

В предыдущих статьях журнала (№1–5, 2002 и №1, 2003) было рассказано о современных методах измерения и оценки различных видов электроакустической аппаратуры, применяемой как в профессиональных, так и домашних системах звукоусиления и озвучения. Следующую серию статей предполагается посвятить принципам конструирования и применения разнообразных типов электроакустической аппаратуры. В современных системах звукоусиления и озвучения наиболее распространенными являются рупорные громкоговорители, звуковые колонки, специальные агрегаты, порталные системы, контрольные мониторы и др. Поэтому начнем с анализа принципов проектирования и особенностей конструкции рупорных громкоговорителей, имеющих самую долгую историю применения в аудиотехнике.

Акустическая аппаратура для озвучения

Часть 1. Рупорные громкоговорители

И.А. Алдошина

Применять рупоры для усиления звука стали значительно раньше, чем обычные электродинамические громкоговорители. В большинстве духовых инструментов (конструкция которых была отработана окончательно в основном в 17 – 19 вв.), особенно в группе медных (труба, туба, валторна и др.) используется раструб (рупор) для усиления звука и концентрации его в заданном направлении (рис. 1). В первых изобретениях звуковоспроизводящих устройств, начиная с фонографа Эдисона (1896 г.), рупоры для излучателей применялись с целью увеличения громкости звука, так как мощности усилителей были еще очень малы. В 1874 г. Ernst W. Siemens впервые предложил, а в 1877 г. запатентовал в Германии и Англии два изобретения, в которых описал основные черты электродинамических громкоговорителей, которые использовались в различных промышленных конструкциях в течение долгого времени. В них предлагалось применять звуковую катушку с намотанной проволокой, движущуюся в магнитном поле, и трубу в форме раструба. Именно такие рупорные громкоговорители широко использовались в начале 20 в. для различных фонографов типа «Ортофон», «Грамофон» и др. Образцы некоторых из них показаны на рис. 2.

В большинстве рупорных громкоговорителей того времени использовались драйверы, работающие по принципу «балансирующей арматуры», одной из разновидностей электромагнитных преобразователей. В этой конструкции переменный ток подавался на катушку, расположенную на стальном стержне, который двигался за счет взаимодействия с магнитным полем и соответственно толкал конус, нагруженный на рупор.

Хотя из-за большой жесткости арматуры диапазон воспроизведения был очень ограничен, но устройство это использовалось в течение 30 лет. В первых моделях рупорных излучателей для театров были драйверы именно такого типа (рис. 3). Они же впервые были использованы для уличных систем озвучения в 1919 г. в Нью-Йорке на Park Avenue. В 1920 г. такие рупорные громкоговорители были установлены в виде кластера (типа люстры) в Чикаго на республиканском съезде, а уже в 1921 г. речь президента транслировалась 150 тыс. слушателей на площадях Нью-Йорка прямо из зала заседаний.

В 1925 г. W. Rice и E. W. Kellogg, инженеры фирмы General Electric, запатентовали основные элементы конструкции электродинамических громкоговорителей прямого излучения, которые начали широко использоваться в качестве драйверов рупорных громкоговорителей.

Однако создание реального рупорного громкоговорителя, очень близкого по своей конструкции к современному, начинается позже, с 1927 г., когда известные инженеры фирмы Bell laboratories (США) A. Thuras и D. Wente разработали и на следующий год запатентовали «компрессионный рупорный излучатель». В качестве громкоговорителя (драйвера) использовался электромагнитный преобразователь с бескаркасной катушкой, с намотанной на ребро алюминиевой лентой. Диафрагма драйвера была сделана из обращенного вниз алюминиевого купола. Уже тогда применялась и предрупорная камера и так называемое тело Венте (о них подробнее расскажем позже).

