, и уровнем звукового давления от акустической системы в целом, она должна составлять не менее 20 дБ.



Кроме объективных измерений при проектировании проводится прослушивание акустических систем в корпусах различной конструкции, результаты которых подтверждают большое влияние корпуса на объективные и субъективные характеристики акустических систем.

Часть 5.2. Корпуса акустических систем. Методы расчета.

Как было показано, корпус оказывает существенное влияние на параметры и качество звучания акустических систем в области как низких, так и высоких частот. Для анализа этих процессов были разработаны экспериментальные методы и созданы прикладные программы, позволяющие рассчитать оптимальную форму корпуса с учетом дифракционных процессов и структуры волнового поля внутри него, а также выбрать способы звукопоглощения, звуко- и виброизоляции. Однако теория расчетов и способы ее реализации довольно сложны, поэтому для практического использования созданы различные приближенные методы расчета параметров корпусов акустических систем.

Метод электромеханических аналогий

В области низких частот, где размеры громкоговорителей и акустических систем существенно меньше длины звуковой волны в воздухе (например, для частоты $f = 50$ Гц длина волны $\lambda = c / f = 340 / 50 = 6,8$ м), для анализа процессов преобразования сигнала в громкоговорителях и акустических системах используется *метод электромеханических аналогий*.

Несмотря на то, что идея этого метода была предложена в 30-е годы, теория его постоянно совершенствуется, разрабатываются прикладные приложения для расчета и проектирования электроакустических преобразователей (громкоговорителей, микрофонов, телефонов и т. д.) и акустических систем (теория Small-Thiele). На

базе этого метода созданы различные компьютерные программы, широко применяемые в проектировании акустической аппаратуры. В основе метода лежит сходство уравнений колебаний механических систем и электрических цепей, позволяющее установить соответствие между элементами электрической цепи и параметрами механической системы, если она может быть представлена системой с сосредоточенными параметрами, то есть с конечным числом степеней свободы. Поскольку электродинамический громкоговоритель представляет собой электро-механо-акустический преобразователь, можно считать, что в области низких частот он содержит три типа сосредоточенных элементов: акустические, механические, электрические. Поэтому для анализа его работы могут использоваться эквивалентные акустические, механические или электрические схемы, представляющие во всех случаях электрические цепи, элементы которых соответствуют определенному типу элементов громкоговорителя (они могут с помощью соответствующих коэффициентов переводиться друг в друга).

Принципы построения эквивалентных схем громкоговорителей в различных видах низкочастотного оформления детально рассмотрены в литературе (например, в книге "Высококачественные акустические системы и громкоговорители", Алдошина И. А., Войшвилло А. Г., 1989 год), поэтому приведем только некоторые

основные соотношения для громкоговорителей и акустических систем, полученные на основе разработанных за последние годы методов анализа и синтеза параметров акустических систем в области низких частот (теория Small-Thiele).

Метод системного проектирования

Развитие высококачественной аппаратуры (студийных агрегатов, бытовых акустических систем и др.) потребовало пересмотра подходов к разработке акустических систем, а именно перехода к их системному проектированию. Основа метода заключается в том, что электромеханические параметры низкочастотного громкоговорителя, конструктивные параметры корпуса и электрические параметры корректирующих цепей рассматриваются совместно и требования к каждому элементу определяются из общих требований на акустическую систему в целом на основе анализа ее обобщенной эквивалентной схемы. Такой подход оказался на практике значительно более эффективным в улучшении объективных характеристик и качества звучания акустических систем, чем существовавшая ранее практика отдельного проектирования громкоговорителей, корпусов и фильтров.

Теоретической основой такого подхода явилось проведение аналогий между характеристиками эквивалентных схем, описывающих работу акустических систем в области низких частот, и характеристиками соответствующих электрических фильтров, что позволило применить хорошо

разработанные методы анализа и оптимального синтеза фильтров к оптимизации параметров всех элементов акустических систем, в том числе и громкоговорителей. Именно это направление в проектировании акустических систем и громкоговорителей с использованием компьютеров интенсивно развивается в настоящее время.

Для анализа электрических схем обычно используется понятие *передаточной функции*.

Последняя может быть определена как отношение комплексного выходного сигнала, то есть звукового давления $r_{вых}(s)$ к комплексному входному сигналу, то есть напряжению $U_{вх}(s)$:

$H(s) = r_{вых}(s) / U_{вх}(s)$ ($s = j\omega$ — комплексная частота).

Анализ эквивалентных акустических схем показывает, что, например, для закрытых акустических систем передаточная функция может быть аппроксимирована в виде отношения полиномов второго порядка:

$H(s) = A_1 s^2 / (a_2 s^2 + a_1 s + a_0)$,

где A_1 , a_2 , a_1 , a_0 — коэффициенты, зависящие от электромеханических параметров громкоговорителей и корпуса. Вид этой функции аналогичен передаточной функции фильтра верхних частот полиномиального типа второго порядка (со спадом 12 дБ/окт в сторону низких частот). Для акустических систем фазоинверсного типа функция $H(s)$ имеет более сложный вид и соответствует передаточным функциям фильтров четвертого порядка.

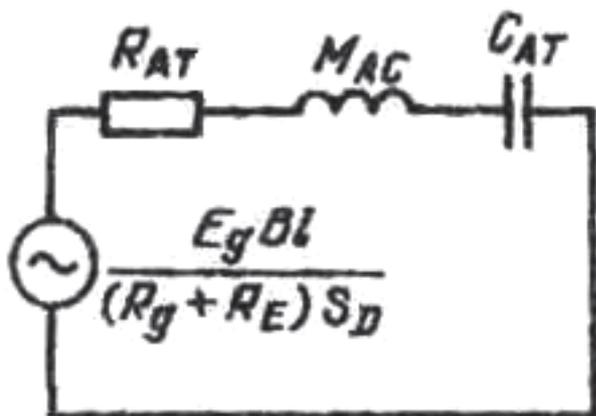
Из выражения для передаточной функции можно определить амплитудно-частотную характеристику (АЧХ), фазочастотную характеристику (ФЧХ) и групповое время задерживания (ГВЗ) акустической системы следующим образом: АЧХ определяется как логарифм модуля передаточной функции $20 \lg |H(s)|$, ФЧХ — как аргумент передаточной функции $\arg H(s)$ и ГВЗ как производная по частоте от фазы, то есть как $d \{ \arg H(s) \} / d\omega$.

Задавая определенные требования к выходным характеристикам акустической системы, можно с помощью анализа эквивалентных схем синтезировать требования к параметрам громкоговорителей, и наоборот, выбрав громкоговорители с определенными электромеханическими параметрами, можно рассчитать выходные характеристики акустической системы.

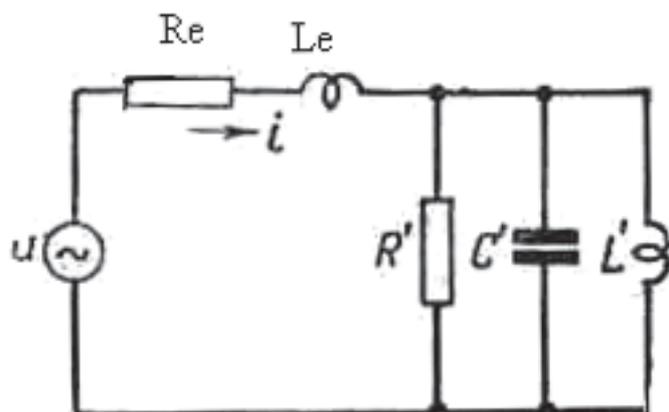
Расчет параметров АС с закрытым низкочастотным оформлением

Эквивалентные схемы громкоговорителей в закрытой акустической системе имеют следующий вид.

1. Эквивалентная *акустическая* схема громкоговорителя в закрытом корпусе показана на рис. 1. В данной схеме напряжения соответствуют звуковым давлениям, а токи — объемным скоростям, поэтому расчет токов и напряжений обычными методами теории цепей позволяет определить основные характеристики акустической системы — АЧХ, ФЧХ, КПД и др., а отсюда и требуемые параметры громкоговорителя и корпуса.



2. Эквивалентная электрическая схема для закрытого корпуса показана на рис. 2.



Параметры электрической и акустической эквивалентной схемы связаны между собой следующими соотношениями:

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

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

массы воздуха, R_{AT} — полное сопротивление потерь громкоговорителя в корпусе, равное

$$R_{AT} = R_{AB} + R_{AS} + B^2 l^2 / [R_E S_D^2],$$

L_e и R_e — индуктивность и активное сопротивление катушки.

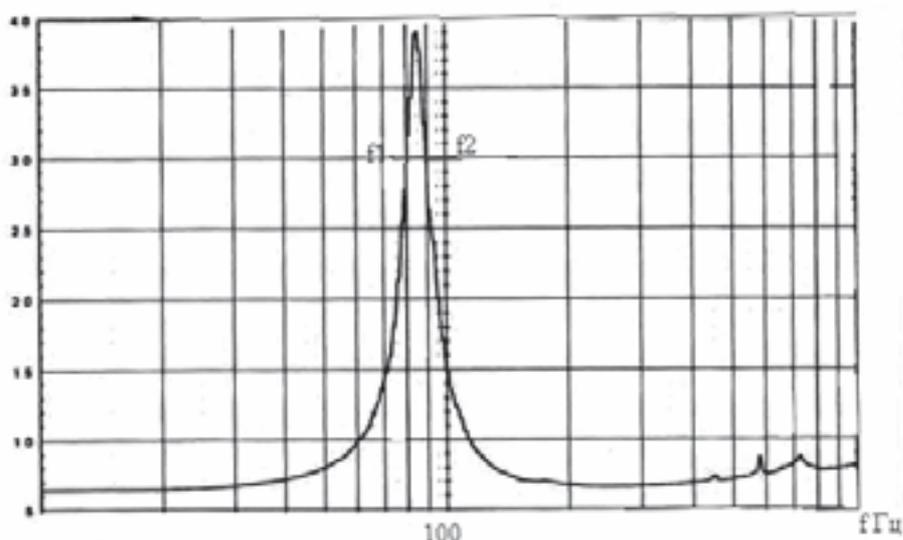
3. Эквивалентная механическая схема используется в практике проектирования редко, вид ее и коэффициенты пересчета приведены в литературе.

Как следует из анализа эквивалентной электрической схемы (рис. 2), полное электрическое сопротивление (импеданс) громкоговорителя в закрытом корпусе может быть записано в следующем виде:

$$Z(\omega) = R_e + j\omega L_e + \frac{1}{\frac{1}{R_e} + j\omega C' + \frac{1}{j\omega L'}}$$

Характер зависимости от частоты модуля импеданса $Z(\omega)$ показан на рис. 3.

$Z, \text{ Ом}$



Расчет параметров акустической системы с закрытым оформлением может происходить в двух направлениях:

- 1) под выбранный низкочастотный громкоговоритель с заданными электромеханическими параметрами;
- 2) под заданные требования к выходным характеристикам акустической системы.

В первом случае выбирается низкочастотный громкоговоритель с заданными электромеханическими параметрами Смола-Тиля (Small-Thiele): f_s — частота основного резонанса головки громкоговорителя без оформления; R_e — активное сопротивление ее звуковой катушки; Q_{ts} , Q_{ms} , Q_{es} — полная, механическая и электрическая добротности; V_{as} — эквивалентный объем; X_d — максимальное смещение звуковой катушки; P_E — электрическая мощность и др., обычно они задаются в каталогах и технической документации. Если они не указаны в документации, то их можно измерить по методике, изложенной в вышеуказанной книге.

Связь параметров Смола-Тиля с конструктивными параметрами громкоговорителя может быть кратко представлена следующим образом: f_s — частота основного резонанса головки громкоговорителя без оформления определяется по частоте максимума на частотной характеристике импеданса головки (рис. 3), Q_{ts} , Q_{ms} , Q_{es} — полная, механическая и электрическая добротности связаны между собой следующим соотношением: $1/Q_{ts}=1/Q_{ms}+1/Q_{es}$.

Электрическая добротность определяется по формуле: $Q_{es} = (2\pi f_s M_s R_e) / (BL)^2$, где M_s — масса подвижной системы громкоговорителя (кг), R_e — электрическое сопротивление звуковой катушки на постоянном токе (Ом), L — длина провода звуковой катушки (м), B — индукция в зазоре магнитной цепи (Т), f_s — частота основного резонанса (Гц).

Механическая добротность $Q_{ms} = 2\pi f_s M_s / R_s$, где R_s — механическое сопротивление подвижной системы (Н с/м). Механическую добротность можно определить и из импедансной характеристики по ширине резонансной кривой как:

$$Q_{ms} = \frac{\sqrt{f_1 f_2}}{f_2 - f_1} \sqrt{\frac{|Z|_{\max}}{R_e}},$$

где f_1 и f_2 — частоты, указанные на рис. 3.

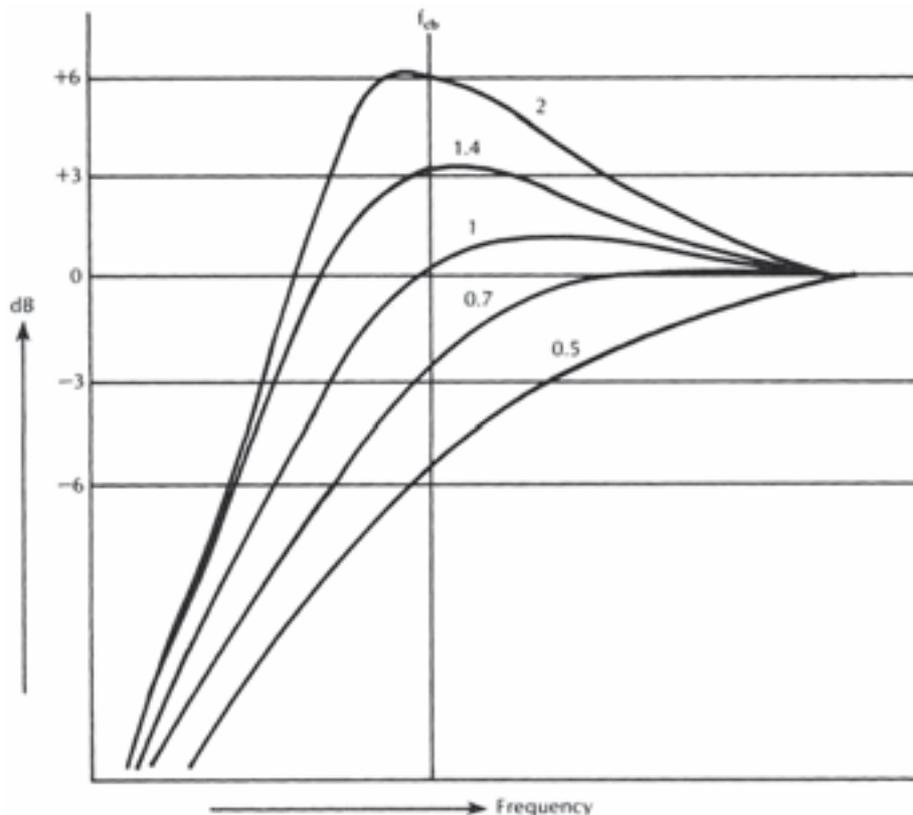
Из полученных значений Q_{ms} и Q_{es} можно определить общую добротность Q_{ts} по ранее приведенной формуле. Эквивалентный объем определяется как закрытый объем воздуха, гибкость которого равна гибкости подвеса. Его можно рассчитать по формуле $V_{as} = VB [(f_c/f_s)^2 - 1]$, где f_s — частота основного резонанса головки громкоговорителя без оформления, f_c — частота резонанса громкоговорителя в закрытом корпусе объемом VB .

Электрическая мощность P_E и максимальное смещение X_d звуковой катушки устанавливаются производителем в процессе разработки и указываются в технической документации на головку громкоговорителя. По этим параметрам можно рассчитать: требуемый объем акустической

системы (VAC), резонансную частоту громкоговорителя в корпусе (f_c), частоту среза (f_3), добротность акустической системы (Q_{tc}), что дает возможность определить форму амплитудно-частотной характеристики акустической системы в области низких частот. Подробная методика расчета изложена в вышеуказанной книге. Приведем здесь упрощенный вариант методики расчета.

1. Выберем низкочастотный громкоговоритель диаметром 25 см со следующими параметрами: резонансная частота без оформления $f_s = 30$ Гц, общая добротность $Q_{ts} = 0.4$, эквивалентный объем $V_{as} = 283$ куб. дм.

2. Подберем предварительно форму АЧХ, которую было бы желательно получить от акустической системы: если посмотреть на эквивалентную схему закрытой акустической системы, то можно видеть, что это фильтр второго порядка, частотная характеристика которого имеет спад в область низких частот 12 дБ/окт. Для фильтра второго порядка можно рассчитать семейства АЧХ для разных значений добротности Q_{tc} и частоты резонанса f_c . Вид этих кривых показан на рис. 4.

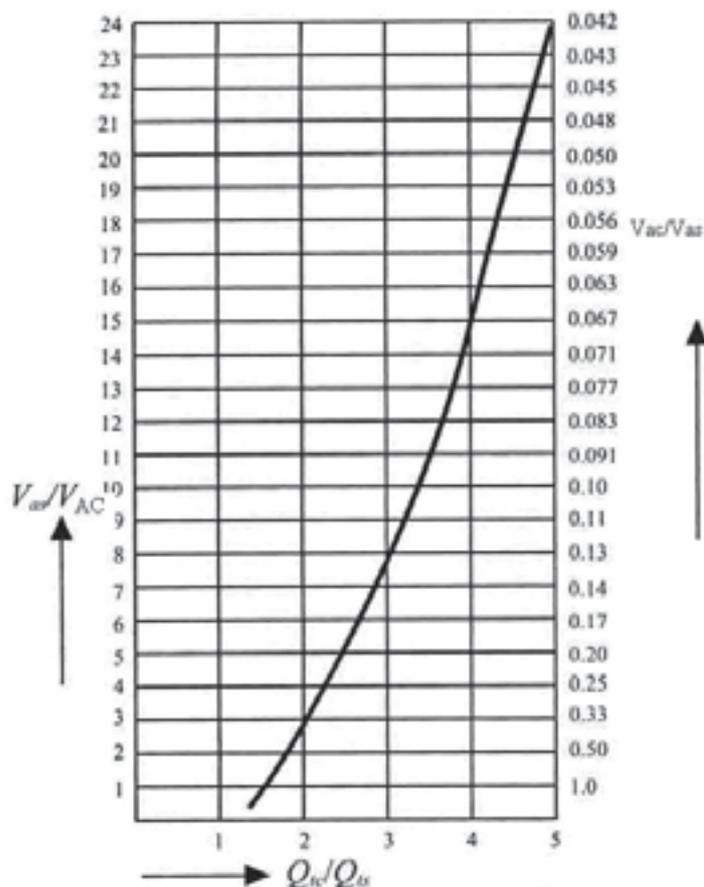


Из них видно, что если выбрать общую добротность акустической системы $Q_{tc}=0.7$, то она будет иметь гладкую форму АЧХ на низких частотах (что обеспечит мягкое и чистое звучание низких частот), если выбрать $Q_{tc}=1.2$, то на АЧХ будет пик в области резонансной частоты, звучание низких частот будет более ярким (поэтому такая форма АЧХ обычно используется в акустических системах для эстрадной музыки), но уровень переходных процессов будет выше (басы будут более затянuty). Допустим, в данном примере выбрана $Q_{tc}=1.2$, тогда по формуле $Q_{tc}/Q_{ts} = f_c/f_s$, может быть определена резонансная частота громкоговорителя в закрытом корпусе: $Q_{tc}/Q_{ts} = 1.2/0.4 = 3$, отсюда $f_c/f_s = 3$ и $f_c = 90$ Гц. Для определения частоты среза можно использовать данные таблицы 1, для чего подставляем $Q_{tc}=1.2$, находим коэффициент $K = f_3/f_c = 0.74$, отсюда частота среза $f_3 = 67$ Гц.

Величина добротности АС — Q	Коэффициент для расчета частоты среза
	— K
0.5	1.55
0.6	1.22
0.7	1.00
0.8	0.90
0.9	0.83
1.0	0.79
1.1	0.76
1.2	0.74
1.3	0.72
1.4	0.71
1.5	0.70

Если необходимо получить более широкий диапазон в области низких частот, то следует выбрать $Q_{tc} = 0.7$, что даст из расчета по вышеуказанной формуле более низкое значение частоты резонанса в корпусе $f_c = 53$ Гц и более гладкую форму АЧХ.

3. Определим требуемый объем акустической системы VAC, пользуясь графиком на рис. 5. Например, при $Q_{tc} / Q_{ts} = 1.2/0.4 = 3$, отношение объемов по графику получается равным $V_{as}/V_{AC} = 8$, отсюда $V_{AC} = V_{as}/8 = 283$ куб. дм / 8 = 35,4 куб. дм (35,4л). Если выбрать $Q_{tc} = 0.7$, то требуемый объем системы будет значительно больше $V_{AC} = 141,5$ куб. дм.