Первая серийно выпускаемая промышленностью модель 555/55W (фирма Western Electric), получившая название Vitaphone (рис. 4) нашла широкое применение в кинотеатрах 30-х годов. В ней использовался свернутый рупор с диаметром горла 2,54 см и площадью устья



Рис. 1. Труба медного духового инструмента



Рис. 2. Рупор Н.4 компании S.G. Brown (Британия)

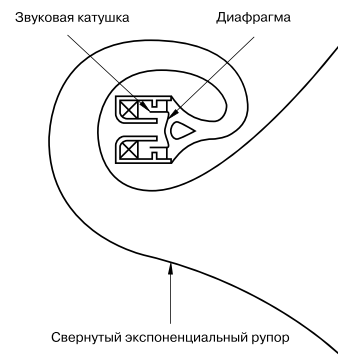


Рис. 3. Рупорный громкоговоритель 1923 г. с драйвером типа «балансированной» арматуры



Рис. 4. Мощный рупорный громкоговоритель Vitaphone (30-е г.)

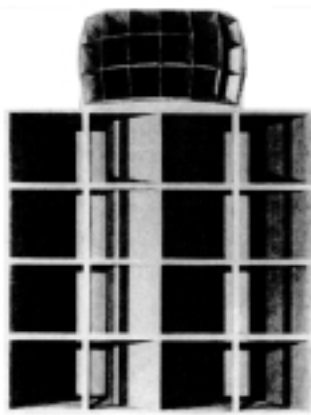


Рис. 5. Первая двухполосная рупорная акустическая система для звукового кино



Рис. 6. Высококачественная рупорная АС фирмы Klipsch

4 м², частотный диапазон составлял 100 – 5000 Гц, КПД – 25%, усилитель имел мощность 10 Вт.

Значительным шагом по пути расширения частотного диапазона рупорного излучателя вниз было английское изобретение P.Voigt, предложившего свернутые рупоры специальной конструкции под названием Tractrix. Команда P.Voigt объединилась с другой английской компанией Lowther, которая продолжает выпускать такого типа громкоговорители и до настоящего времени, пользующиеся большой популярностью.

Развитие звукового кино потребовало обеспечения хорошей разборчивости и качества звука, что послужило толчком к созданию многополосных рупорных систем: в 1936 г. D.Shearer впервые продемонстрировал двухполосную рупорную акустическую систему, состоящую из низкочастотного свернутого рупорного громкоговорителя и многоячейного высокочастотного рупорного громкоговорителя (рис. 5). Система воспроизводила диапазон частот 40 Гц – 10 кГц, имела высокую чувствительность, контролируемую характеристику направленности. В 1938 г. она получила премию Академии киноискусств и наук и стала своего рода эталоном для дальнейшего развития кинопромышленности.

Впервые сложные конструкции свернутых низкочастотных рупоров для высококачественных акустиче-

ских систем были разработаны Paul Klipsch в 1941 г. и получили название Klipschorn. На базе этой конструкции с рупорным оформлением фирма до сих пор производит высококачественные акустические системы с очень высокой репутацией среди ценителей хорошего звука (рис.6).

Необходимо отметить, что в России первые образцы рупорных громкоговорителей были созданы в 1929 г. (А.А.Харкевич и К.А.Ломагин), а уже в 1930 – 1931 гг. – мощные до 100 Вт рупорные громкоговорители для озвучения Красной и Дворцовой площадей. В 1934 – 1935 гг. был разработан самый мощный рупорный громкоговоритель на 500 Вт, который был установлен на агитсамолете «Максим Горький». В эти же годы появились двухполосные рупорные системы для систем звукоусиления в кино, театрах и т.п.

В послевоенные годы был сделан ряд принципиальных открытий в области проектирования рупорных громкоговорителей: фирма Altec Lansing предложила специальные виды остронаправленных рупоров для высокочастотников, получивших название Mantaray; фирма Western Electric создала акустические линзы для рупорных громкоговорителей (рис. 7); появились десятки новых видов рупоров и конструкций драйверов для них (о некоторых расскажем несколько позже).

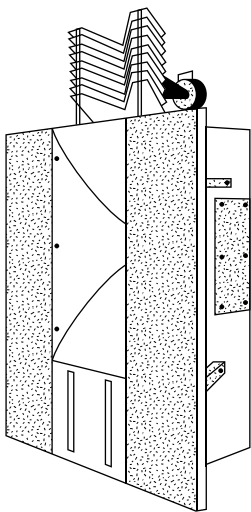


Рис. 7. Рупорные громкоговорители с акустическими линзами

Среди разнообразных конструкций низкочастотных (в основном со свернутыми рупорами), средне- и высокочастотных громкоговорителей с использованием акустических линз, многоячеистых рупоров и других можно отметить оригинальную конструкцию коаксиального громкоговорителя (рис. 8), предложенную в 50 г. фирмой Tapco, в которой совмещены два излучателя и при этом низкочастотный диффузор служит рупором для высокочастотного излучателя. Такие конструкции нашли широкое применение в контрольных агрегатах и высококачественных бытовых системах.

В настоящее время область применения рупорных громкоговорителей чрезвычайно широка, это и системы озвучения улиц, стадионов, площадей: системы звукоусиления в различных помещениях, студийные мониторы, порталные системы, бытовые высококачественные системы, системы оповещения и др.

Основные причины широкого распространения рупорных громкоговорителей заключаются в следующем: более высокий КПД, чем у обычных электродинамических громкоговорителей прямого действия (в которых он меньше 1%), что позволяет обеспечить требуемую громкость на заданной площади; регулируемая характеристика направленности; стабильность и устойчивость работы в различных условиях и др. Однако их применение создает и свои проблемы, связанные с появлением значительных нелинейных искажений при больших уровнях сигнала, искажений тембра за счет появления отраженных волн в рупоре, необходимостью значительно увеличивать размеры конструкции для эффективного воспроизведения низких частот (что заставляет использовать свернутые рупоры) и др.

Прогресс в совершенствовании их конструкции и технологии позволяет решать эти проблемы с разной степенью приближения, об этом поговорим подробнее.

Основные элементы конструкции

В соответствии с ГОСТ 16122-88 рупорный громкоговоритель определяется как «громкоговоритель, акустическим оформлением которого является жесткий рупор». Последний представляет собой трубу переменного сечения, входное отверстие которой (горло) существенно меньше, чем выходное (устье). Существуют две разновидности рупорных громкоговорителей – узко- и широкогорлые. У первых диаметр горла значительно меньше диаметра излучающей диафрагмы, и они обладают большей эффективностью; у вторых они совпадают. Оба вида находят достаточно широкое применение в технике звукоусиления.

Рупор можно прежде всего рассматривать как трансформатор акустического импеданса: основной причиной низкого КПД диффузорных громкоговорителей прямого излучения является то обстоятельство, что диафрагма колеблется в воздушной среде, разница в плотности материала диафрагмы и воздуха слишком велика, поэтому существует большая разница в сопротивлениях (импедансах), при очень низком сопротивлении нагрузки со стороны воздушной среды полезная акустическая энергия оказывается очень малой (меньше 1%), остальная часть рассеивается на тепло в звуковой катушке, на потери в подвесах, диафрагме и др. Рупор слу-

жит для согласования сопротивлений механических колебаний диафрагмы и воздушной среды. Входное отверстие (горло) создает дополнительную нагрузку для диафрагмы, увеличивая тем самым импеданс излучения и повышая эффективность (тем больше, чем меньше его диаметр).

Кроме того, на низких частотах, когда длина волны больше размеров излучателя, вокруг него распространяется сферическая волна, при этом на низких частотах излучение мало, преобладает реактивное сопротивление. По мере повышения частоты возрастает активное сопротивление, которое в сферической волне равно $R_{изл} = c\rho S(ka)^2/2$ (в плоской волне оно больше и равно $c\rho S$), где S – площадь излучателя, a – радиус, c – скорость звука, ρ – плотность воздуха, k – волновое число, равное отношению частоты к скорости звука, $k = \omega/c$. Особенностью сферической волны является еще и то, что в ней давление быстро падает обратно пропорционально расстоянию – $p \sim 1/r$.

Задача рупора состоит в том, чтобы уменьшить «растекание» энергии, т.е. быстрый спад звукового давления, и трансформировать форму фронта волны так, чтобы он приближался к плоской волне, что увеличивает сопротивление излучения (в плоской волне оно выше, чем в сферической) и уменьшает скорость убывания давления. Для обеспечения этого требования должна быть выбрана специальная форма образующей рупора.