Таким образом, подбирая разные варианты желаемой формы АЧХ, можно рассчитать требуемые для этого параметры акустической системы. В данном примере при выбранной форме АЧХ, соответствующей значению добротности $Q_{тс} = 1.2$, они равны: объем корпуса акустической системы — $V_{АС} = 35.4$ куб. дм, резонансная частота акустической системы — $f_c = 90$ Гц, частота среза на уровне 3 дБ — $f_3 = 67$ Гц.

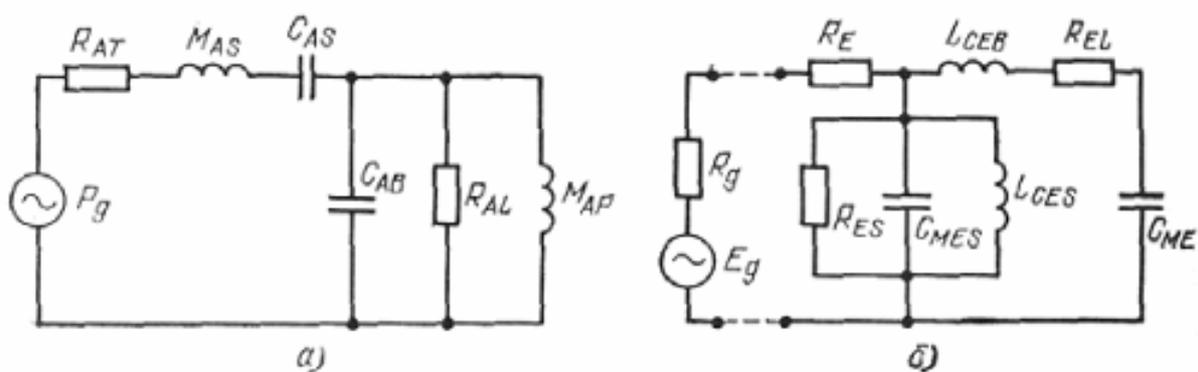
Следует иметь в виду только, что слишком большой объем ящика дает слабое ненасыщенное звучание низких частот (слабый бас), наоборот, слишком малый объем приводит к уменьшению частотного диапазона и появлению "бубнящего баса". Следует также отметить, что объем корпуса системы зависит от гибкости громкоговорителя (то есть эквивалентного объема $V_{ас}$), для акустических

систем компрессионного типа рекомендуемое соотношение должно быть $V_{as}/V_b > 3$.

Во втором случае расчет параметров акустической системы может быть выполнен в обратном порядке. Задаются требуемые параметры акустической системы: форма АЧХ (следовательно, из рис. 4 определяется добротность Q_{tc}), частота среза f_3 и максимально допустимый объем корпуса (или max SPL) — и по ним рассчитываются требуемые характеристики громкоговорителя.

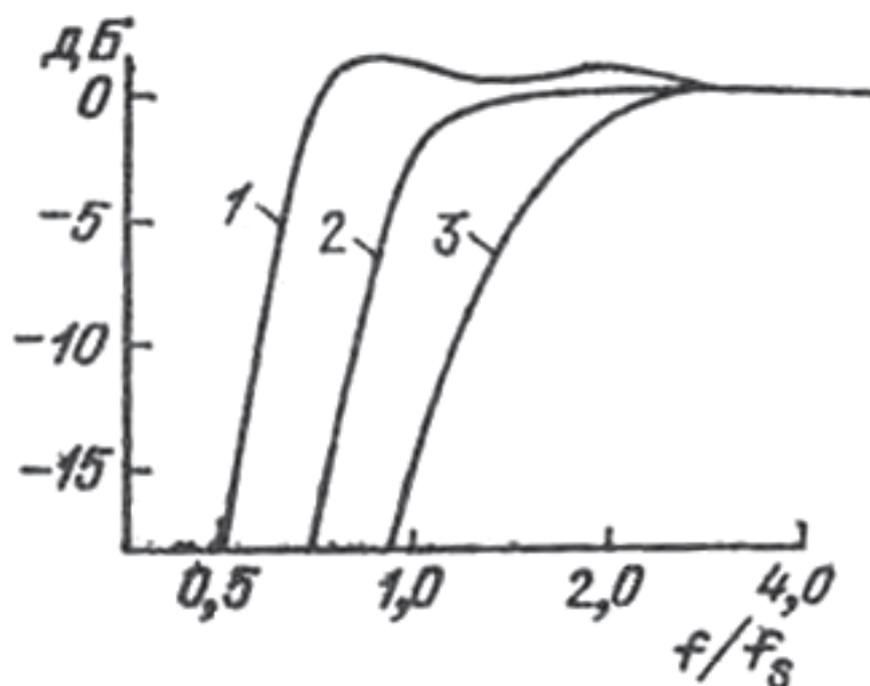
Расчет параметров АС для низкочастотного оформления фазоинверсного типа

Эквивалентные акустическая и электрическая схемы для низкочастотного оформления с фазоинвертором показаны на рис. 6а,б.

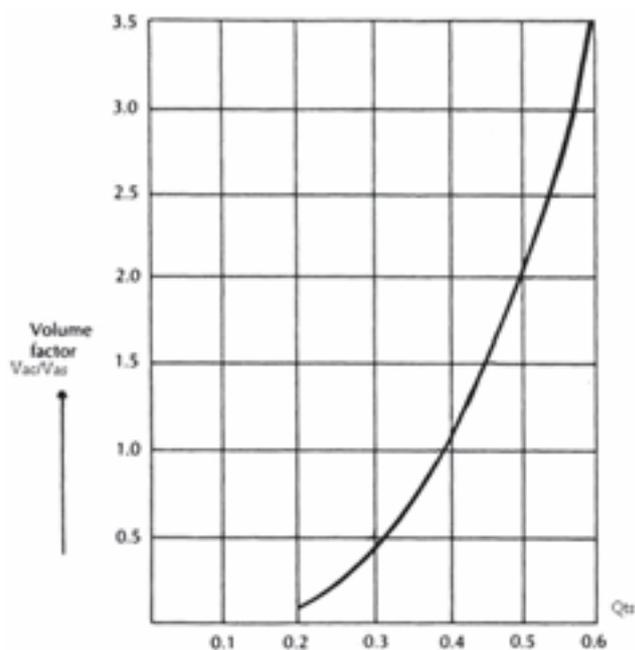


Как следует из анализа электрической эквивалентной схемы (которая представляет собой схему двух связанных контуров), форма АЧХ акустической системы с фазоинвертором соответствует фильтру четвертого порядка со спадом в области низких частот 24 дБ/окт. Форма АЧХ таких фильтров для разных значений параметров показана на рис. 7. В зависимости от того, полиномами какого типа могут быть аппроксимированы передаточные функции таких

фильтров, они называются фильтрами Чебышева (1), Баттерворта (2), Линквица-Риле (3) и др.



Расчет и настройка акустических систем с оформлениями такого типа происходят значительно сложнее, поскольку должно быть обеспечено согласование параметров громкоговорителя, корпуса и фазоинвертора. Рассмотрим *упрощенный вариант* расчета параметров акустической системы под выбранный громкоговоритель с заданными параметрами: f_s , Q_{ts} , V_{as} . Возьмем, например, громкоговоритель диаметром 165 мм с параметрами $f_s = 50$ Гц, $Q_{ts} = 0.4$, $V_{as} = 42.5$ куб. дм. Найдём из графика (рис. 8) значение объема корпуса акустической системы V_{AC} , в данном случае для $Q_{ts}=0.4$, оно равно $V_{AC}/V_{as}=1.1$ $V_{AC} = 46,7$ куб. дм.

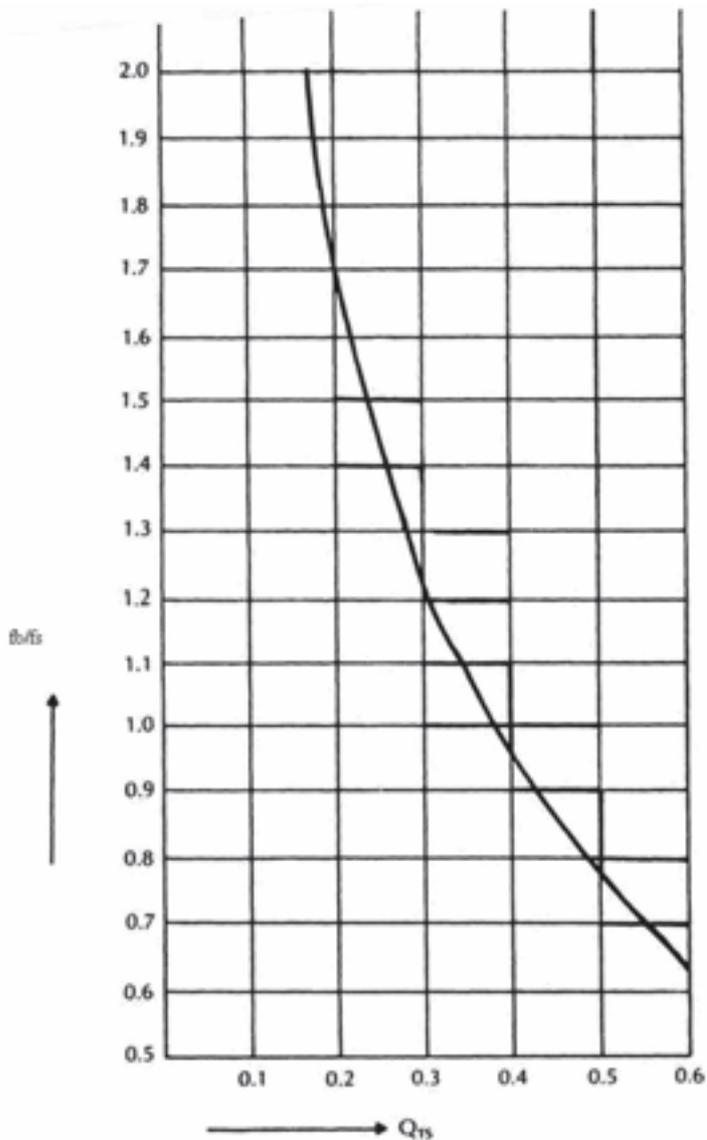


Определим частоту резонансной настройки фазоинвертора. Частота настройки ФИ определяется, как следует из эквивалентной схемы (рис. 6), по формуле:

$$f_B = \frac{1}{2\pi \sqrt{C_{AB} M_{AP}}}$$

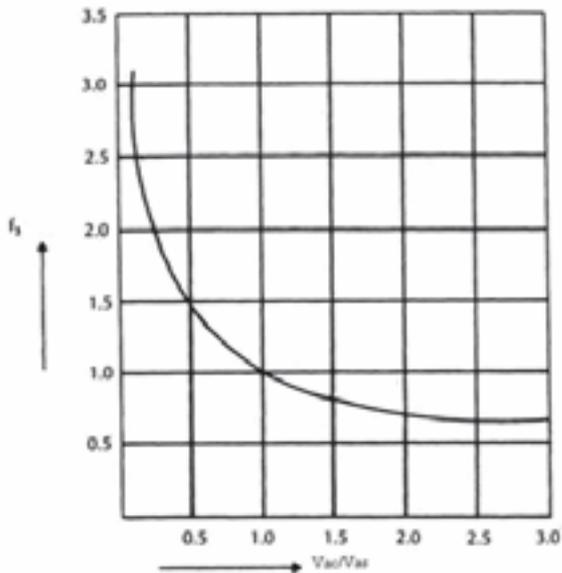
и зависит от массы воздуха в отверстии (и трубе) фазоинвертора M_{AP} и гибкости воздуха в корпусе C_{AB} .

Находим частоту настройки фазоинвертора в данном примере, пользуясь графиком рис. 9. В этом случае при $Q_{ts} = 0.4$ из графика получается $f_B / f_s = 0.96$, отсюда $f_B = 48$ Гц.



Следует обратить внимание, что отношение частоты настройки ФИ к резонансной частоте громкоговорителя без оформления практически близко к единице (для многих случаев настройки параметров $f_b / f_s = 1$).

Определим частоту среза f_3 по кривой из рис. 10, задав $V_{AC}/V_{AS} = 1.1$, получим $n=0.95$, отсюда $f_3 = 47.5$ Гц.



Таким образом, получены основные параметры акустической системы: объем корпуса $VAC = 46.7$ куб. дм, частота среза $f3 = 47.5$ Гц и частота настройки фазоинвертора $fв = 48$ Гц. Эти значения параметров построены для некоторой оптимальной формы АЧХ. Если необходимо рассчитать другие варианты, то надо пользоваться полной программой расчета.

Следующим шагом является определение размеров фазоинвертора для заданной частоты настройки. Минимально допустимое отверстие фазоинвертора приблизительно связано с размерами выбранного громкоговорителя соотношениями, показанными в таблице 2.

Диаметр ГГ — см	Примерная площадь конуса — см ²	Минимальная площадь фазоинвертора — см ²	Минимальный диаметр фазоинвертора — см
10	50	7	3
13	85	12	3.9
17	145	21	5
21	240	35	6.7
24	350	50	8
30	500	70	9.5
38	900	130	12.9

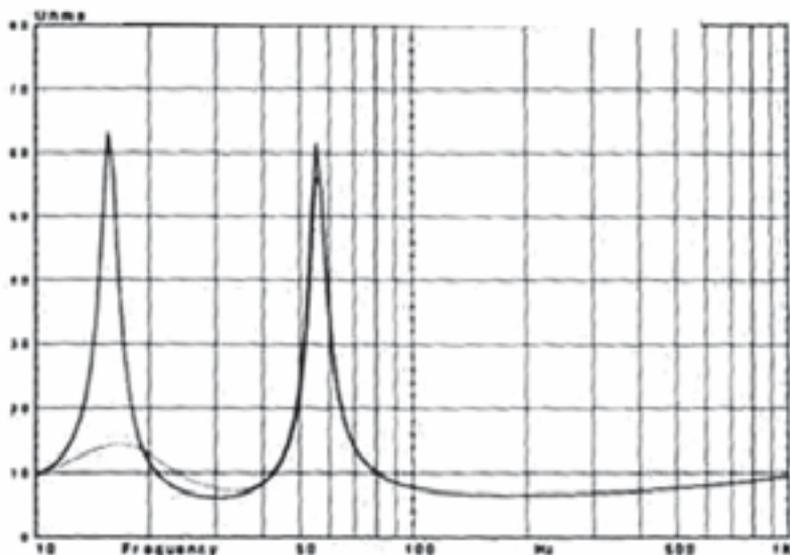
Для данного примера при диаметре громкоговорителя 17 см диаметр фазоинвертора $d = 5$ см. Из полученных данных можно определить требуемую длину трубы фазоинвертора L_{VE} (в тех случаях, когда она оказывается необходима) по формуле:

$$f_{в} = \frac{c}{2\pi} \sqrt{\frac{S_{\Phi И}}{L_{VE} V_{AC}}},$$

где $S_{\Phi И}$ — площадь фазоинвертора, V_{AC} — объем акустической системы.

Форма частотной зависимости импедансной кривой для системы с фазоинвертором имеет вид, показанный на рис. 11. Следует обратить внимание, что частота настройки фазоинвертора соответствует минимуму этой кривой (и практически близка к резонансной частоте громкоговорителя без оформления). Положение двух пиков на импедансной кривой зависит от величины потерь в корпусе и громкоговорителе и является следствием того, что эквивалентная схема представляет собой соединение двух связанных контуров (не следует считать первый пик резонансом громкоговорителя, а второй —

фазоинвертора, это довольно распространенная ошибка).



Приведенный расчет является некоторым упрощенным вариантом, полный расчет параметров акустической системы для низкочастотных оформлений с фазиинвертором определяется по методикам и программам, изложенным в литературе. Аналогичные методики расчета с помощью построения эквивалентных электрических схем и соответствующих компьютерных программ разработаны практически для всех используемых в настоящее время видов оформлений: с пассивным излучателем, с оформлением типа "полосовой" фильтр и др.

В заключение следует еще раз подчеркнуть, что все вышеизложенные методы расчета параметров акустических систем пригодны только в области низких частот, где акустические системы и громкоговорители можно рассматривать как системы с сосредоточенными параметрами. В области средних и высоких частот, где колебания в диафрагмах громкоговорителей и корпусах уже не

могут описываться приближенными методами, используются точные численные методы компьютерного расчета (МКЭ, МГЭ и др.) для описания сложных колебательных процессов в акустических системах и громкоговорителях как системах с распределенными параметрами.

Часть 6. Разделительные фильтры в акустических системах.

Практически все современные высококачественные акустические системы являются многополосными, то есть состоящими из нескольких громкоговорителей, каждый из которых работает в своем диапазоне частот. Это обусловлено тем, что практически невозможно создать динамический громкоговоритель, который обеспечивал бы излучение в широком диапазоне частот с малым уровнем искажений (в первую очередь, интермодуляционных, а также переходных, нелинейных и др.) и широкой характеристикой направленности. Поэтому в акустических системах (как профессиональных, так и бытовых) используют несколько громкоговорителей (низкочастотные, среднечастотные, высокочастотные, иногда супервысокочастотные), а для распределения энергии звукового сигнала между ними включают электрические разделительные фильтры. Влияние разделительных фильтров на формирование характеристик акустических систем в предыдущие годы недооценивалось: им

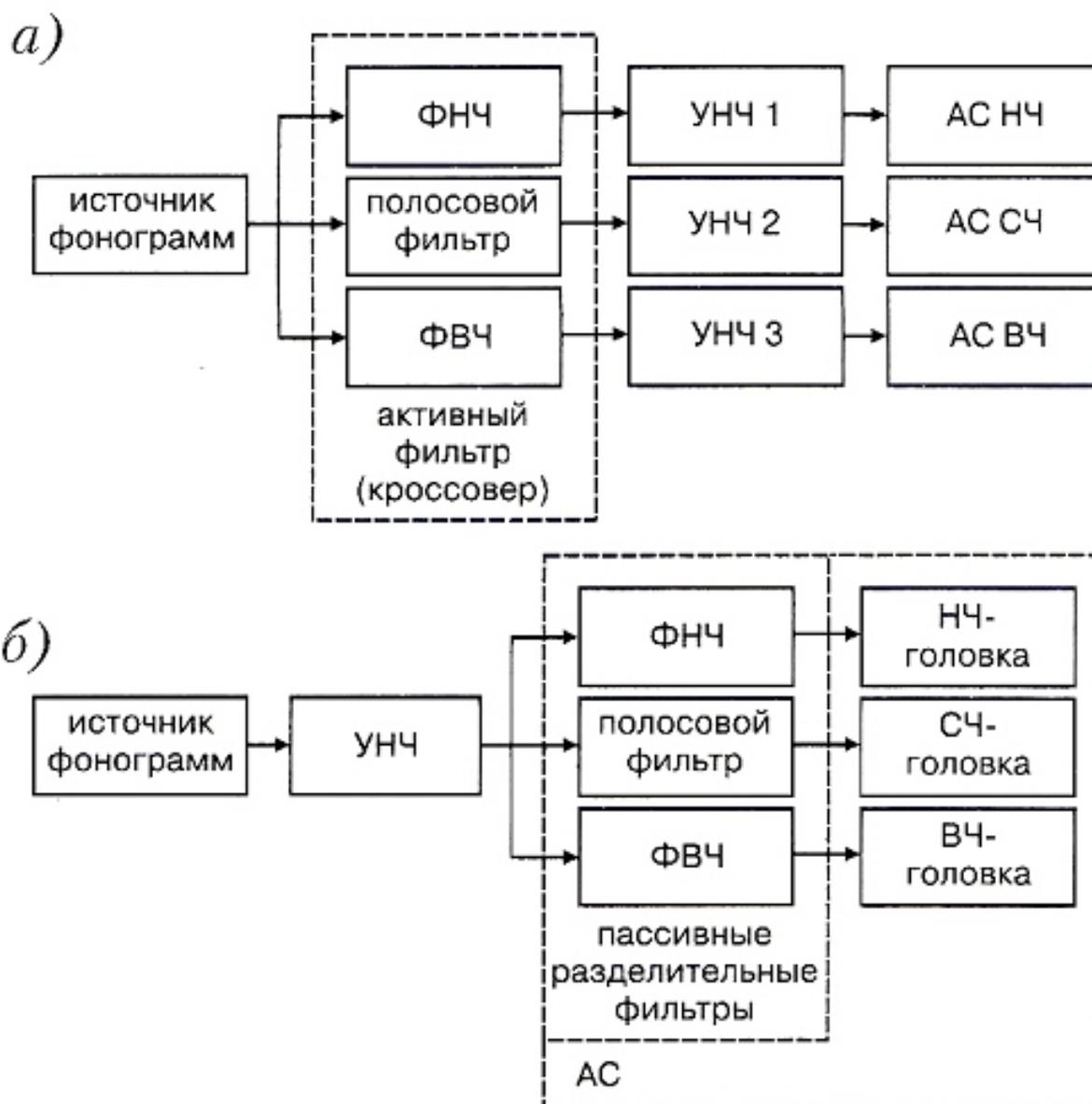
отводилась лишь роль ослабления сигнала за пределами рабочей полосы частот громкоговорителей. Однако развитие техники акустических систем категории Hi-Fi заставило пересмотреть взгляд на роль разделительных фильтров в акустических системах и на методику их проектирования. Многочисленные теоретические и экспериментальные работы, посвященные влиянию разделительных фильтров на коррекцию характеристик излучателей и формирование объективных и субъективных характеристик акустических систем, заставили считать разделительные фильтры одним из важнейших компонентов акустических систем, с помощью которого можно синтезировать многие необходимые электроакустические характеристики и добиться значительного прогресса в обеспечении естественности звучания.