Рупор должен обеспечить оптимальные условия для излучения волны из устья в окружающую среду, для чего необходимо иметь достаточно большой диаметр устья рупора. В узких трубах большая часть энергии отражается обратно, создавая стоячие волны (это явление используется в музыкальных духовых инструментах), если отверстие трубы становится больше, то $R_{изл}$ приближается к $c\rho S$, т.е. сопротивлению плоской волны в воздухе, и волна беспрепятственно выходит наружу. При этом уменьшается доля отраженной энергии и увеличивается доля излученной (уменьшается наложение прямой и обратной волн).

Также задача рупора – направлять излучаемую акустическую энергию внутрь определенной области пространства, т.е. обеспечивать заданную характеристику направленности.

Эти свойства имеют следующие последствия:

- дополнительная нагрузка со стороны рупора позволяет диафрагме для заданного уровня звукового давления двигаться с меньшей амплитудой, что обеспечивает низкий уровень нелинейных искажений;
- диафрагму в рупорных громкоговорителях можно использовать меньшую по размерам и массе для получения того же уровня звукового давления, что и в диффузорных ГГ, а это уменьшает уровень переходных искажений;
- малые смещения диафрагмы позволяют применять более короткую по намотке звуковую катушку, что уменьшает ее массу и снижает нелинейные искажения, так как она колеблется в симметричном магнитном поле. Обычно в драйверах (излучателях) рупорных ГГ используют мощные магнитные цепи для получения больших мощностей;

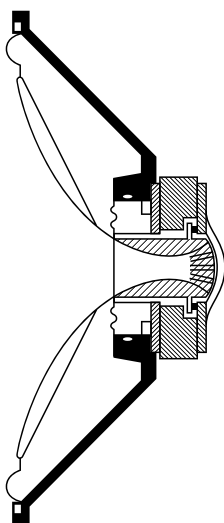


Рис. 8. Коаксиальные рупорные громкоговорители

- увеличение эффективности ГГ обеспечивает усилителям работу без перегрузок и воспроизводство без искажений больших уровней звукового давления.

В целом это дает возможность получить большую динамику, меньше искажения и лучшие переходные искажения, а также меньше перегружать усилитель.

Однако использование рупорных громкоговорителей вызывает свои проблемы:

- для получения низких частот необходимо значительно увеличивать размеры рупора (о причинах этого явления мы поговорим позже). Для самых низких частот его размеры становятся непригодными для жилых помещений, поэтому приходится применять различные конструктивные усложнения: свернутые рупоры и т.д.;
- имеются предубеждения, что «типичный» рупорный звук похож на мегафон, но это не так, рупорные ГГ, правильно сконструированные, могут дать «плотный», динамичный, чистый, детальный звук. Неудивительно, что, например, фирма JBL применяет их в высококачественных контрольных агрегатах;
- звук рупорных ГГ весьма чувствителен к акустическим параметрам помещения и другим элементам системы;

- при очень больших уровнях звукового давления в горле рупора возникают специфические нелинейные искажения за счет сжатия объема воздуха в предрупорной камере.

Все эти требования и ограничения обуславливают выбор основных элементов рупорных громкоговорителей.

Начнем с выбора формы рупора.

Для обеспечения условия максимального увеличения нагрузки на диафрагму (импеданса нагрузки) необходимо, чтобы площадь горла была существенно меньше площади диафрагмы: $S_{горла} \ll S_{диафр}$.

Для того чтобы звуковая волна эффективно излучалась через устье рупора и при этом не происходило отражения энергии обратно (что приводит к установлению стоячих волн), устье рупора должно иметь достаточно большую площадь. Связь между площадью сечения устья $S_{устья}$ и нижней излучаемой частотой рупора $f_{кр}$ может быть представлена в виде:

$S_{устья} = (1/4\pi)(c/f_{кр})^2$, где c – скорость звука. Отсюда для получения нижней частоты, например 50 Гц, необходимо выбрать площадь устья 3,8 м². Правда, с учетом условий размещения рупора эта величина может быть уменьшена, так, для углового размещения можно разделить на коэффициент 8, для размещения на стене – на коэффициент 4 и т.д.

Таким образом, рупор должен иметь небольшие размеры горла, причем сечение у горла должно медленно возрастать; размеры же устья должны быть достаточно велики, чтобы звуковая волна в основном излучалась во внешнюю среду, а не отражалась внутрь.

Чтобы большие размеры устья могли быть достигнуты при приемлемой осевой длине рупора, скорость возрастания сечения рупора должна увеличиваться пропорционально увеличению сечения: тем медленнее, чем оно меньше, и тем быстрее, чем больше сечение. Этому требованию отвечает экспоненциальная форма рупора, которая математически выражается так:

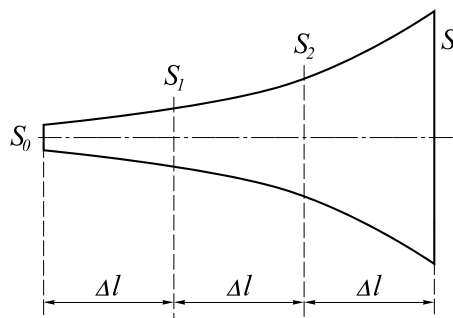
$S_x = S_0 e^{\beta x}$, где S_0 – площадь сечения горла рупора;

e – основание натуральных логарифмов; S_x – площадь сечения рупора на произвольном расстоянии x от горла; β – показатель расширения рупора. Единицей измерения β является 1/м.

Показатель расширения рупора есть величина, измеряемая изменением сечения рупора, приходящимся на единицу его осевой длины. Экспоненциальный рупор изображен на рис. 9, где показано, что отрезку осевой длины рупора Δl соответствует постоянное относительное изменение сечения.

Анализ волнового процесса, происходящего в экспоненциальном рупоре, показывает, что сопротивление излучения Z , на которое нагружен излучатель, зависит от частоты. Сопротивление является комплексной величиной и имеет две составляющие – активную R и реактивную X : $Z=R+iX$.

Представленная на графике (рис. 10) зависимость импеданса от частоты для экспоненциального рупора показывает, что на низких частотах преобладает реактивная составляющая сопротивления, это свидетельствует, что на этих частотах рупор не излучает энергию в пространство, поскольку реактивная составляющая



$$\frac{S_1}{S_0} = \frac{S_2}{S_1} = \frac{S_1}{S_2} = const$$

Рис. 9. Изменение сечения экспоненциального рупора

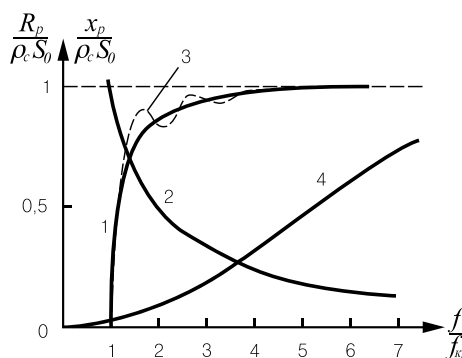


Рис. 10. Зависимость импеданса излучения от частоты для экспоненциального и конического рупора: 1 – активная часть сопротивления; 2 – реактивная часть сопротивления; 3 – активная часть с учетом отраженных волн; 4 – активная часть сопротивления для конического громкоговорителя

представляет собой просто дополнительную массу, колеблющуюся вместе с диафрагмой. Начиная с некоторой частоты, называемой критической частотой, активная составляющая сопротивления излучения, которая и определяет излучаемую акустическую мощность, начинает возрастать.

На частоте, которая примерно на 40% выше критической, активное сопротивление излучения превышает реактивное, поэтому излучение становится достаточно эффективным. Как следует из графика, на частотах, более чем в четыре раза превышающих критическую частоту, сопротивление излучения остается постоянным. Критическая частота зависит от формы образующей, как видно из рис. 10 у конического рупора активная составляющая сопротивления имеет значительно менее крутой подъем к высоким частотам и, следовательно, гораздо более высокую критическую частоту. Поэтому большинство рупорных громкоговорителей использует рупоры с криволинейной формой образующих: экспоненциальной, гиперболической, типа Tractrix (о последней расскажем позже).