Прежде чем переходить к анализу различных типов фильтров, применяемых в акустических системах, и методам их расчета, остановимся на определении основных параметров фильтров.

Параметры фильтров

Фильтром называется устройство, пропускающее определенные спектральные составляющие в сигнале и не пропускающее (ослабляющее) остальные. Фильтр может быть реализован в виде аналоговой схемы (пассивные и активные фильтры), а также реализован программно или в виде цифрового устройства (цифровые фильтры). В современных акустических системах применяются как пассивные, так и активные

фильтры (кроссоверы). Первые включаются после общего усилителя в каждом канале, вторые включаются до усилителя. Общая схема включения показана на рис.1. Активные фильтры имеют ряд преимуществ перед пассивными фильтрами, поскольку их значительно легче перестраивать, можно реализовать различными способами, в них отсутствуют потери мощности и т. д. Однако активные фильтры проигрывают пассивным по таким параметрам, как динамический диапазон, нелинейные искажения, уровень шумов и др. Методы проектирования активных фильтров широко освещены в специальной литературе, поэтому здесь остановимся только на методах проектирования пассивных фильтров, которые широко используются в современных акустических системах.



Основными параметрами, определяющими свойства фильтров, являются:

- *полоса пропускания* — область частот, в которой фильтры пропускают сигнал;
- *полоса задерживания* — область частот, где фильтры существенно подавляют сигнал;
- *частота среза $f_{ср}$* — частота, на которой сигнал ослабляется на 3 дБ по отношению к среднему уровню в полосе пропускания.

По характеру расположения полосы пропускания и полосы задерживания фильтры разделяются на четыре основных типа.

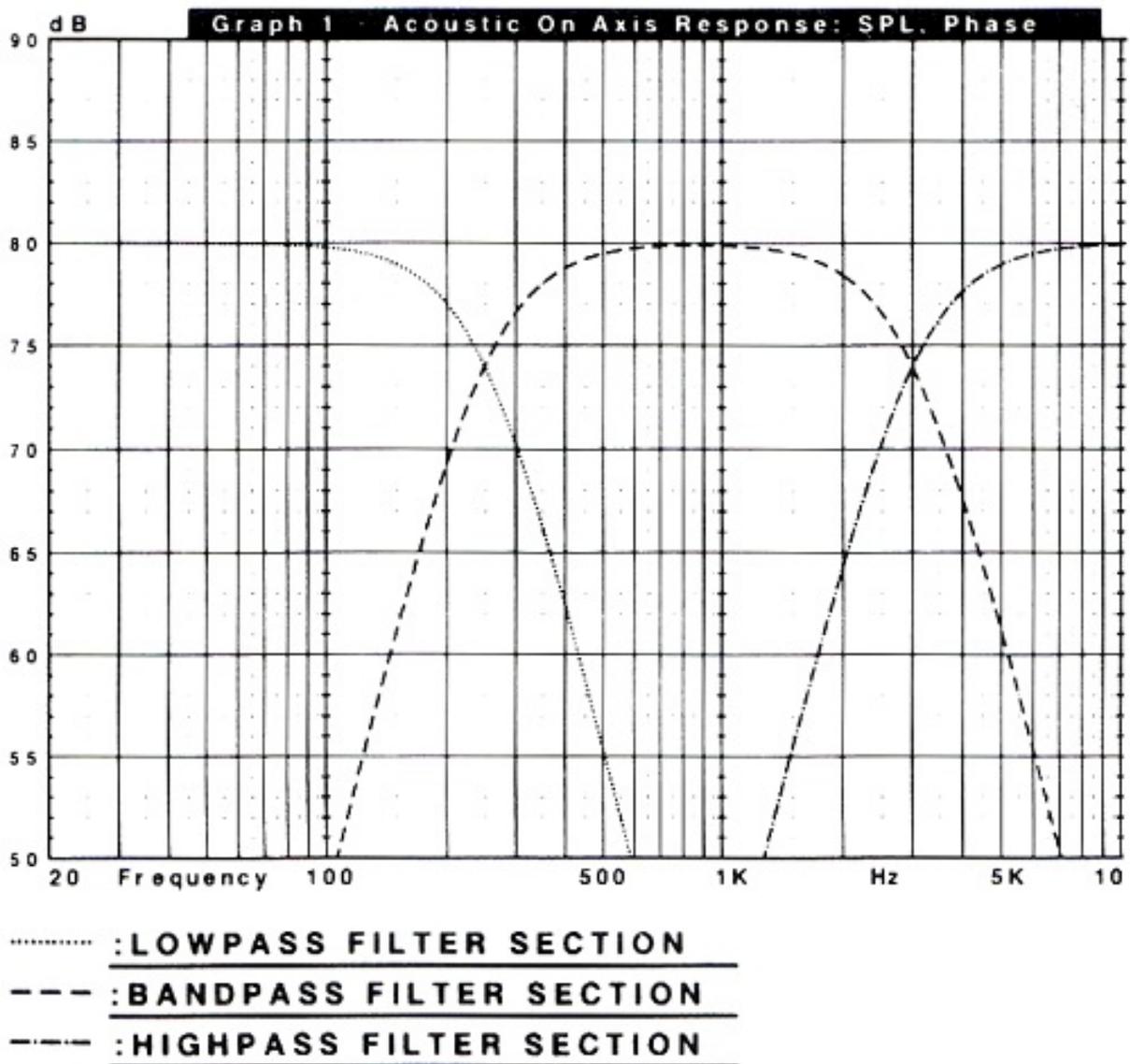
Фильтры нижних частот (ФНЧ) пропускают низкочастотные составляющие в спектре сигнала (от нуля до частоты среза) и подавляют высокочастотные. Используются для низкочастотных громкоговорителей. Форма частотной характеристики показана на рис. 2.

Фильтры высоких частот (ФВЧ) пропускают высокочастотные составляющие (от частоты среза и выше) и подавляют низкочастотные.

Применяются для высокочастотных громкоговорителей. Форма АЧХ показана на рис. 2.

Полосовые фильтры (ПФ) пропускают определенные полосы частот (от $f_{ср1}$ до $f_{ср2}$) и подавляют нижние и верхние частоты.

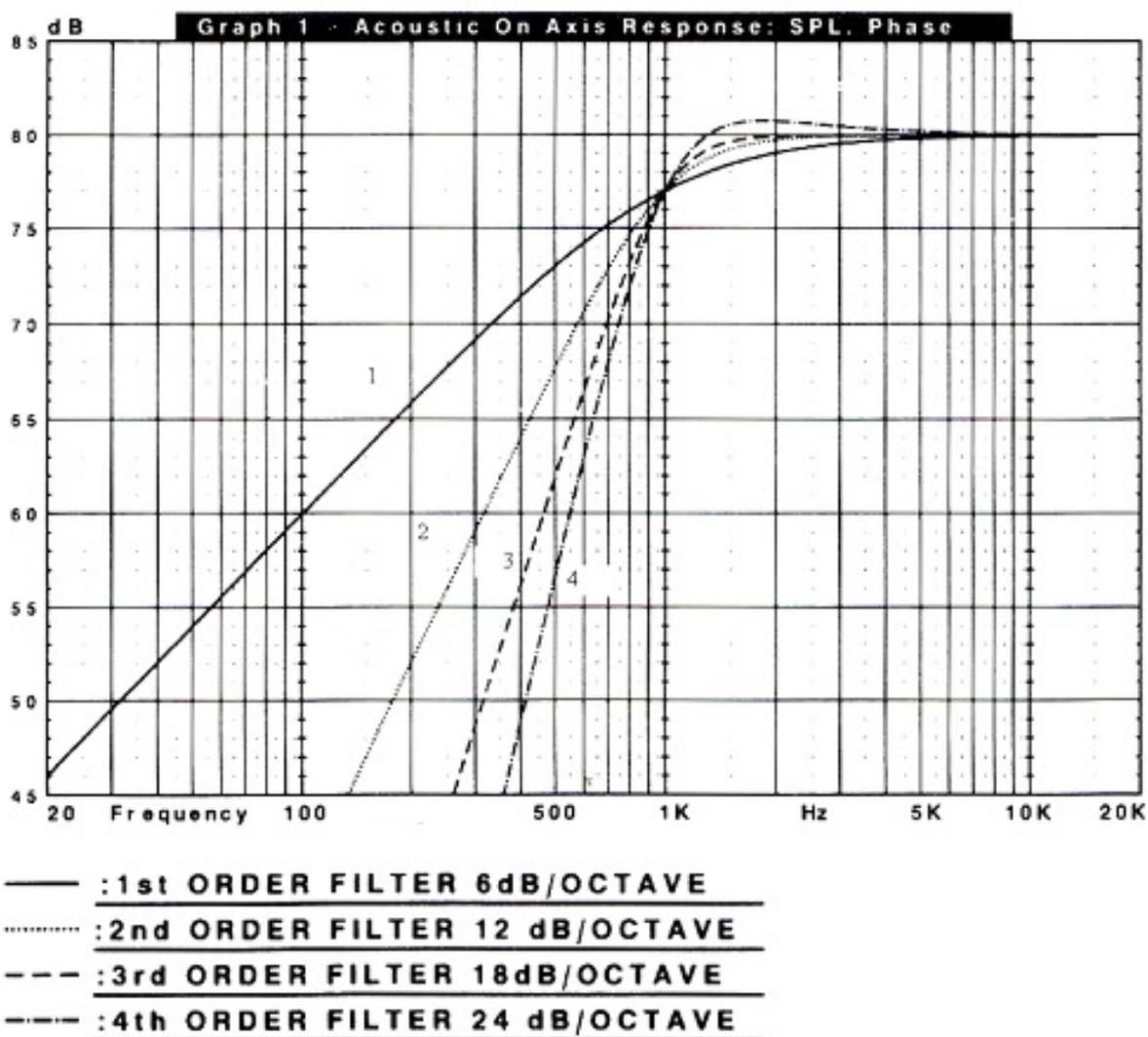
Применяются для среднечастотных громкоговорителей, рис. 2.



Существуют также *режекторные* фильтры, которые представляют собой комбинацию низкочастотного и высокочастотного фильтров. Они подавляют спектральные составляющие сигнала в определенной полосе частот и пропускают в других полосах. Применяются иногда в акустических системах для вырезания отдельных пиков и провалов на АЧХ.

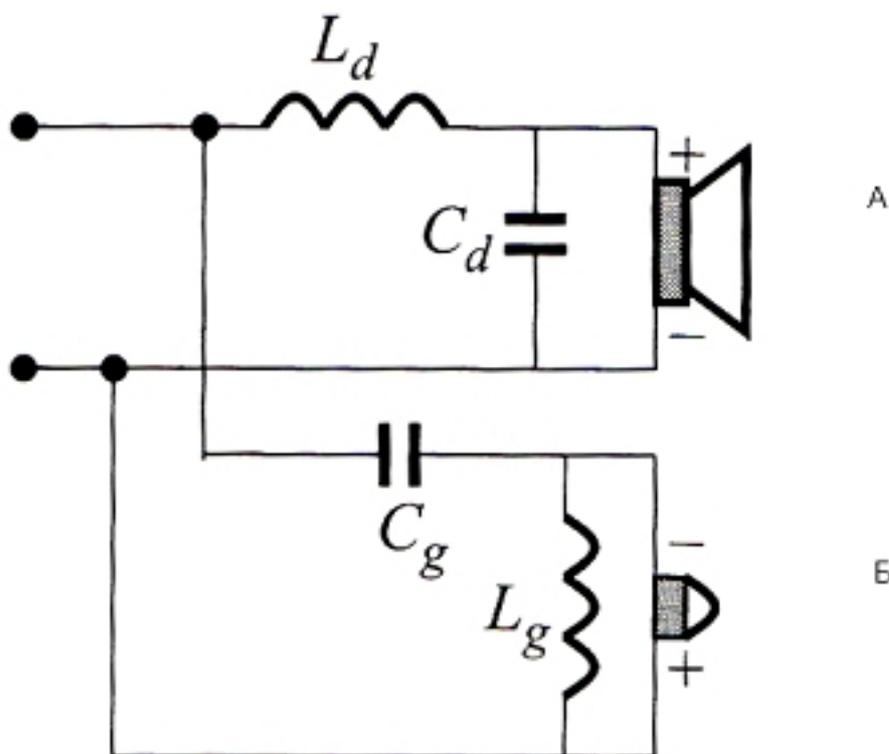
Кроме того, каждый из перечисленных фильтров характеризуется следующими параметрами: крутизной спада АЧХ при переходе от полосы пропускания к полосе задерживания,

неравномерностью в полосе пропускания и задерживания, резонансной частотой и добротностью (Q). В зависимости от структуры фильтра и количества элементов в нем может быть обеспечена разная крутизна спада АЧХ. Обычно в акустических системах используются фильтры с крутизной спада 12 дБ/окт, 18 дБ/окт и 24 дБ/окт (рис. 3), которые, соответственно, называются фильтрами второго, третьего и четвертого порядков.



Простейшая структура LC-фильтра низких частот второго порядка показана на рис. 4. Она включает в себя следующие элементы: индуктивность L, реактивное сопротивление которой прямо

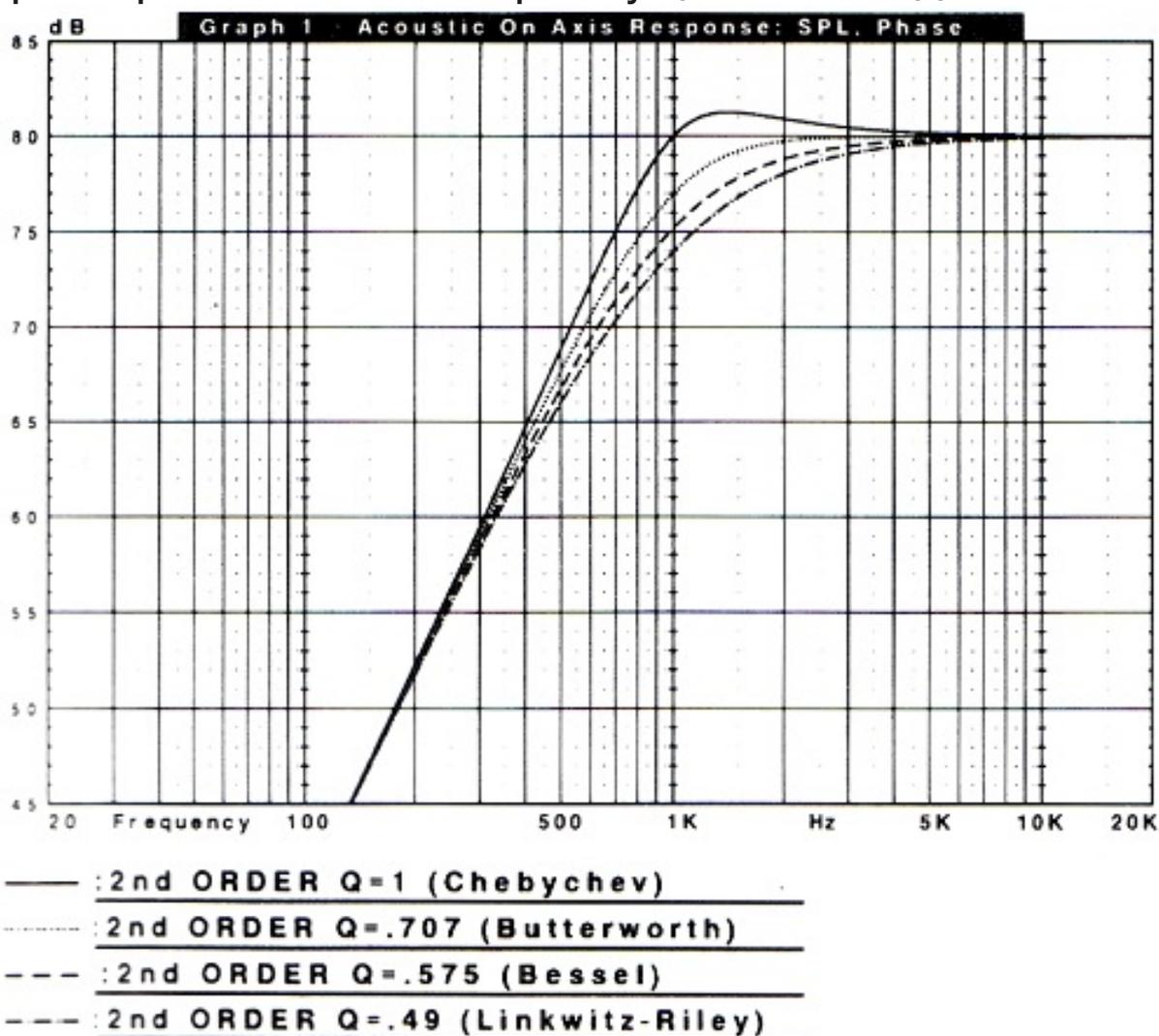
пропорционально частоте ($X_L = 2\pi fL$), и емкость C , реактивное сопротивление которой обратно пропорционально частоте ($X_C = 1/2\pi fC$). Поэтому представленная на рис. 4а цепь пропускает низкие частоты (поскольку сопротивление индуктивности L мало на низких частотах) и обеспечивает затухание высоких частот. Фильтр высоких частот имеет обратную структуру (рис. 4б) и, соответственно, пропускает высокие частоты и задерживает низкие.



Вид АЧХ фильтров высоких частот второго порядка при разных значениях добротности показан на рис. 5. Резонансная частота такого фильтра определяется как $f=1/(LC)^{1/2}$, а добротность как $Q = [(R^2C)/L]^{1/2}$.

Из рис. 5 видно, что изменения значения добротности меняет характер спада АЧХ от гладкого (при $Q = 0.707$) до спада с подъемом на частоте резонанса ($Q = 1$).

По имени ученых, которые математически описали передаточные функции фильтров (то есть их формы частотных характеристик), они получили разное название: фильтры с добротностью $Q = 1$ называются фильтрами Чебышева, $Q = 0.707$ — Баттерворта, $Q = 0.58$ — Бесселя, $Q = 0.49$ — Линквица-Риле. Каждый из указанных типов фильтров имеет свои преимущества и недостатки.



В акустических системах проблема выбора фильтров усложняется тем, что необходимо выбрать три или два (в зависимости от количества полос) типа фильтров одинаковых или разных порядков, которые совместно с громкоговорителями обеспечивали бы суммарные

характеристики акустической системы (такие как амплитудно-частотная характеристика — АЧХ, фазочастотная характеристика — ФЧХ, групповое время задерживания — ГВЗ, и др.) с требуемыми параметрами внутри эффективно-воспроизводимого диапазона частот.

История создания фильтров

История создания разделительных фильтров начинается одновременно с появлением многополосных акустических систем. Одну из первых теорий разработали в 30-е годы инженеры G. A. Campbell и O. J. Zobel из фирмы Bell Labs (США). Первые публикации относятся к этому же периоду, их авторы K. Hilliard и H. Kimball работали в звуковом отделе фирмы Metro Goldwin Meyer. В 1936 году в мартовском номере Academy Research Council Technical Bulletin была опубликована их статья "Разделительные фильтры для громкоговорителей". В январе 1941 года K. Hilliard в журнале Electronics Magazine также опубликовал работу "Разделительные фильтры громкоговорителей", содержащую все необходимые формулы для создания цепей Баттерворта первого и третьего порядков (как для параллельных, так и для последовательных схем). К 50-м годам фильтры Баттерворта были признаны предпочтительными для разделительных цепей акустических систем. Тогда же в 60-х J. R. Ashley и R. Small впервые описали свойства "всепропускающих" фильтрующих схем, а также линейно-фазовых цепей.

Выяснению количественного соотношения затухания, вносимого фильтрами вне полосы пропускания, и величины интермодуляционных искажений вследствие перекрывания полос акустических систем, была посвящена статья "Фильтрующие цепи и модуляционные искажения" (автор R. Small), опубликованная в JAES в 1971 году. В ней было показано, что минимальная величина затухания должна быть 12 дБ/окт, чтобы предотвратить искажения в полосе перекрытия. Тогда же Ashley и L. M. Henne исследовали "всепропускающие" и "фазокогерентные" свойства фильтров Баттерворта третьего порядка. В 1976 году S. Linkwitz исследовал полярную диаграмму направленности для двухполосных систем с разнесенными излучателями и убедился, что акустические системы с разделительными фильтрами Линквитца-Риле обеспечивают ее симметричность. Чуть позднее P. Garde дал полное описание всепропускающих фильтров и их разновидностей. Используя его идеи, D. Fink в соавторстве с E. Long разработал метод коррекции горизонтального (то есть глубинного) смещения головок громкоговорителей в акустических системах путем введения линий задержки в фильтр. Существенный вклад в теорию фильтрации внесли W. Marshall-Leach и R. Bullock, которые впервые ввели понятие оптимизации фильтров по типу и порядку с учетом смещения головок по двум осям. В продолжение этих работ R. Bullock описал свойства трехполосных симметричных фильтров и доказал, что

трехполосная система фильтров не может быть получена как простая комбинация двухполосных, вопреки бытовавшему мнению. S. Lipshitz и J. Vanderkooy в серии статей рассмотрели различные варианты построения фильтров с минимально фазовыми характеристиками.

Новый этап в исследовании и проектировании многополосных акустических систем с разделительными фильтрами наступил с началом активной компьютеризации расчетов на основе программ ХОПТ, САСД, CALSOB, Filter Designer, LEAP 4.0 и др.

До недавнего времени конструирование разделительных фильтров в акустических системах шло практически методом "проб и ошибок". Это объясняется тем, что все теоретические работы прошлых лет, посвященные расчету разделительных фильтров в акустических системах, исходили из условия идеальности самих громкоговорителей. При анализе свойств разделительных фильтров того или иного типа и рассмотрении их влияния на характеристики акустических систем пренебрегали направленными свойствами громкоговорителей и условиями их физического размещения в корпусе акустической системы. Считали, что громкоговорители обладают плоской АЧХ, не вносят фазовых сдвигов в воспроизводимый сигнал и имеют активное входное сопротивление. Вследствие сказанного разработчики часто сталкивались с тем, что разделительные фильтры, обеспечивающие в идеализированных условиях требуемые

характеристики, оказывались неприемлемыми при работе с реальными громкоговорителями, имеющими собственные амплитудно-частотные и фазочастотные искажения, комплексное входное сопротивление и обладающими направленными свойствами. Это и явилось причиной интенсификации в последние годы работ по созданию оптимизационных методов расчета разделительных фильтров-корректоров.

Выбор частот разделения

Как уже было отмечено, разделительные фильтры оказывают существенное влияние на такие характеристики многополосных акустических систем, как АЧХ, ФЧХ, ГВЗ, характеристики направленности, распределение мощности входного сигнала между излучателями, входное сопротивление акустической системы, уровень нелинейных искажений.

Начальным этапом в проектировании разделительных фильтров в многополосных акустических системах является обоснованный *выбор частот разделения (частот среза)* низкочастотного, средне-частотного и высокочастотного каналов. При выборе частот разделения обычно используют следующие предпосылки.

1. Обеспечение возможно более равномерных характеристик направленности, то есть отсутствия "скачков" ширины диаграммы направленности при переходе от низкочастотного к среднечастотному и от средне- к высокочастотному громкоговорителю, поскольку в той области частот, где они работают

вместе, при отсутствии фильтра, диаграмма направленности резко сужается за счет расширения площади излучения.

2. Сохранение плавного изменения ширины характеристики направленности (по той же причине). Громкоговорители стараются размещать как можно ближе друг к другу и располагать их друг над другом в вертикальной плоскости (что позволяет избежать искажений характеристики направленности в горизонтальной плоскости, так как это отрицательно сказывается на воспроизведении стереопанорамы). Если выбор частоты разделения и расстояния между громкоговорителями влияет на ширину характеристики направленности, то соотношение фаз и амплитуд сигналов разделяемых частотных каналов влияет на ориентацию характеристики направленности в пространстве. Различные типы фильтров, как будет показано далее, в разной степени влияют на наклон характеристики направленности в пространстве в области частот разделения.

3. Ослабление пиков и провалов на АЧХ громкоговорителей, возникающих из-за потери поршневого характера движения диффузора. Выбор частоты среза и крутизны спада АЧХ фильтров для низкочастотных и среднечастотных громкоговорителей стараются осуществлять таким образом, чтобы первые резонансные пики и провалы ослаблялись не менее, чем на 20 дБ.

4. Ограничение амплитуды смещения подвижных систем средне- и высокочастотных

громкоговорителей в низкочастотной части излучаемого ими спектра (и, соответственно, подводимой мощности) до значений, определяемых их механической и тепловой прочностью, что повышает надежность их работы и снижает уровень нелинейных искажений. Эти задачи регулируются как выбором частоты среза, так и выбором крутизны среза, которая должна составлять не менее 12 дБ/окт.

5. Обеспечение требуемого уровня звукового давления, поскольку с повышением частоты среза в области высоких частот можно увеличить уровень подаваемого напряжения, например, на высокочастотный громкоговоритель (поскольку амплитуды смещения диффузора с повышением частоты понижаются). Это позволяет увеличить, соответственно, уровень звукового давления в высокочастотной части АЧХ.

6. Снижение уровня нелинейных искажений, в частности, за счет эффекта Доплера (возникающих при модуляции высокочастотных составляющих низкочастотными компонентами сигнала).

Как правило, частоты среза в современных трехполосных акустических системах находятся в пределах: для низкочастотного громкоговорителя — 500...1000 Гц, для среднечастотного — от 500...1000 Гц до 5000...7000 Гц, для высокочастотного — 2000...5000 Гц.

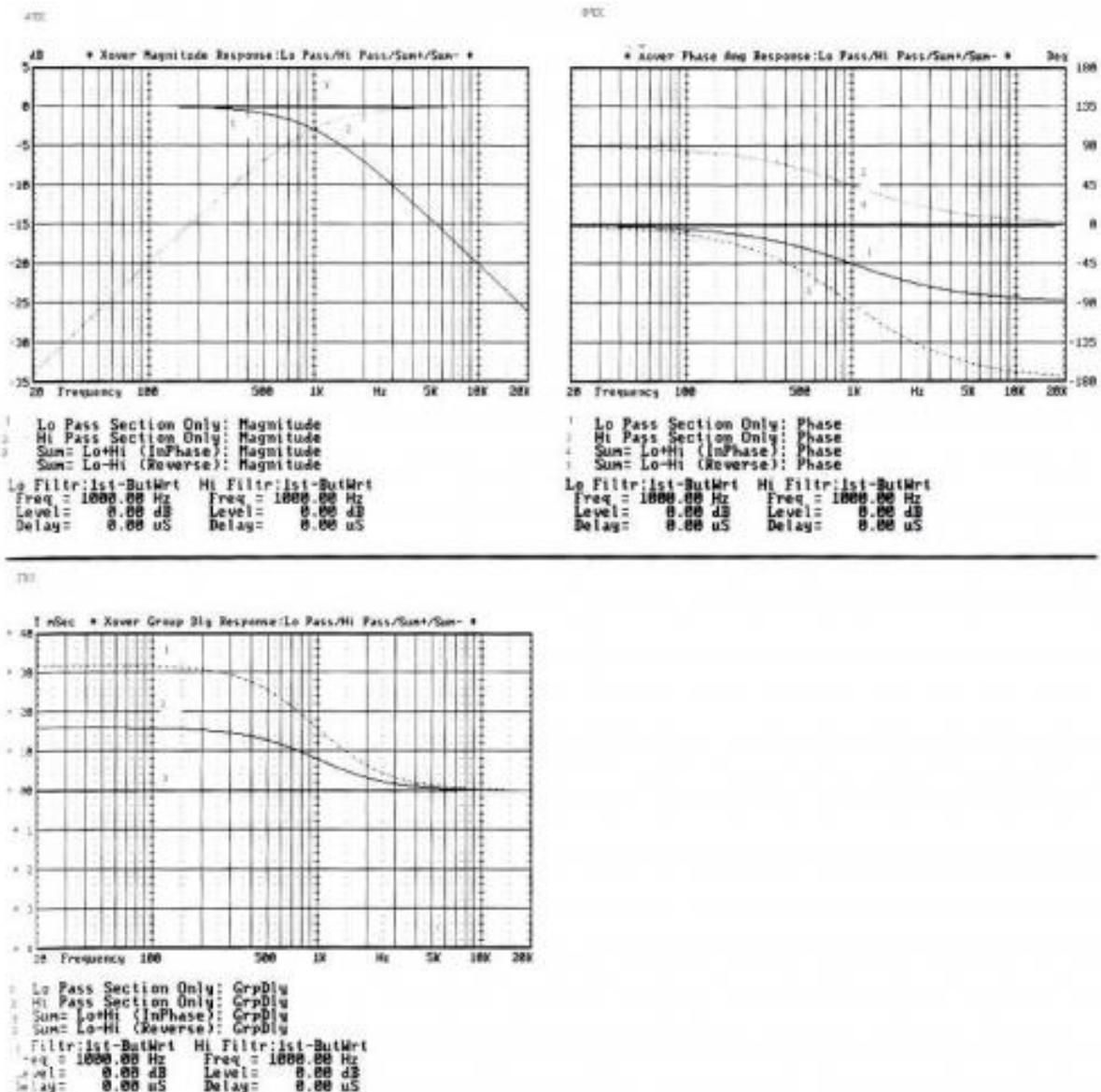
Влияние на суммарные характеристики

Анализ влияния разделительных фильтров на формирование суммарных АЧХ, ФЧХ и других характеристик акустических систем удобно

производить на некоторой идеализированной модели, в которой предполагается, что громкоговорители имеют активное сопротивление и идеальные характеристики (плоская АЧХ, линейная ФЧХ, постоянный сдвиг фаз между излучателями и др.). При расчете фильтров необходимо предварительно выбрать частоту среза (как уже было показано ранее), порядок и тип фильтра (Баттерфорта, Чебышева, Линквитца-Риле или др.).

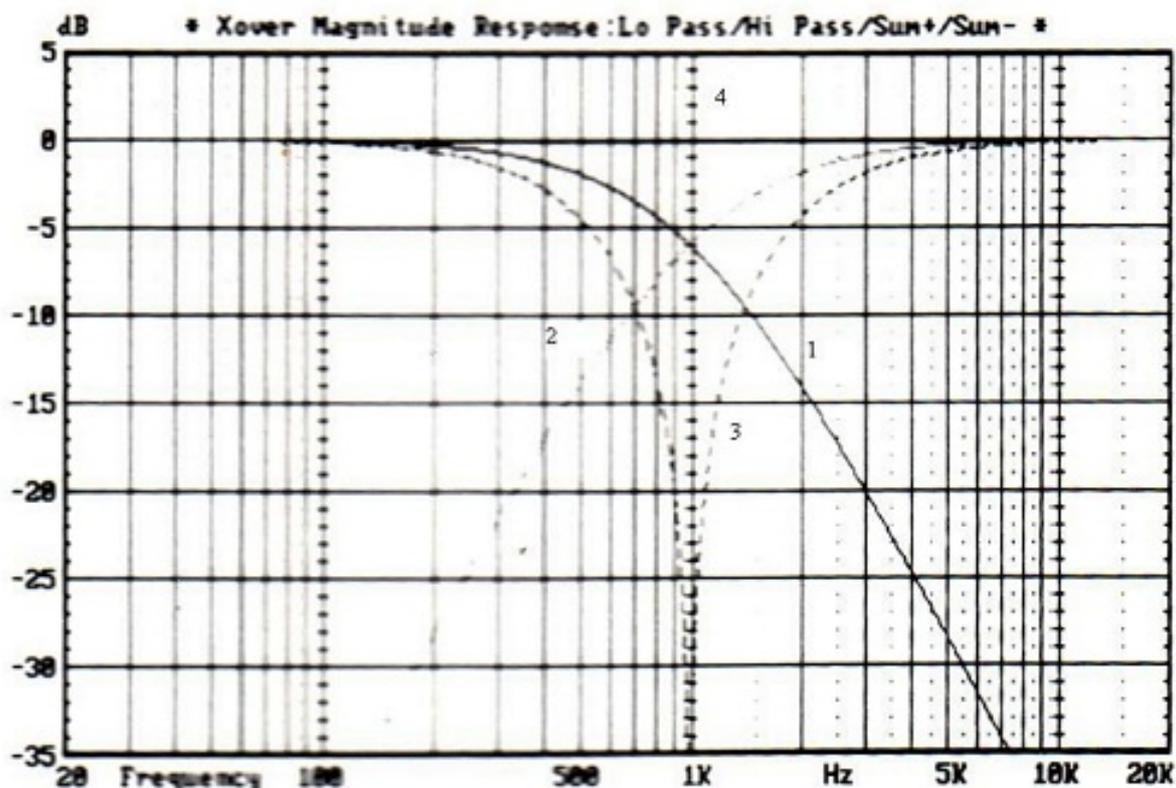
По получаемым суммарным характеристикам фильтры, обычно применяемые в акустических системах, можно разделить на три группы: фильтры линейно-фазовые (*in-phase*), фильтры всепропускающие- (*all-pass*) и все остальные.

Фильтры линейно-фазовые (in-phase) обеспечивают частотно-независимую суммарную АЧХ, линейную ФЧХ (точнее, равную нулю на всех частотах), а также равную нулю ГВЗ. Примером могут служить фильтры Баттерворта первого порядка. Суммарные характеристики для двухполосной системы с такими фильтрами показаны на рис. 6. Опыт их использования в акустических системах показал, что они обладают рядом недостатков: плохой избирательной способностью, большой неравномерностью характеристик мощности сигнала, плохой характеристикой направленности в полосе раздела и др. Поэтому в настоящее время они в акустических системах категории Hi-Fi не применяются.



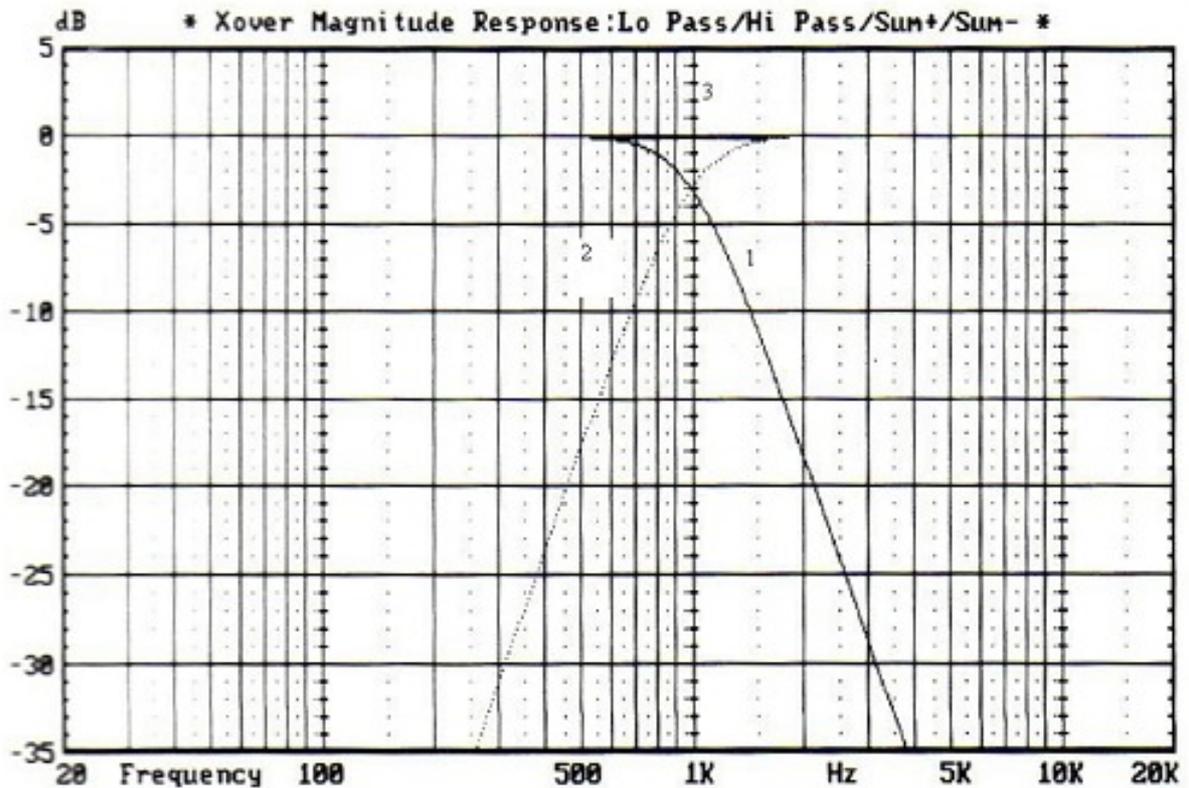
Фильтры всепропускающие (*all-pass*) обеспечивают плоскую суммарную АЧХ, частотно-зависимые ФЧХ и ГВЗ. Требования к линейности ФЧХ является избыточным для акустических систем — достаточно, чтобы их ГВЗ были ниже порогов слышимости (как показывают результаты измерений, фильтры такого типа вносят искажения ГВЗ в полосу раздела, удовлетворяющие этим требованиям). К этому типу фильтров относятся фильтры Баттерворта нечетких порядков и фильтры Линквица-Риле четных порядков. При этом свойства фильтров реализуются при разной

полярности включения каналов: для 2, 6, 10 порядков требуется включение каналов в противофазе, для 4, 8, 12 — нет. Для нечетных порядков: 1, 5, 9 должны включаться синфазно, 3, 7... — противофазно. Суммарные и поканальные характеристики фильтров Линквица-Риле второго порядка и Баттерворта третьего порядка для двухканальной идеализированной акустической системы показаны на рис. 7 и рис. 8. Следует отметить (будет показано далее), что фильтры нечетных порядков создают поворот главного лепестка характеристики направленности в области частоты раздела.



1 Lo Pass Section Only: Magnitude
 2 Hi Pass Section Only: Magnitude
 3 Sum= Lo+Hi (InPhase): Magnitude
 4 Sum= Lo-Hi (Reverse): Magnitude

Lo Filtr: 2nd-LnkRly Hi Filtr: 2nd-LnkRly
 Freq = 1000.00 Hz Freq = 1000.00 Hz
 Level = 0.00 dB Level = 0.00 dB
 Delay = 0.00 uS Delay = 0.00 uS



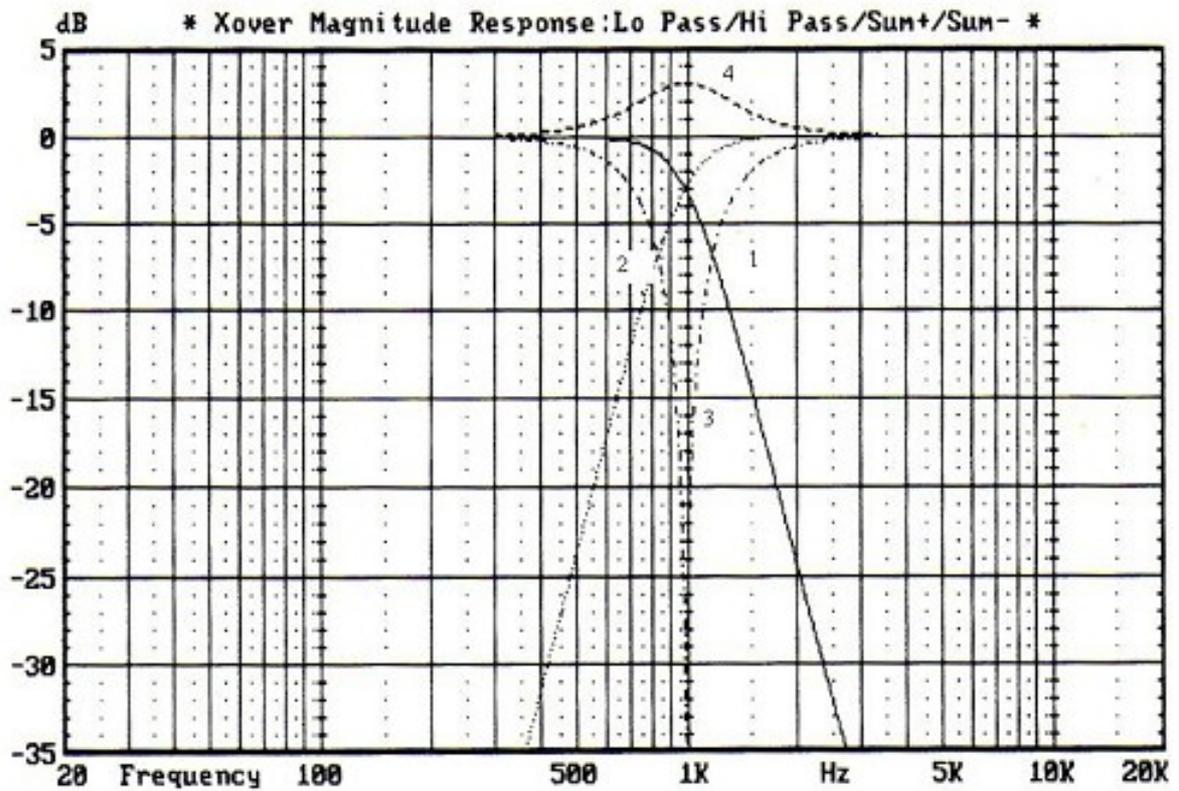
```

1  Lo Pass Section Only: Magnitude
2  Hi Pass Section Only: Magnitude
3  Sum= Lo+Hi (InPhase): Magnitude
3  Sum= Lo-Hi (Reverse): Magnitude
Lo Filtr:3rd-ButWrt  Hi Filtr:3rd-ButWrt
Freq = 1000.00 Hz    Freq = 1000.00 Hz
Level = 0.00 dB      Level = 0.00 dB
Delay = 0.00 uS      Delay = 0.00 uS