Критическая частота экспоненциального рупора зависит от показателя расширения рупора следующим образом: $f_{кр} = \beta c / 4\pi$, где c – скорость звука. Из этого соотношения видно, что критическая частота тем выше, чем круче расходуется образующая, т.е. чем выше показатель расширения β , поэтому для снижения нижней границы частотного диапазона применяют пологие рупоры.

От показателя расширения рупора зависит не только величина критической частоты рупора, а следовательно, и частотная характеристика сопротивления излучения, но и габариты рупора. Осевая длина рупора может быть определена из формулы для экспоненциального рупора следующим образом:

$$L = (c/4\pi f_{кр}) \ln S_L/S_0.$$

Из этого выражения следует, что для расширения частотного диапазона в сторону низких частот, т.е. снижения $f_{кр}$, следует увеличивать длину рупора. Именно поэтому музыкальные инструменты, предназначенные для низких регистров, делают с длинными изогнутыми трубами длиной до 5 м (см. рис. 1). В громкоговорителях применяют для этой цели «свернутые» рупоры (рис. 11).

Следует указать, что при построении графика сопротивления излучения экспоненциального рупора (см. рис. 10) не учтено отражение волн от устья внутрь рупора. В любых рупорах конечной длины акустическое сопротивление воздуха, заключенного в рупоре, значительно отличается от акустического сопротивления неограниченного пространства, при этом устье рупора является границей раздела двух акустических сред. Отраженная от устья рупора волна, складываясь с прямой волной, идущей от излучателя, образует в рупоре стоячую волну. Положение пучностей и узлов стоячей волны зависит от частоты колебаний излучателя. При изменении фазы стоячей волны у излучателя то увеличивается, то уменьшается звуковое давление, вследствие чего резко изменяется сопротивление излучения. Оно лишь приближенно стремится к графику, изображенному на рис. 10. Отражение звука от ус-

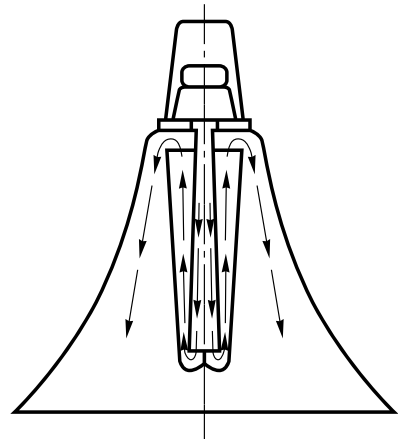


Рис. 11. «Свернутый» рупор

тья рупора происходит только в области нижних частот (чем больше площадь устья, тем ниже граница этой области). При увеличении частоты акустические свойства сред (в рупоре и вне его) выравниваются, отражения звука внутрь рупора не происходит, и сопротивление излучения остается почти постоянным.

Таким образом, анализ сопротивления излучения экспоненциального рупора показывает, что на частотах ниже критической величина этого сопротивления очень мала, по мере увеличения частоты сопротивление излучения быстро возрастает, но сильно изменяется с частотой, достигая то максимальных, то минимальных значений, в области же средних и верхних частот (где длина волны соизмерима с диаметром устья рупора) сопротивление излучения остается примерно постоянным, что обеспечивает плоскую форму АЧХ.

Выходной размер рупора определяет и направленность его излучения. При больших размерах выходного отверстия коэффициент концентрации (определение его дано в статье «Акустические измерения» ч.2) в рупорных громкоговорителях достигает значения равного на средних частотах 30 – 50. Такая большая концентрация позволяет создавать большое осевое звуковое давление и направлять излучаемую энергию в заданном направлении.

Таким образом, рупор за счет согласования сопротивления излучения с окружающей средой дает возможность увеличить излучаемую акустическую мощность и обеспечить ее концентрацию в заданном направлении. Выбирая форму и размеры рупора, можно регулировать ширину частотного диапазона и зависимость коэффициента концентрации от частоты, именно на это и направлены усилия разработчиков ведущих фирм – производителей рупорных громкоговорителей, например таких как JBL, Altec-Lancing, Reavey и др. О наиболее интересных конструкциях будет рассказано далее.

Продолжение следует.