```

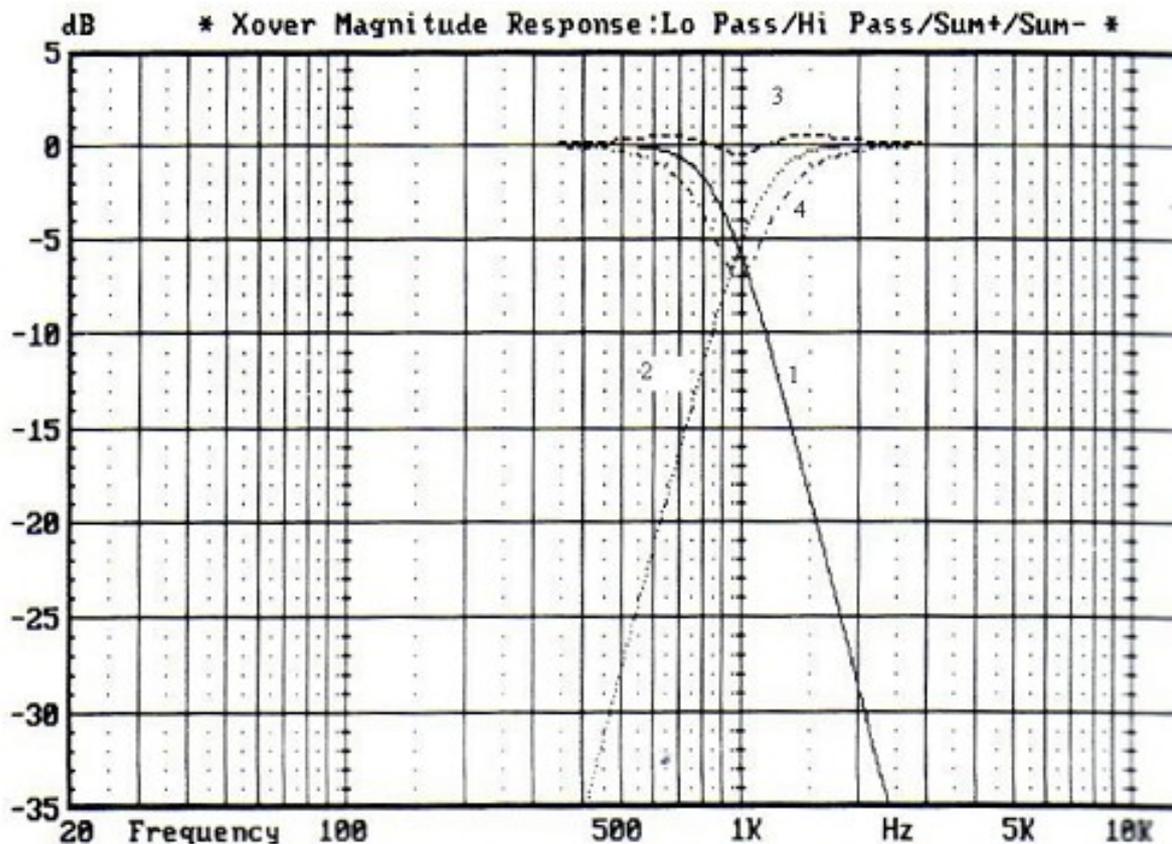
Существует довольно большой класс фильтров, которые применяются в акустических системах, но они не относятся к "всепропускающему" типу. Сюда включаются фильтры второго и четвертого порядка Баттерворта, второго и четвертого порядка Бесселя, группа ассиметричных фильтров четвертого порядка Лежандра, Гаусса и др. Они не дают суммарную плоскую характеристику, но этот недостаток можно частично исправить, если сделать частоты среза между громкоговорителями несовпадающими. Например, на рис. 9а показаны характеристики фильтра Баттерворта четвертого порядка с пиком АЧХ в 3 дБ на частоте раздела,

равной 1000 Гц. Если несколько разнести частоты, то есть сделать частоту раздела для НЧ 885 Гц, а для ВЧ 1138 Гц, то пик на АЧХ исчезает (рис. 96).



1 — Lo Pass Section Only: Magnitude
 2 ---- Hi Pass Section Only: Magnitude
 3 -.- Sum= Lo+Hi (InPhase): Magnitude
 4 Sum= Lo-Hi (Reverse): Magnitude

Lo Filtr:4th-ButWrt	Hi Filtr:4th-ButWrt
Freq = 1000.00 Hz	Freq = 1000.00 Hz
Level = 0.00 dB	Level = 0.00 dB
Delay = 0.00 uS	Delay = 0.00 uS

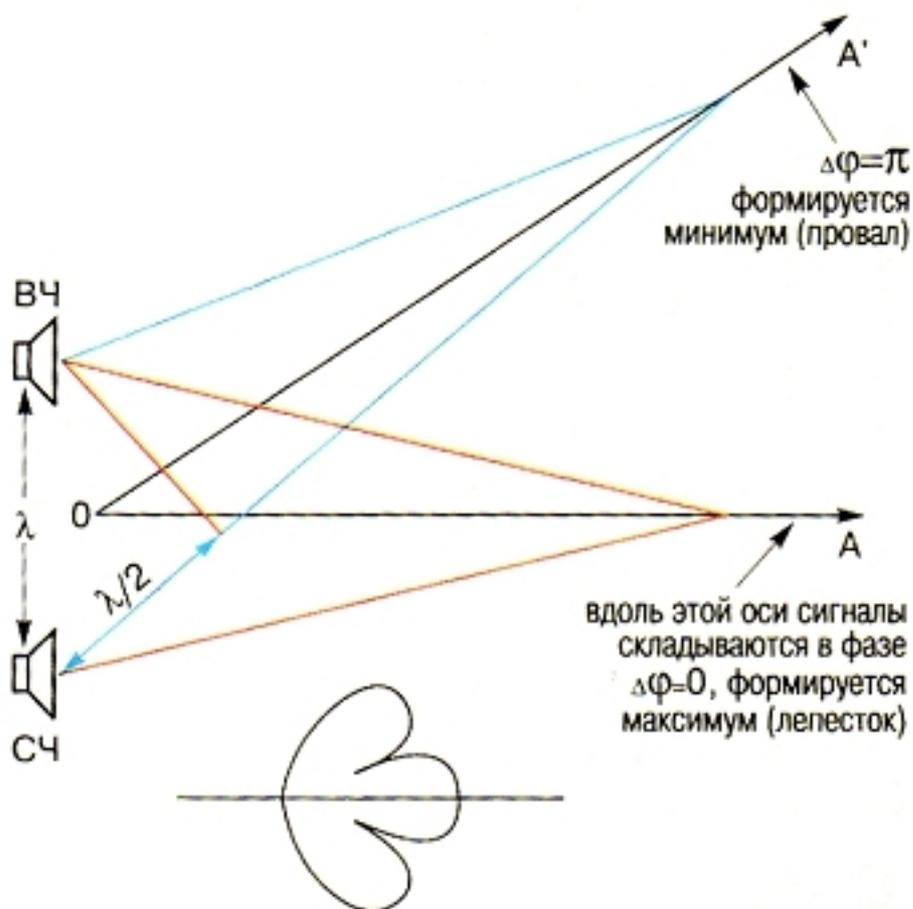


- 1 — Lo Pass Section Only: Magnitude
 - 2 Hi Pass Section Only: Magnitude
 - 3 -- Sum= Lo+Hi (InPhase): Magnitude
 - 4 -·- Sum= Lo-Hi (Reverse): Magnitude
- Lo Filtr:4th-ButWrt Hi Filtr:4th-ButWrt
 Freq = 885.00 Hz Freq = 1130.00 Hz
 Level= 0.00 dB Level= 0.00 dB
 Delay= 0.00 uS Delay= 0.00 uS

Как уже было сказано, выбор типов фильтров для низко-, средне- и высокочастотного громкоговорителя кроме обеспечения плоской АЧХ в полосах раздела, определяется требованием к обеспечению **симметричности характеристики направленности** акустической системы.

Внутри полосы пропускания каждого фильтра характеристика направленности акустической системы определяется характеристикой направленности каждого громкоговорителя, но внутри полосы раздела (полосы перекрытия фильтров) они работают совместно, то есть

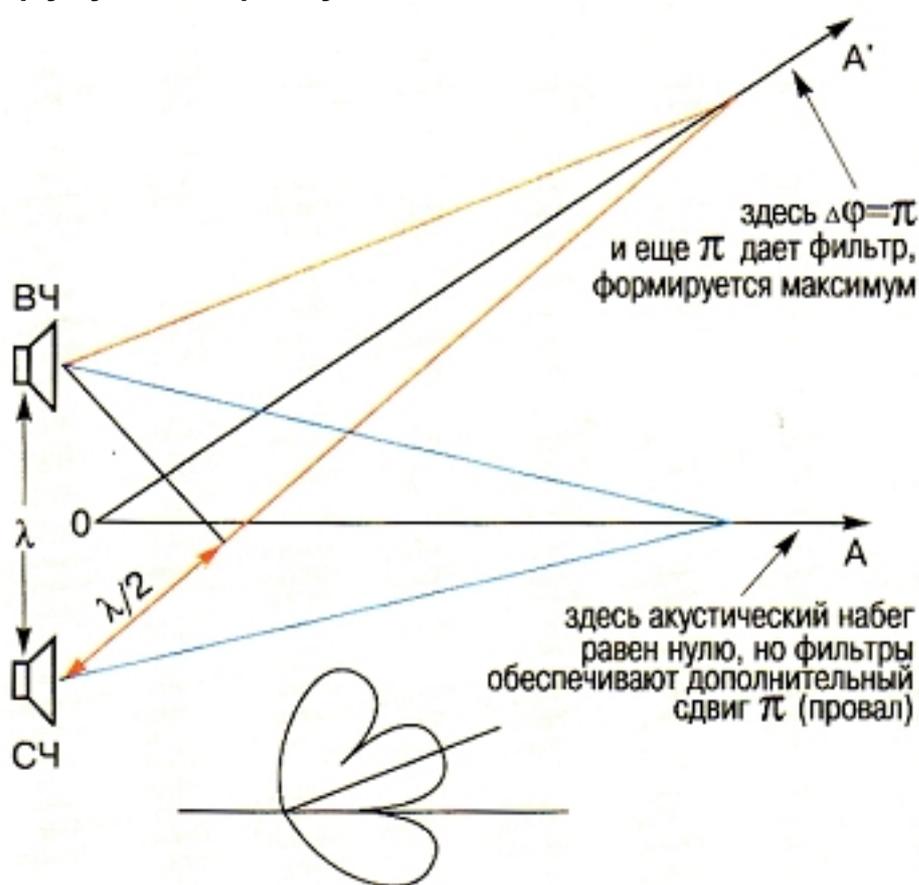
имеются два излучателя (например, средне и высокочастотный), которые разнесены в пространстве и работают на одной и той же частоте раздела. Пример такой системы показан на рис. 10. Пусть для простоты это будут два одинаковых излучателя, работающих в поршневом режиме с одинаковыми характеристиками направленности. На оси ОА сигналы приходят в одинаковой фазе и складываются. Если оценить звуковое давление на оси ОА', где фазовый сдвиг за счет разности пути от одного и другого громкоговорителя составит $\phi = \pi$ (то есть 180 град), то сигналы будут складываться в противофазе и на характеристике направленности появится провал. При дальнейшем сдвиге от оси в точках, где разница фаз составит 2π (то есть 360 град), опять появится пик. В целом характеристика направленности будет иметь трехлепестковый характер (рис. 10).



Ширина главного лепестка характеристики направленности на частоте раздела зависит от отношения расстояния между громкоговорителями к длине волны, а наклон лепестка зависит от соотношения амплитуд и фаз разделяемых каналов, что определяется также и типом выбранных фильтров.

Для уменьшения этого явления надо стараться уменьшить расстояние между громкоговорителями (например, за счет применения коаксиальных громкоговорителей), уменьшить ширину полосы раздела (за счет выбора фильтров более высоких порядков) и, наконец, выбрать соответствующий тип фильтра, поскольку каждый фильтр вносит свои частотно-зависимые фазовые сдвиги.

Например, при использовании фильтров третьего порядка типа Баттерворта происходит поворот главного лепестка характеристики направленности вниз (при включении громкоговорителей в одинаковой фазе), рис. 11. При включении громкоговорителей в противофазе (то есть изменении их полярности) лепесток характеристики направленности смещается в другую сторону относительно оси.



Анализ фильтров различных типов и порядков показал, что фильтры четных порядков (всепропускающего типа) не изменяют симметричности направления лепестков, фильтры нечетных порядков поворачивают лепесток вниз или вверх. Симметричные характеристики направленности обеспечивают наибольшую

равномерность излучаемой акустической мощности.

Помимо влияния на характеристику направленности по АЧХ фильтры могут оказывать влияние на фазочастотные характеристики и ГВЗ в полосе раздела. То есть характер переходных процессов, несмотря на симметрию АЧХ, может отличаться при одинаковых углах смещения в верхней и нижней полуплоскости, и ГВЗ, будучи ниже порогов слышимости на оси, могут превосходить пороги слышимости в других точках пространства, тем самым ухудшая качество звучания.

Следует еще раз напомнить, что все сделанные выводы относятся только к случаю идеальных характеристик громкоговорителей. Учет реальных характеристик производится с помощью современных компьютерных программ.

Расчет пассивных акустических фильтров

Приступая к расчету пассивных акустических фильтров, необходимо уже четко определиться с конфигурацией системы (количеством полос воспроизведения, типами головок громкоговорителей и их параметрами, видом оформления — корпуса), а также выбрать порядок и тип фильтров в зависимости от основных задач, которые должны решаться при проектировании акустической системы: плоская АЧХ, линейная ФЧХ, симметричная характеристика направленности и др.

Поскольку в настоящее время в акустических системах чаще всего применяются фильтры типа

"всепропускающих" (all-pass) с плоской АЧХ, то приведем приближенный расчет такого типа фильтров (более точные расчеты выполняются компьютерными методами).

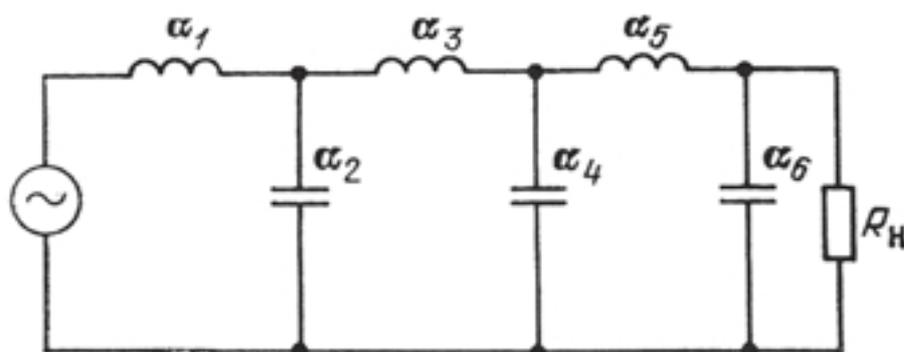
Сначала разделительные фильтры рассчитываются из условия, что они нагружены на чисто активное сопротивление и питаются от генератора напряжения с малым выходным сопротивлением. Затем принимаются меры для учета влияния комплексной частотно-зависимой нагрузки громкоговорителей.

Расчет начинается с определения порядка фильтров и расчета элементов фильтра-прототипа. Фильтром-прототипом называется фильтр лестничного типа, элементы которого нормированы относительно единичной частоты среза и единичной нагрузки. Затем рассчитывается фильтр нижних частот для реальной частоты среза и реальной нагрузки, а из него путем преобразования частоты находятся элементы фильтра верхних частот и полосового фильтра.

Нормированные значения элементов фильтров-прототипов с первого по шестой порядок приведены в таблице 1.

Значения нормированных параметров элементов — α						
Порядок фильтров	1	2	3	4	5	6
1	1,0	—	—	—	—	—
2	2,0	0,50	—	—	—	—
3	1,50	1,33333	0,50	—	—	—
4	1,88562	1,59099	0,94281	0,35355	—	—
5	1,54511	1,69440	1,38198	0,89443	0,30901	—
6	1,80	1,85185	1,47273	1,12037	0,72727	0,50

Значения этих элементов даны только для фильтров "все пропускающего" типа, для других типов фильтров значения элементов в таблице будут другими. Схема фильтра-прототипа шестого порядка представлена на рис. 12. Фильтры меньших порядков получаются путем отбрасывания соответствующих элементов α (начиная с больших).



Значения реальных параметров фильтров для заданного порядка, сопротивления нагрузки R_n (Ом) и частоты среза f_i (Гц) определяются следующим образом.

1. Для фильтра нижних частот:

- каждая индуктивность-прототип $\alpha_1, \alpha_3, \alpha_5$ (рис. 12) заменяется на реальную индуктивность по формуле $L = \alpha_i R_n / 2\pi f_1$, (1) где $i=1,3,5$, f_1 — частота среза фильтра нижних частот;

- каждая емкость-прототип $\alpha_2, \alpha_4, \alpha_6$ заменяется на реальную емкость по формуле $C = \alpha_i / 2\pi f_1 R_n$, (2) где $i=2,4,6$.

2. Для фильтра верхних частот (расчет происходит наоборот):

- каждая индуктивность-прототип $\alpha_1, \alpha_3, \alpha_5$ заменяется на реальную емкость $C = 1 / 2\pi f_2 R_n \alpha_i$, (3) где $i=1,3,5$, f_2 — частота среза фильтра верхних частот;

- каждая емкость-прототип заменяется на реальную индуктивность $L=R_n/2\pi f_0^2 \alpha_i$, (4) где $i=2,4,6$.

3. Для *полосового фильтра*:

- каждая индуктивность-прототип $\alpha_1, \alpha_3, \alpha_5$ заменяется на последовательный контур из реальных L- и C-элементов, рассчитываемых по формулам:

$$L=\alpha_i R_n/2\pi(f_2-f_1), (5) \quad C=1/4\pi^2 f_0^2 L, (6)$$

где

$$f_0=\sqrt{f_1 f_2}$$

— средняя частота полосового фильтра; - каждая емкость-элемент $\alpha_2, \alpha_4, \alpha_6$ заменяется на параллельный контур из реальных L- и C-элементов, рассчитываемым по формулам:

$$C=\alpha_i/2\pi(f_2-f_1)R_n, (7) \quad L=1/4\pi^2 f_0^2 C. (8)$$

Для расчета выбираем следующие параметры: фильтры всепропускающего типа второго порядка, то есть схема фильтра-прототипа будет включать только элементы α_1, α_2, R_n (рис. 12). Частоты раздела между низкочастотным и среднечастотным каналами равны 500 Гц, между средне- и высокочастотным каналами равны 5000 Гц.

Сопrotивление громкоговорителей (на постоянном токе): низкочастотного и среднечастотного $R_e=8$ Ом, высокочастотного $R_e=16$ Ом. Значение нормированных параметров элементов определим из табл. 1: $\alpha_1=2,0, \alpha_2=0,5$.

Значения реальных элементов *фильтра нижних частот* находим по выражениям (1) и (2):

$$L_{1НЧ} = \alpha_1 R_n/2\pi f_1 = 2,0 \cdot 8,0/(2 \cdot 3,14 \cdot 500) = 5,1 \text{ мГн},$$

$$C1НЧ = \alpha_1 / 2\pi f_1 R_n = 0,5 / (2 \cdot 3,14 \cdot 500 \cdot 8,0) = 20 \text{ мкФ.}$$

Значения элементов *полосового фильтра* (для среднечастотного громкоговорителя) определяем в соответствии с выражениями (5)... (8):

$$L1СЧ = \alpha_1 R_n / 2\pi(f_2 - f_1) = 2,0 \cdot 8,0 / 2 \cdot 3,14 (5000 - 500) = 0,566 \text{ мГн,}$$

$$C1СЧ = 1/4\pi^2 f_0^2 L = 1/4 \cdot 3,14^2 \cdot 5000 \cdot 500 \cdot 5,66 \cdot 10^{-4} = 18 \text{ мкФ,}$$

$$C2СЧ = \alpha_2 / 2\pi(f_2 - f_1) R_n = 0,5 / 2 \cdot 3,14 (5000 - 500) \cdot 8,0 = 2,2 \text{ мкФ,}$$

$$L2СЧ = 1/4\pi^2 f_0^2 C2СЧ = 1/4 \cdot 3,14^2 \cdot 5000 \cdot 500 \cdot 2,2 \cdot 10^{-6} = 4,6 \text{ мГн.}$$

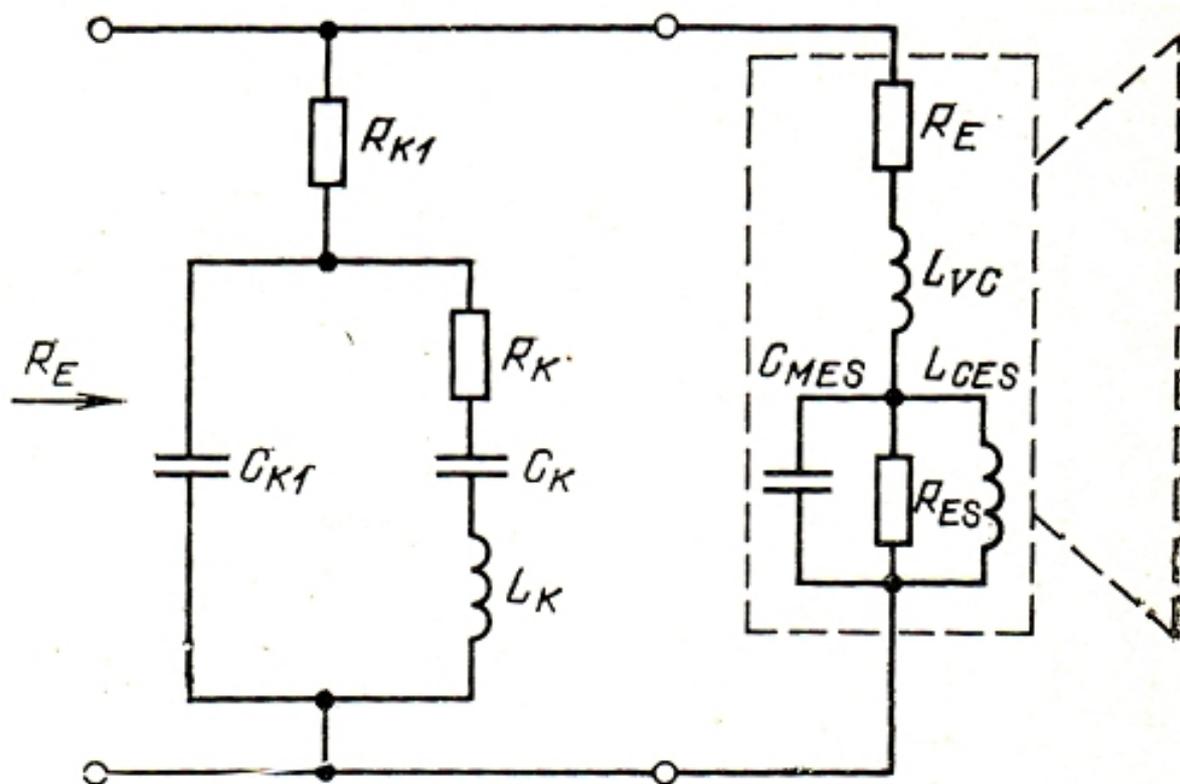
Значения элементов *фильтра верхних частот* определяем в соответствии с выражениями (3,4):

$$C1ВЧ = 1/2\pi f^2 R_n \alpha_1 = 1 / (2 \cdot 3,14 \cdot 5000 \cdot 2,0 \cdot 16) = 1,00 \text{ мкФ,}$$

$$L2ВЧ = R_n / 2\pi f^2 \alpha_2 = 16 / (2 \cdot 3,14 \cdot 5000 \cdot 2,0) = 0,25 \text{ мГн.}$$

Расчеты, выполненные по этим формулам, корректны, только если фильтры нагружены на активное (омическое) сопротивление. Чтобы согласовать параметры фильтров с реальным комплексным сопротивлением громкоговорителей, надо включить дополнительно параллельно каждому громкоговорителю согласующую цепь. Параметры такой цепи находятся из условия, чтобы комплексное сопротивление этой цепи $Z_{согл}$ и комплексное сопротивление громкоговорителя $Z_{гг}$ компенсировали друг друга при параллельном включении и обеспечивали бы в сумме активное сопротивление, то есть $1/Z_{согл} + 1/Z_{гг} = 1/Re$. Для расчета элементов такой цепи строится эквивалентная электрическая схема

громкоговорителя (см. предыдущую статью в декабрьском номере МО за 2008 год), и по отношению к ней создается дуальная компенсирующая цепь. Схема эквивалентной цепи громкоговорителя и соответствующей компенсирующей цепи показаны на рис. 13. Для компенсации входного сопротивления низкочастотного громкоговорителя можно использовать упрощенную цепь (поскольку резонанс громкоговорителя находится значительно ниже частоты среза фильтра и не оказывает влияния на его параметры), состоящую из двух элементов $R_{k1}=R_e$ и $C_{k1}=L_{vc}/R_{e2}$, где R_e и L_{vc} — сопротивление и индуктивность звуковой катушки громкоговорителя.



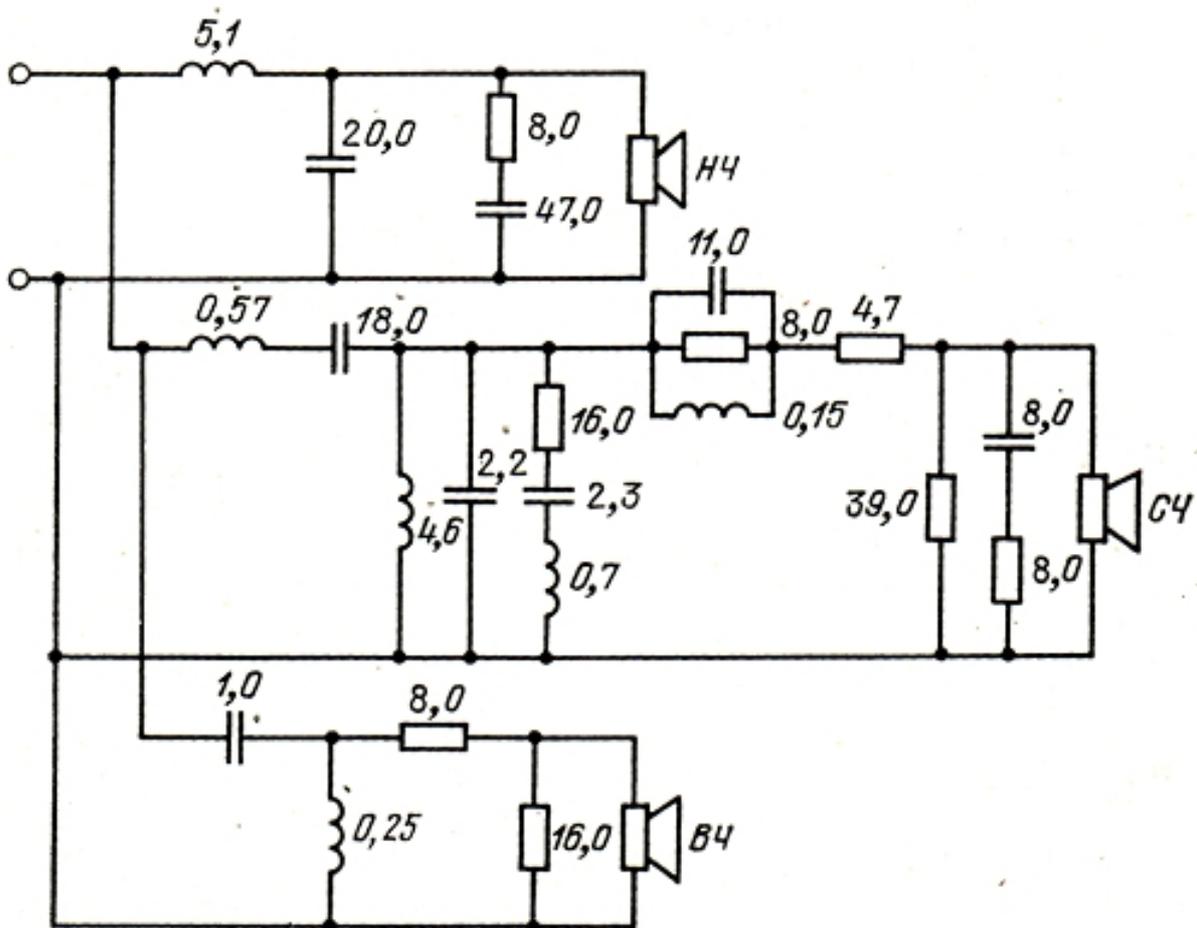
Для средне- и высокочастотного громкоговорителя полная компенсирующая цепь включается, только если частота среза и резонансы громкоговорителей

находятся близко друг от друга — в противном случае достаточно применять упрощенную цепь (расчет параметров полной цепи приведен в книге Алдошина И. А., Войшвилло А. Г.

"Высококачественные акустические системы").

Кроме того, в схему иногда включаются дополнительно режекторные фильтры, чтобы убрать отдельные пики на амплитудно-частотной характеристике.

Пример схемы фильтров для трехполосной акустической системы с учетом согласующих цепей режекторного звена для среднечастотного громкоговорителя и дополнительного Г-образного аттенюатора, состоящего из двух резисторов для выравнивания уровней по звуковому давлению между НЧ-, СЧ- и ВЧ-громкоговорителями, показан на рис. 14.



В настоящее время для расчета фильтрующе-корректирующих цепей используются компьютерные методы оптимального синтеза линейных электронных схем. Для этого задаются структура фильтра и начальные значения элементов, затем производится расчет суммарных выходных значений АЧХ, ФЧХ и ГВЗ с учетом реальных измеренных параметров громкоговорителей, размещенных в корпусе, и путем целенаправленного изменения элементов схемы минимизируется разница между реальными и заданными параметрами. Применение методов оптимального проектирования позволяет обеспечить наилучшее широкополосное согласование параметров фильтров и громкоговорителей и получить оптимально

достижимое значение параметров акустической системы.

Сейчас активно проводятся исследования по применению цифровых фильтров-процессоров в акустических системах, что позволяет перестраивать параметры системы в реальном времени в зависимости от вида звукового сигнала, а также обеспечивать оптимальное согласование характеристик акустической системы с параметрами помещения, но эта техника находится еще в начале своего развития и пока не нашла широкого применения в промышленных разработках.

Часть 7. Звуковые кабели в акустических системах.

Завершая серию статей по акустическим системам, необходимо остановиться еще на одном важном элементе акустической системы — звуковом кабеле, соединяющим ее с усилителем низкой частоты (УНЧ). Поскольку звуковые кабели работают с высокими уровнями напряжения (например, при подключении к стоваттному усилителю акустической системы с номинальным сопротивлением 8 Ом сила тока будет равна 3,5 А), для них требуется использовать проводники с довольно большим сечением. До 80-х годов XX века подход к выбору звукового кабеля был довольно прагматичным: требовалось минимизировать потери мощности при передаче сигнала от усилителя к громкоговорителю и спад АЧХ по напряжению на высоких частотах. Потери первого

вида определяются активным сопротивлением кабеля, вторые — взаимодействием индуктивности и емкости кабеля с реактивным сопротивлением акустической системы.

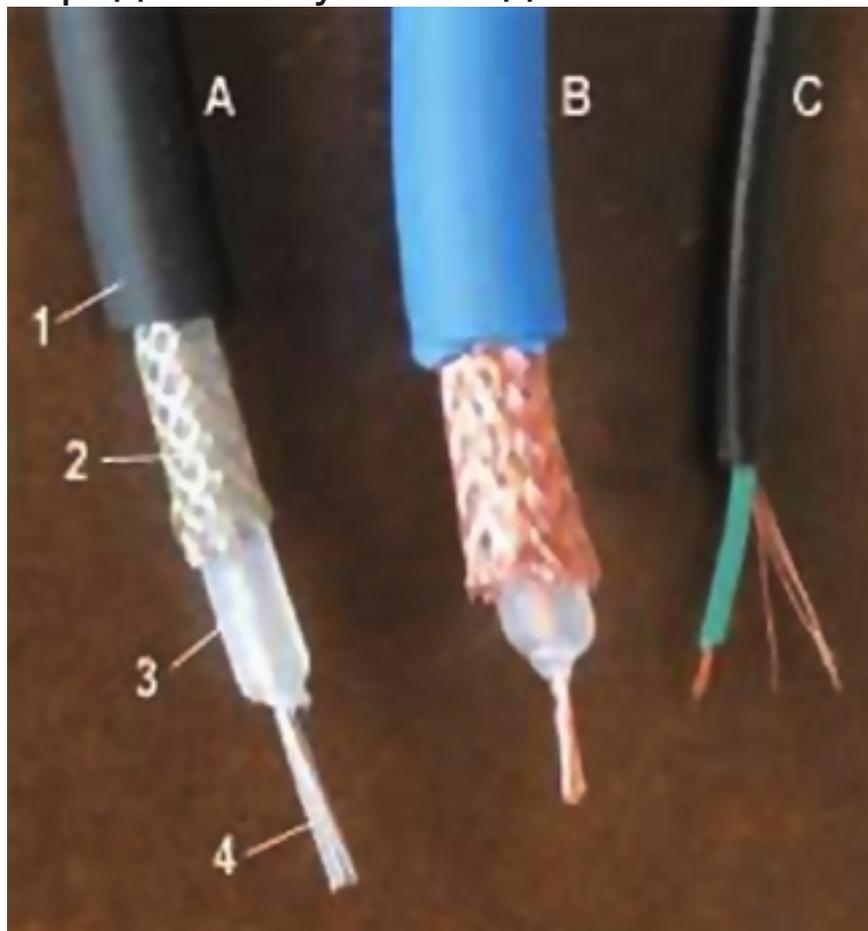
Однако в последние годы появилось много публикаций в отечественных и зарубежных журналах по результатам субъективных тестирований различных конструкций звуковых кабелей, доказывающих чрезвычайно большое влияния кабеля на качество звучания акустической системы (чистоту, прозрачность, четкость и др.), особенно на высоких частотах. Для объяснения этих явлений стали искать разнообразные причины: влияние примесей кислорода в меди, скин-эффект, эффект дисперсии (то есть зависимость скорости распространения сигнала от частоты), фазовый сдвиг, поглощение в изоляторах, электромагнитные наводки и др.

Серьезные научные работы были опубликованы в отечественной литературе по длинным (трансмиссионным) линиям. Однако по звуковым кабелям у нас, в основном, публиковался чрезвычайно противоречивый материал. Поэтому кратко изложенные ниже данные по теории звуковых кабелей опираются на труды таких известных специалистов, как R. A. Greiner, A. Davis, G. Ballou и др., опубликованных в журналах JAES, JASA, трудах конгрессов AES и энциклопедиях.

Характеристики звуковых кабелей

Прежде всего, необходимо отметить, что звуковой кабель, используемый для акустических систем (рис. 1), обычно имеет длину приблизительно от

трех до десяти метров, что позволяет рассматривать его как систему с сосредоточенными параметрами, поскольку его длина значительно меньше длины электромагнитной волны в пределах звукового диапазона $L \ll \lambda$.



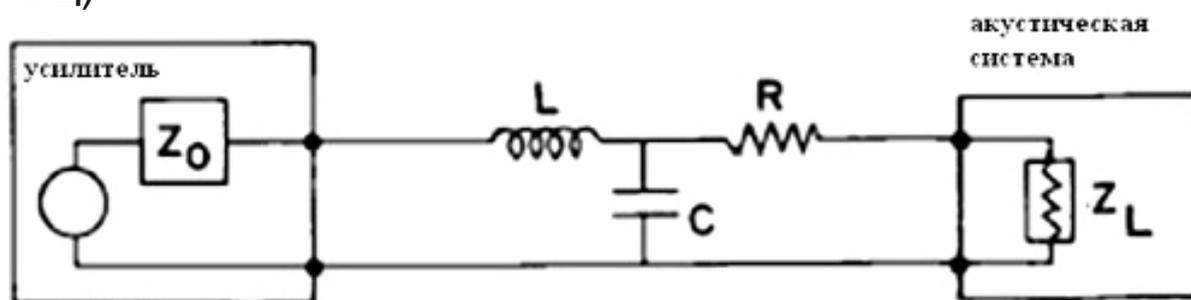
Длина волны определяется как $\lambda = v / f$, где v — скорость распространения электромагнитной волны в кабеле, которая связана со скоростью распространения ее в вакууме (c — скорость света в вакууме равная 3×10^8 м/с) следующим соотношением

$$v = c / \sqrt{\mu \epsilon}$$

, где μ — магнитная, а ϵ — диэлектрическая проницаемость среды (изолятора). Например, для полипропилена она равна 2,3, для тефлона — 2,1, для PVC — 3,5, то есть значение скорости

распространения электромагнитной волны в кабеле может составлять минимум половину скорости света — $1,5 \times 10^8$ м/с (значение μ можно считать близким к единице).

Отсюда минимальная длина волны на верхней частоте звукового диапазона составит $\lambda_{\text{мин}} = 1,5 \times 10^8 \text{ (м/с)} / 2 \times 10^4 \text{ (Гц)} = 7,5 \text{ км}$. Поскольку в звуковом кабеле выполняется соотношение $L \ll \lambda$ (как было отмечено ранее, в АС используется кабель длиной 3-10 м), то можно расчет его параметров производить, исходя из эквивалентной схемы для системы с сосредоточенными параметрами, представленной на рис. 2 (расхождение между расчетами по этой схеме и расчетами по точной теории трансмиссионных линий начинает проявляться на частотах выше 50 кГц).



Отсюда также следует, что эффекты, характерные для длинных трансмиссионных линий, такие как фазовый сдвиг и дисперсия, в звуковых кабелях проявляются очень незначительно: фазовый сдвиг составляет $\sim 0,3$ град/м на 20 кГц и дисперсия (разница по времени прихода высоких частот по отношению к низким) меньше 60 нс/м в звуковом диапазоне, что вряд ли может влиять на слышимые искажения. Кроме того, флюктуации сигнала за счет волновых отражений, характерные для

длинных трансмиссионных линий, также никак не проявляются для коротких линий в звуковом диапазоне частот, они начинают сказываться на частотах выше 30 МГц.

Скин-эффект

Еще одно из свойств звуковых кабелей, которое, как считают многие авторы, оказывает существенное влияние на качество звучания — это скин-эффект. Скин-эффект (поверхностный эффект) возникает в проводниках, по которым течет переменный ток, за счет появления индукционных токов (токов Фуко). Эти токи направлены у поверхности проводника в направлении первичного электрического тока, а у оси — навстречу ему. В результате внутри проводника ток "слабнет", а у поверхности увеличивается. На высоких частотах плотность тока вблизи оси оказывается практически равной нулю, что вызывает увеличение сопротивления проводника и, соответственно, потери мощности в нем. Глубина скин-эффекта (на которой амплитуда тока уменьшается в e раз, то есть в 2,73 раза) может быть вычислена по приближенной формуле:

$$\delta = \frac{1}{\sqrt{2 \pi f \mu \sigma}}$$

где μ — магнитная проницаемость материала проводника, σ — удельная электропроводность (они зависят от материала проводника и задаются в справочных таблицах), f — частота.

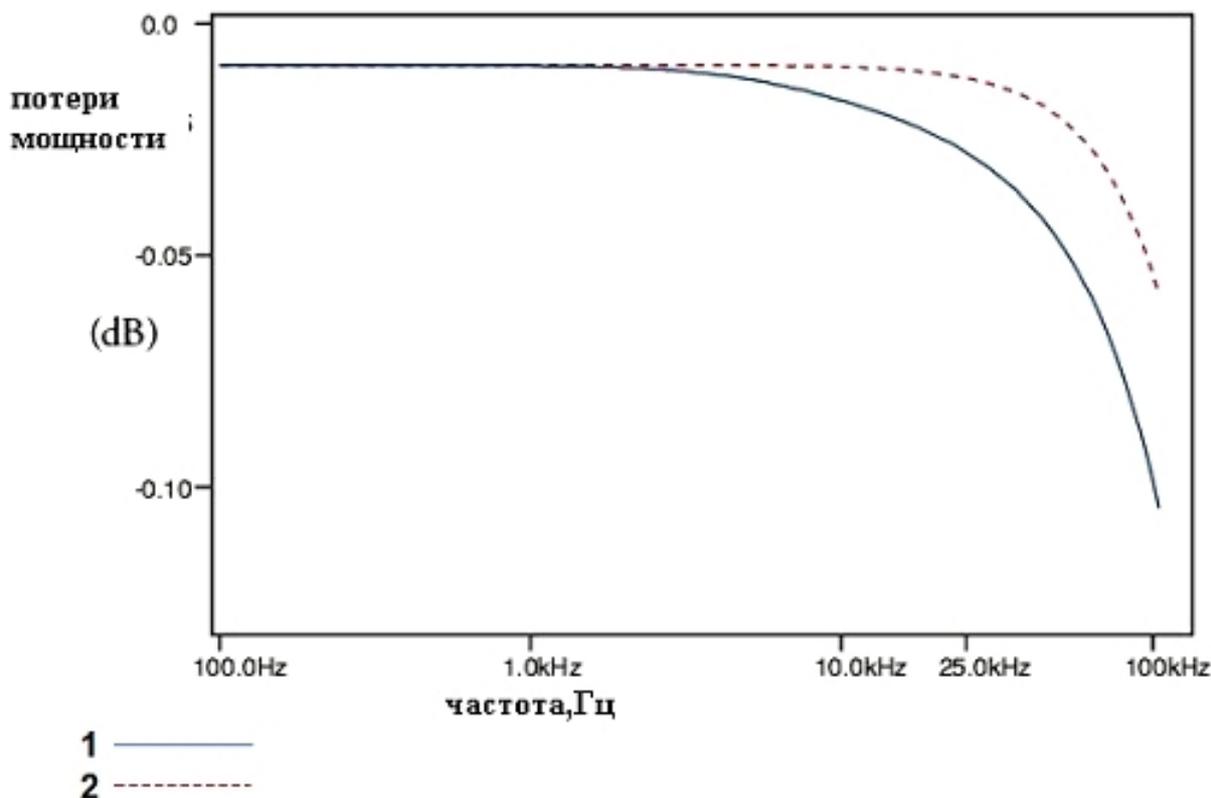
Эта формула пригодна для сплошных проводников. Если кабель состоит из отдельных жил, то удельная электропроводность будет уменьшена за

счет учета коэффициента заполнения (поскольку между отдельными цилиндрическими жилами имеются воздушные промежутки), который приближенно равен 0,9069. Для медного проводника глубина скин-эффекта составляет на 20 кГц примерно 0,5 мм (глубина скин-эффекта не зависит от диаметра проводника, она определяется только его материалом, правда, при изменении диаметра меняется процент его использования). Связь изменения погонного сопротивления R и погонной индуктивности кабеля L (то есть сопротивления и индуктивности на единицу длины) с глубиной скин-эффекта (который зависит от частоты f) может быть оценена следующим образом:

$$R/R_0 = r_0/2\delta + 0,26;$$

$\omega L/R_0 = r_0/2\delta - 0,02$, где R_0 — сопротивление на постоянном токе (на очень низких частотах), r_0 — радиус проволоки.

Учет изменения общего сопротивления за счет скин-эффекта показывает, что на частоте 25 кГц сопротивление возрастет примерно в 1,05-1,3 раза в зависимости от размера (калибра) проводника, и это может дать эффект потери мощности, показанный на рис. 3. Этот эффект на частоте 25 кГц за счет учета изменения сопротивления сплошного проводника, вызванного скин-эффектом, составит 0,02 дБ (для многожильных кабелей он будет еще меньше за счет учета коэффициента заполнения), что вряд ли может оказывать существенное влияние на результат прослушивания обычной акустической системы.



Параметры звуковых кабелей

Эквивалентная схема, показанная на рис. 2, представляет собой цепь, состоящую из усилителя, звукового кабеля и акустической системы.

Звуковой кабель характеризуется такими параметрами, как погонное сопротивление, емкость и индуктивность (так как обычно их относят к единице длины кабеля, то есть к 1 м).

Погонное сопротивление определяется сечением проводника и его материалом, в частности, для медного провода сечением 1 кв. мм оно составляет 0,019 Ом. Размер проводника кабеля и его погонное сопротивление задается с помощью значений его калибра AWG (American Wire Gauge). Связи калибра кабеля с площадью сечения проводника и его погонным сопротивлением для меди даны в таблице 1.

AWG	Площадь проводника, кв. мм	Погонное сопротивление, $10^{-3}\Omega/\text{м}$	Допустимая величина тока, А
28	0,08	230	1,0
22	0,5	38	4,0
20	0,75	25	6,0
18	1,0	19	10,0
17	1,5	12	16,0
16	2,0	9,5	20,0
14	2,5	7,6	25,0
11	6,0	3,1	48,0
10	8,0	2,3	80,0

Одним из важных требований, предъявляемых к звуковому кабелю, является передача сигнала без потери мощности. Считается допустимой потеря мощности не более 0,5 дБ. Для этого активное сопротивление кабеля R должно быть существенно меньше сопротивления нагрузки, то есть $R \ll |Z_{AC}|$, где $|Z_{AC}|$ — номинальный импеданс акустической системы. Поскольку его значение лежит для бытовых акустических систем в пределах 2..16 Ом, то значение сопротивления кабеля R должно лежать в пределах 0,1..0,5 Ом. Звуковые кабели обычно имеют длину 3-5 м и сечение проводника 2,5-10 кв. мм (то есть AWG 10-14), поэтому они вполне удовлетворяют этим условиям.

Звуковой кабель состоит из двух проводников, разделенных диэлектриком, то есть представляет собой конденсатор. Емкость такого конденсатора, образованного двумя параллельными проводниками (жилами), равна: $C = \epsilon_0 \epsilon \pi / \ln(d/a)$, где ϵ_0 — удельная емкость свободного пространства, равная $8,854 \times 10^{-12}$ Ф/м; ϵ — диэлектрическая

постоянная (проницаемость) изолятора; d — расстояние между проводниками (жилами, м), a — радиус каждого проводника (м). Для коаксиального кабеля это выражение несколько изменится:

$C = \epsilon_0 \epsilon_2 \pi / \ln(b/a)$, где b — внешний диаметр кабеля, a — внутренний. Таким образом, погонная емкость зависит от конструкции кабеля, от размеров проводника и от расстояния между жилами (см. табл. 2), от размеров и свойств диэлектриков, используемых в качестве изоляторов, и лежит в пределах 10-100 пФ/м.

Поскольку в кабеле по проводнику протекает переменный ток, то он создает переменное магнитное поле. Связь между величиной тока и создаваемым им магнитным потоком (числом магнитных силовых линий, пересекающих проводник) определяется с помощью коэффициента индуктивности (или просто индуктивности) L . Индуктивность двух параллельных проводников радиуса a и расстоянием между ними d равна

$L = (\mu \mu_0 / \pi) (\ln d/a + 0.25)$, где μ — магнитная проницаемость изолятора, μ_0 — магнитная проницаемость вакуума $1,257 \times 10^{-6}$ Гн/м. Таким образом, погонная индуктивность зависит от геометрии и конструкции кабеля, и меняется в пределах 0,1-1 мкГн/м.

Изменения значений индуктивности и емкости с изменением расстояния между проводниками для медного кабеля калибра 12AWG даны в таблице 2.

Расстояние между проводниками d (мм)	Индуктивность (мкГ/м)	Емкость (пФ/м)
0,4	0,39	76
1,0	0,86	34
2,0	1,27	24
4,0	1,67	17
8,0	2,07	14
16,0	2,48	12

Как видно из таблицы 2 и приведенных выше формул, увеличение расстояния между проводниками увеличивает индуктивность и уменьшает емкость кабеля.

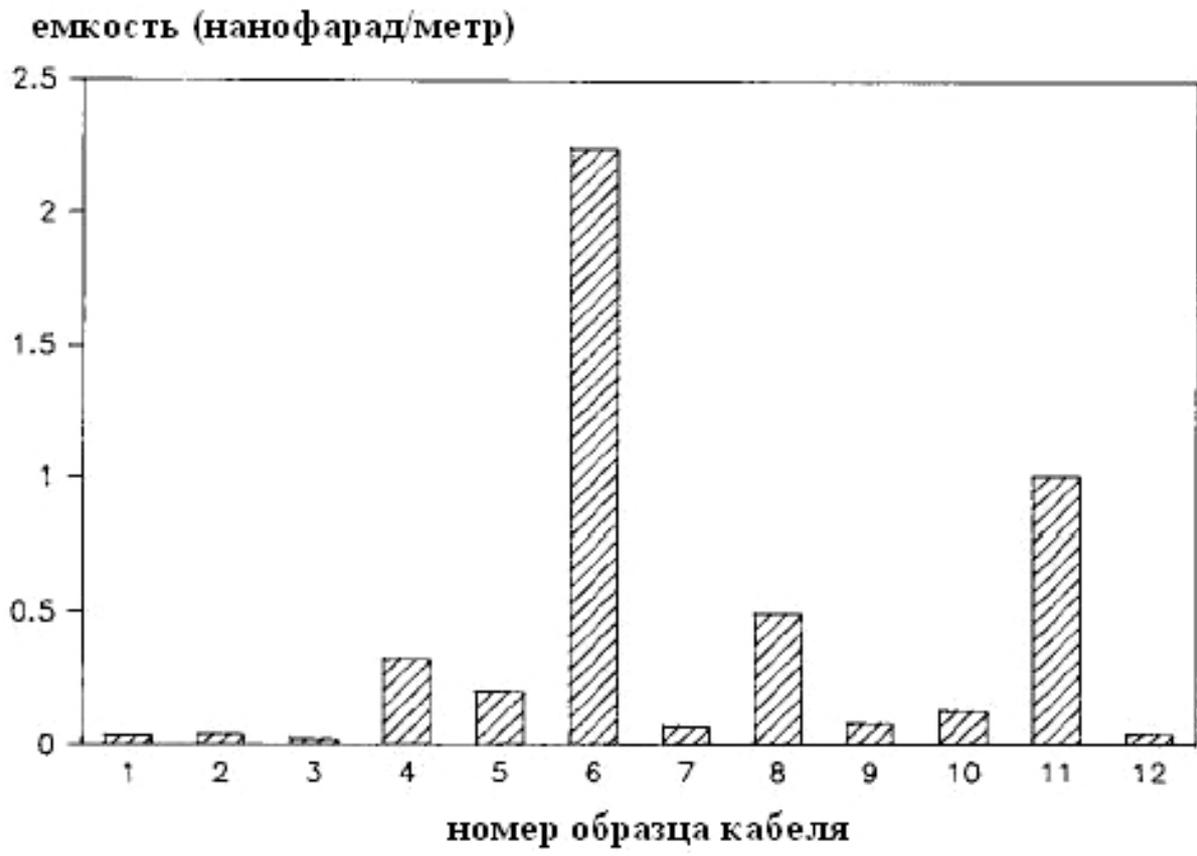
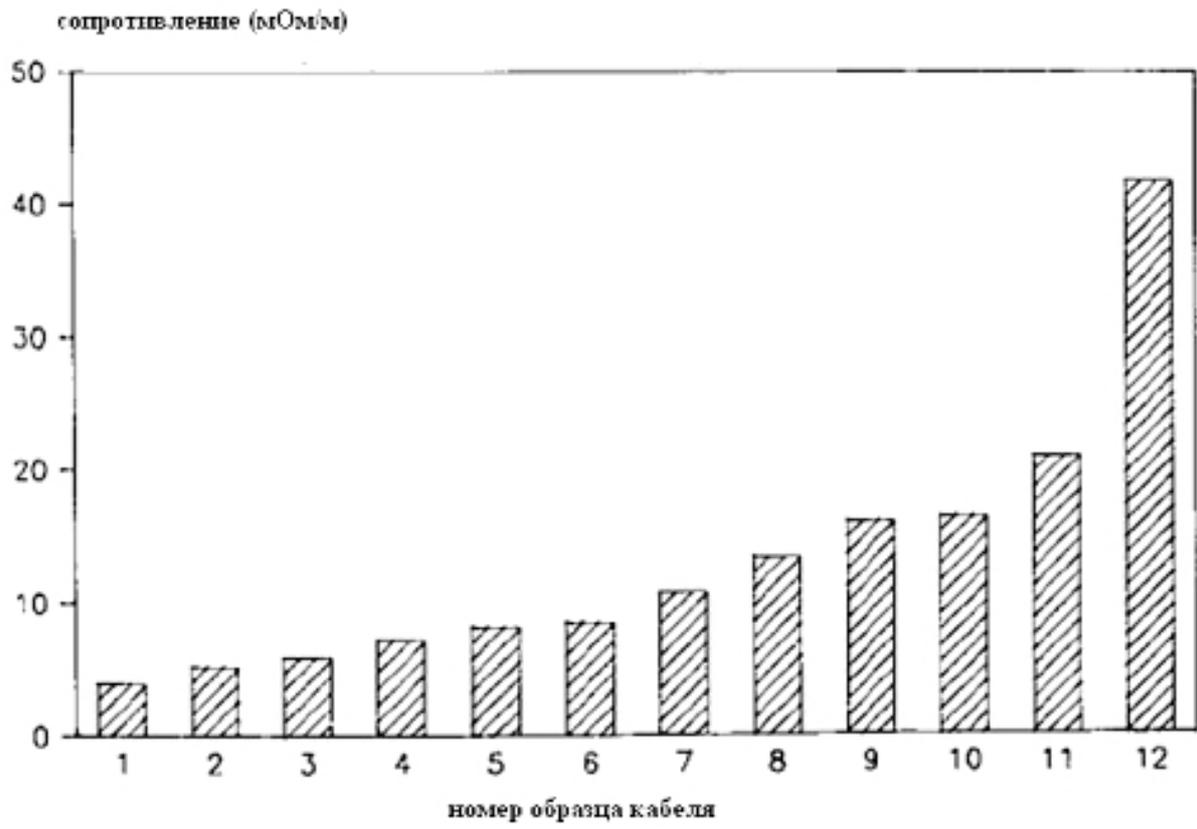
Равномерность АЧХ

Кроме вышеуказанного требования к параметрам кабеля (передачи без потерь мощности сигнала от усилителя к акустической системе), имеется второе требование, которое состоит в том, чтобы характеристика сигнала, передаваемого от усилителя к акустической системе, по напряжению сохранялась равномерной в звуковом диапазоне частот. Чтобы определить условия, при которых эти требования будут выполняться, необходимо рассмотреть взаимодействие сопротивлений усилителя, кабеля и акустической системы.

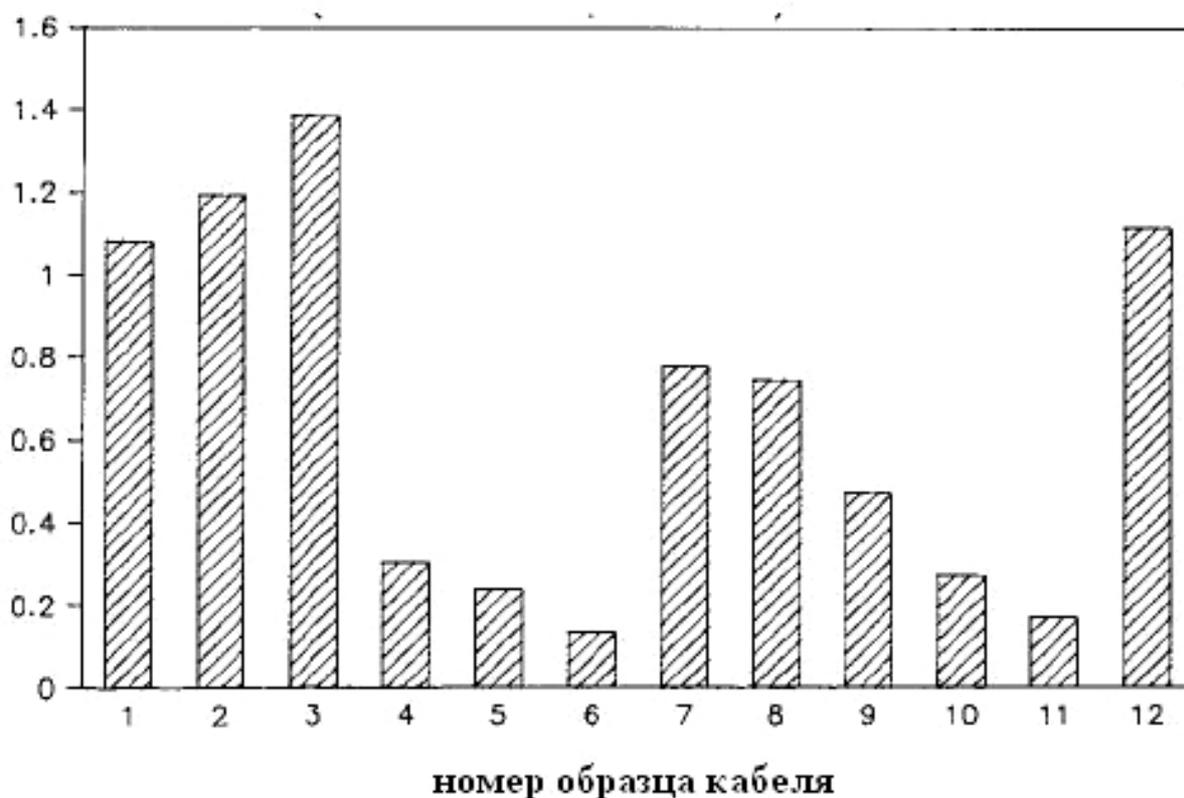
Если посмотреть на эквивалентную схему (рис. 2), то видно, что кабель можно рассматривать как фильтр низких частот второго порядка, включающий в себя последовательное сопротивление, индуктивность и параллельную емкость (можно сравнить со схемами фильтров низких частот, используемых в АС, которые были приведены ранее). При выборе конструкции кабеля необходимо обеспечить значения этих параметров такими, чтобы частота среза была выше частотного звукового диапазона. То есть, частотная

характеристика по напряжению передаваемого по кабелю сигнала от усилителя к акустической системе была плоской. Если бы такой фильтр (то есть кабель) был нагружен на активное сопротивление, то анализ такой схемы и выбор параметров не представлял бы особых затруднений.

Однако кабель имеет комплексный импеданс, включающий в себя как активную (R), так и реактивную часть (L , C) и обладающий определенной частотной зависимостью. В работе, которую проделал Fred E. Davis, был проведен эксперимент с 12 видами кабелей разной конструкции. Значения погонных сопротивлений, индуктивностей и емкостей выбранных кабелей даны на рис. 4. Из этих данных видно, что многожильные плоские кабели (номера 6 и 11) имеют минимальную индуктивность, но большую емкость, кабели с двумя параллельными проводниками (номера 1, 2 и 12) имеют большую индуктивность, но малую емкость. Хорошие кабели должны иметь низкий импеданс (как его активную, так и реактивную часть), который остается постоянным во всем аудиодиапазоне, чтобы обеспечить плоскую характеристику по напряжению.



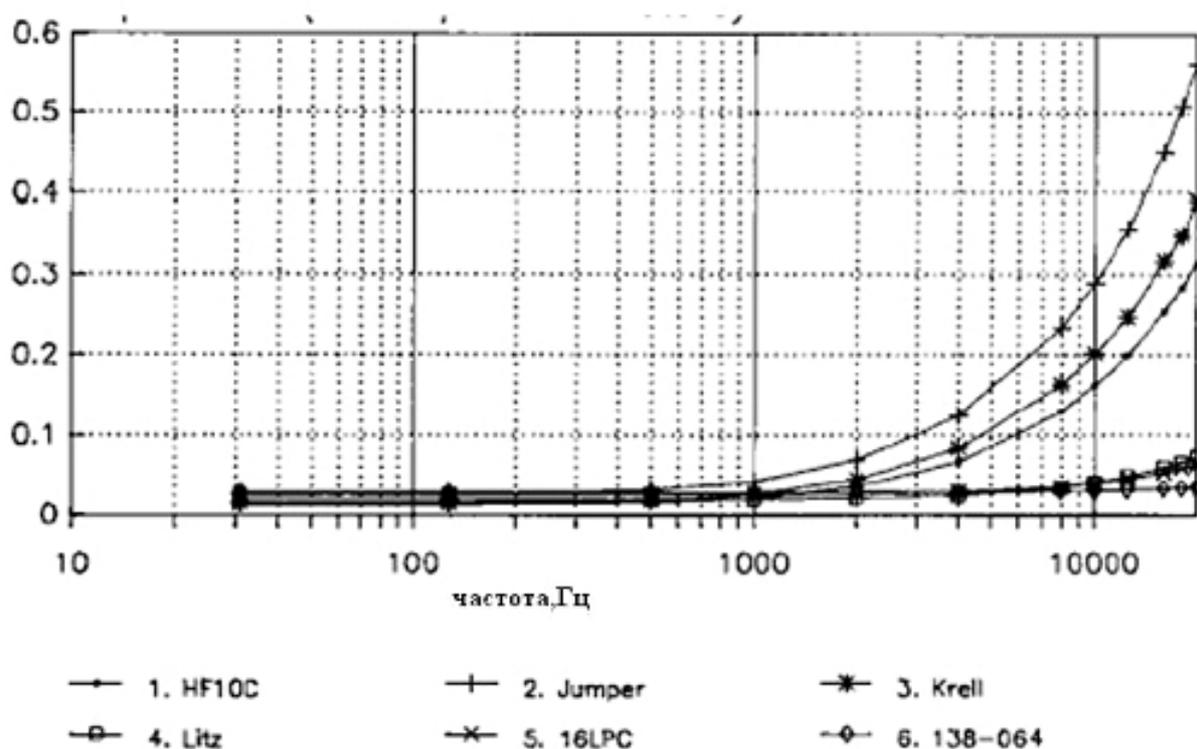
ИНДУКТИВНОСТЬ (МИКРОГЕНРИ/МЕТР)



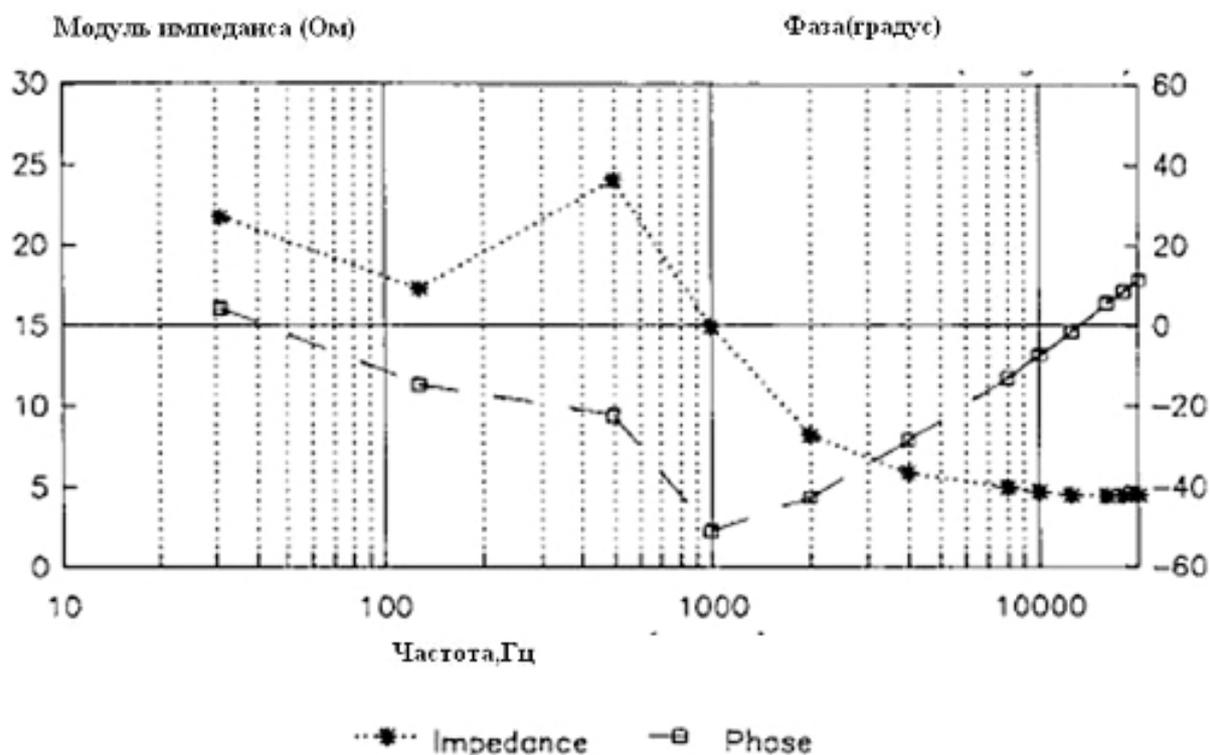
Выполненные измерения частотных характеристик импедансов проводились при замене АС резистором 1 Ом. Некоторые типы кабелей (например, номер 6 — рис. 5) имеют практически плоскую частотную характеристику импеданса, в то же время другие (например, номер 3) показывают некоторый подъем характеристики. Анализ этих данных показал, что подъем частотной характеристики происходит за счет реактивной части сопротивления кабеля (его индуктивности) и скин-эффекта, который имеет значительно меньшее влияние. Чем выше емкость кабеля, тем больше снижается общее реактивное сопротивление на высоких частотах, что делает частотную характеристику импеданса более плоской (что противоречит принятому мнению, что чем больше емкость кабеля, тем больше затухают

высокие частоты, это следовало бы из анализа эквивалентной схемы без учета индуктивности). Кабель номер 6 на рис. 5 имеет наибольшую емкость (2,3 нФ на 1 м), наименьшую индуктивность и самую плоскую частотную характеристику импеданса. При этом емкость кабеля еще настолько мала, что она не должна влиять на стабильность профессионального усилителя.

Импеданс(Ом на 3.1м)



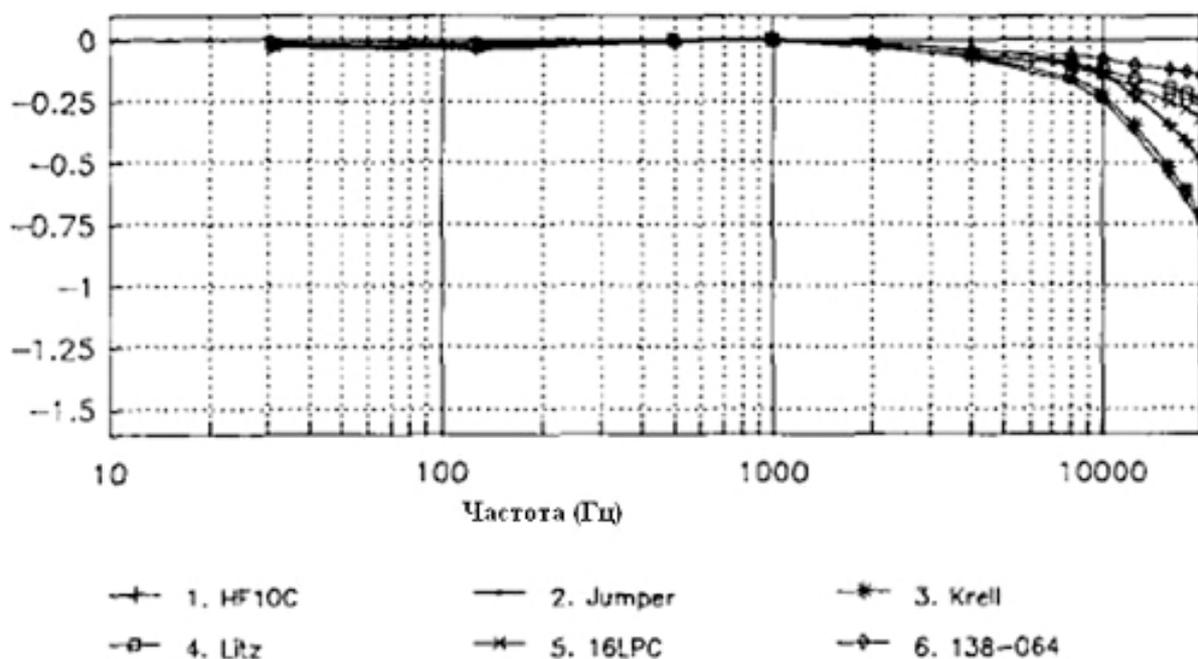
Основную проблему составляет взаимодействие кабеля с акустической системой, которая обладает частотно-зависимым комплексным сопротивлением (импедансом, эквивалентная схема АС была представлена в предыдущей статье). Зависимость модуля импеданса и его фазы от частоты для трехполосной системы с фазоинвертором и пассивными фильтрами показана на рис. 6.



Результаты измерений частотно-зависимой характеристики по напряжению для кабелей разной конструкции с различными усилителями и акустическими системами (одна из комбинаций представлена на рис. 7) показывают следующее. Наилучшие результаты (величина спада АЧХ на частотах выше 15 кГц менее 0,2 дБ) получаются при использовании многожильных кабелей, имеющих низкое активное сопротивление, низкую индуктивность и минимальный скин-эффект (например, номер 6) совместно с усилителями с низким выходным сопротивлением, (обычно порядка 0,05 Ом), низким выходным индуктивным сопротивлением порядка (2 мкГн) и высоким, не зависящим от частоты, демпфирующим фактором, что обычно и выполняется в хороших усилителях. При этом, даже при учете низкоомной нагрузки со стороны АС, и влияния ее реактивного сопротивления, обусловленного индуктивностью и

емкостью, частота среза (то есть частота, на которой спад АЧХ достигает -3 дБ) в такой системе "УНЧ — кабель — АС" лежит существенно выше звукового диапазона: 80-160 кГц, также как и частота возможного резонанса между индуктивностью кабеля и емкостью нагрузки, которая находится в пределах 40 кГц.

частотная характеристика по напряжению (дБВ на 3.1м)



Таким образом, для относительно коротких звуковых кабелей (длиной до 10 м) можно получить практически плоскую характеристику по напряжению в слышимом диапазоне частот (правда, для низкоомных АС не следует применять кабели слишком большой длины).

Конструкции звуковых кабелей

Производством звуковых кабелей занимаются в настоящее время десятки (если не сотни) фирм, к числу наиболее известных относятся Audio Quest, DeLink, Gotham, Wirewold, Electronics, Belsis, Canare, Cordial, Horizon, Mogami, Prospecta, Samson, Tasker-Milan.

Конструкции кабелей все более усложняются, постоянно ведутся поиски материалов для проводников и изоляторов, и, соответственно, растет цена звуковых кабелей, которая уже может превосходить 800\$ за метр. Все это сопровождается большим количеством реклам и публикаций, убеждающих в огромном влиянии звуковых кабелей на качество звучания акустических систем (чистоту, прозрачность, четкость, сбалансированность музыкального образа и пр.).

В настоящее время наиболее распространенными конструкциями акустических кабелей являются следующие.

1. *Двухжильный кабель* — использует два проводника в изоляции (рис. 8а).

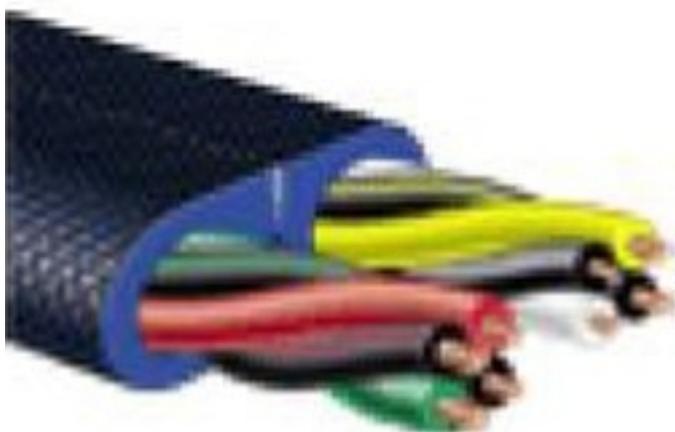


2. *Многожильный кабель* — из звуковых кабелей такого типа можно выделить конструкции типа Litz (фирма Audio Quest), где используется много тонких жил в изоляции, что позволяет уменьшить скин-эффект. С целью уменьшения электромагнитного взаимодействия проводников друг с другом фирма Audio Quest применила особую конструкцию (HyperLitz): каждая жила одета в изоляцию из полипропилена или фторопласта и замотана вокруг пластикового стержня, при этом нигде не

пересекаясь и не создавая контактных потерь (рис. 8б).



В новых разработках фирма использует в качестве изоляции трубки из тефлона, диаметр которых больше диаметра проводника, что создает воздушную прослойку между ними, уменьшая диэлектрическую постоянную (у воздуха она близка к единице). В кабелях этого типа также применяется технология SST (Spread Spectrum Technology), которая предусматривает использование жил разных диаметров, например, в кабеле Audio Quest CV-4 есть две жилы калибра 20 AWG (0,52 кв. мм) и две 17 AWG (1,02 кв. мм). В конструкциях кабелей типа "двойная спираль" используются восемь проводников, скрученных в две группы (рис. 8с) с калибрами 16, 18, 19, 21 AWG, при этом в них применяется длинокристаллическая медь с особо чистой поверхностью (технологии PSC/LGC).

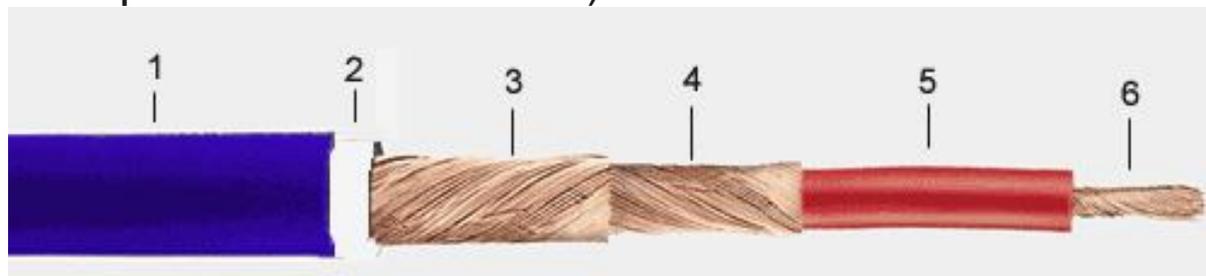


Наконец, одна из последних разработок фирмы Audio Quest: две спирали проводников (положительных и отрицательных) уложены спирально навстречу друг другу в противоположных направлениях — Counter Spiraling Circular Helix HyperLitz (рис. 8д). По мнению производителя, все эти усложнения конструкции кабеля значительно улучшают качество звучания акустических систем (соответственно, и их цену).



3. Коаксиальные кабели (рис. 9), в которых внутренний и внешний проводник "вложены" друг в друга и разделены изоляцией. При этом значительно уменьшены поля рассеяний электромагнитной энергии при передаче сигнала по кабелю, поэтому они в первую очередь

используются для сигналов малой мощности и для высокочастотных сигналов (например, в измерительных системах).



Материалы для проводников

Выбору материалов проводников в кабеле также уделяется очень большое внимание; обычно используются такие металлы, как медь или серебро. В 1984 году фирма Hitachi выпустила на рынок первый кабель из бескислородной меди (OFC — Oxygen Free Copper). Присутствие кислорода в меди создавало вкрапление окислов (по мнению фирмы, это приводило к искажению временной структуры звукового сигнала, особенно на низких уровнях). Следующим этапом стало применение материала LC-OFC (Linear Crystal Oxygen) — бескислородная медь с низкокristаллической структурой (монокристалл); как было объяснено в каталогах фирмы, это уменьшило "электрические барьеры" между кристаллами меди и улучшило чистоту звучания. Японские фирмы Sony, Audio-Technica и др. начали применять медь, полученную методом непрерывной вытяжки из расплава PC-OCC, что позволило получить максимально длинные (до нескольких метров) кристаллы. Ведущая американская фирма по производству звуковых кабелей Audio Quest в 1988 году

разработала аналогичный собственный процесс получения длиннозернистой меди — LGC (long-grain copper), что позволило добиться для жил диаметром 0,15..0,25 мм длины кристалла свыше 200 м.

Кроме того, специалисты той же фирмы сумели получить и начали использовать особо чистую медь — 6N с содержанием меди 99,9999%. Эта технология получила название FPC-6 (Functionally Perfect Copper — функционально совершенная медь). Уже появились сообщения о применении меди 7N, а также новой технологии PSC (Perfect Surface Copper) — медь с идеально чистой поверхностью (поскольку из-за скин-эффекта поверхность проводника, по мнению фирмы, играет особую роль в "музыкальности" кабеля).

Аналогичные опыты по применению чистого серебра в качестве проводника в кабелях позволили фирме Audio Quest использовать серебро FPS и PPS (Functionally Perfect Silver и Perfect Surface Silver), а фирме Finestra Design Group — серебро с чистотой 5N. Однако чистое серебро очень дорого, поэтому его, в основном, используют для покрытия медных проводов (silver-clad cooper). Появились сообщения о применении криогенной низкотемпературной обработки (жидким азотом) медных проводников, что якобы благотворно влияет на проводимость меди.

Надо сказать, что огромные затраты по созданию сверхчистых материалов для проводников звуковых кабелей и связанное с этим значительное повышение цен на кабели для аппаратуры Hi-Fi с

физической точки зрения трудно объяснимо, поскольку удельная электропроводность металлов зависит от L — среднего расстояния между двумя последовательными столкновениями электронов с дефектами в кристаллической решетке металлов (обусловленными наличием примесей и др.). Зависимость эта выражается следующим образом: $\sigma = ne^2L/\rho F$, где σ — удельная электропроводность, n — концентрация электронов проводимости $\sim 10^{23} \text{см}^{-3}$, e — заряд электрона, ρF — импульс Ферми. При комнатной температуре $L \sim 10^{-6} \text{см}$, поэтому вряд ли переход от меди с очисткой 6N к очистке 7N может привести к настолько значительному изменению L , что это существенно изменит удельную электропроводность кабеля и приведет к изменениям качества звучания акустических систем, даже на тихих уровнях.

Материалы для изоляторов

Выбор материалов для изоляторов в звуковых кабелях имеет существенное значение. Поскольку любой диэлектрик в той или иной степени способен поглощать электромагнитную энергию, то с целью уменьшения потерь необходимо выбирать материалы с малой диэлектрической постоянной и малыми диэлектрическими потерями (которые характеризуются обычно значением тангенса угла потерь), например, для полиэтилена тангенс равен $\text{tg}\delta = 2 \times 10^{-4}$ на 1 МГц. На более низких частотах он меньше и поэтому для звуковых кабелей эти потери не вносят значительных искажений. Кроме того, материалы должны обладать большой

механической прочностью, широким диапазоном рабочих температур и др.

В качестве материала для изоляторов обычно в кабелях применялись резина, шелк и т. п. В последнее время используются такие материалы, как поливинилхлорид, полипропилен, фторопласт, полиуретан, полиэтилен, тефлон и т. д. С целью уменьшения диэлектрической постоянной (поскольку она влияет на значение емкости и индуктивности кабеля) фирмы применяют особые материалы, например, вспененный фторопласт или специальное искусственное волокно с большим содержанием воздуха (MicroFiber), у которых диэлектрическая постоянная стремится к 1 (диэлектрическая постоянная воздуха 1,0167).

Примером современной конструкции кабеля может служить звуковой кабель фирмы Gotham (Швейцария) модель 50150 GAC-SPK 2 x 2.5mm² Quaxial (рис. 9), состоящий из внешней оболочки (температуростойкий полиуретан PUR диаметром 6,8 мм), разделителя (поливинилхлорид PVC диаметром 6,1 мм), двух оплеток (чистая медная проволока диаметром 0,13 мм), изолятора (PVC диаметром 4 мм), проводника (50 жил чистой медной проволоки диаметром 0,25 мм, площадь 2,5 кв. мм).

Технические характеристики такого кабеля:

- сопротивление центрального проводника меньше 7,6 Ом/км,
- сопротивление внешней оплетки меньше 7,8 Ом/км,

- емкость (проводник/проводник) меньше 450 нФ/км,
- тестовое напряжение (пров./пров.) 800 Vэфф.,
- сопротивление изоляции больше 200 МОм/км,
- температурный диапазон (гибкая установка) от -5 до +50 С,
- температурный диапазон (фиксированное размещение) от -30 до +70 С.

Следует отметить также, что в ряде конструкций высококачественных АС используется метод подключения каждого громкоговорителя и фильтра к усилителю своей отдельной системой кабелей ("bi-wiring"), а не одним общим. Фирмы-изготовители утверждают, что такой способ подключения уменьшает взаимное влияние кабелей. При этом оба кабеля должны иметь очень близкие значения индуктивности и емкости, чтобы не было различий в фазовых сдвигах. Хотя анализ, который выполнил J. Lesurf, показывает, что при таком включении может увеличиться неравномерность частотной характеристики по напряжению в области частоты среза между громкоговорителями. Так что применение такой схемы включения требует тщательного выбора параметров.

Существенное значение для работы акустической системы с кабелем имеет выбор разъемов. Они должны обеспечивать надежное электрическое соединение и механическую фиксацию кабеля. Сопротивление контактов зависит от размеров и площади соприкасающихся поверхностей и усилий, с которыми они прижаты друг к другу. Хорошие разъемы имеют стойкое покрытие поверхностей и

выдерживают пятилетний срок интенсивной эксплуатации, именно поэтому фирмы–изготовители уделяют их конструкции серьезное внимание.

Вывод

Приведенный выше анализ и многолетний опыт использования звуковых кабелей в аппаратуре Hi-Fi показывает, что выбор кабеля, безусловно, является существенным моментом в обеспечении высокого уровня качества звучания акустических систем. Кабель должен обладать определенным набором электрических параметров и надежной конструкцией, необходимо использовать качественные материалы для проводников и изоляторов и т. д., однако применение все более сложных и дорогих конструкций кабелей с целью "существенного улучшения качества звучания АС" (по утверждению фирм-производителей) пока не имеет разумного физического объяснения.

Все материалы взяты из открытых источников, носят исключительно ознакомительный характер и предназначены для студентов кафедры звукорежиссуры ТРФ МГИК очной/заочной форм обучения, на период введённого, в связи с режимом самоизоляции, дистанционного обучения. Не для публичного распространения!

Список источников:

allprosound.ru
cambridge-mt.com
digitalmusicacademy.ru
etheroneph.com
ldsound.ru
moinf.info
prosound.ixbt.com
samesound.ru