

Резонатор Гельмгольца в малогабаритной АС

А. ШИХАТОВ, г. Москва

В статье предлагается конструкция малогабаритной низкочастотной АС с акустическим режекторным фильтром на основе резонатора Гельмгольца и методика расчета подобных громкоговорителей.

Кто мешает тебе выдумать порох непромокаемый?

К. Прутков

Акустика — одна из прикладных дисциплин, где влияние резонанса особенно ощутимо. Поскольку рабочая полоса низкочастотных динамических головок захватывает область основного механического резонанса, степень его демпфирования оказывает значительное влияние на характер звучания акустической системы (АС) в этом диапазоне частот.

Резонансы в громкоговорителях должны быть эффективно подавлены, в противном случае звучание будет сопровождаться нежелательными призвуками (гулом, "бубнением"). Причем при избыточной добротности готового громкоговорителя подавить основной резонанс НЧ головки невозможно даже при использовании современных усилителей с высоким коэффициентом демпфирования. В этом случае можно перейти к акустическим методам демпфирования.

В каноническом виде резонатор Гельмгольца представляет собой сосуд сферической формы с открытой горловиной (рис. 1). Воздух в горловине является колеблющейся массой, а объем воздуха в сосуде играет роль упругого элемента. Разумеется, это деление условно, но при достаточно большом

Например, для сосуда объемом 1 л с горловиной длиной 1 см и сечением 1 см² частота резонанса составит примерно 170 Гц. Обратите внимание, что длина волны для этой частоты составляет около 2 м, что значительно больше характерных размеров резонатора.

Кстати, череп, как и любая замкнутая полость с отверстием, тоже является резонатором Гельмгольца. По некоторым данным, резонансной областью для черепа являются частоты 20...25 Гц. Как известно, облучение человека звуковыми колебаниями частотой 25 Гц в течение 30 мин при достаточной интенсивности источника вызывает эпилептический припадок — так что поаккуратнее с сабвуферами!

Фазоинвертор громкоговорителя — это все тот же резонатор Гельмгольца, возбуждаемый изнутри, и в этом случае он играет роль акустического "усилителя". Если такой резонатор возбуж-

для частичного подавления первой и второй гармоник сетевой частоты лампового усилительного тракта (на конденсаторах фильтра выпрямителя там явно сэкономили). Кроме того, режектор устранял неизбежный "горб" на АЧХ, характерный для обычных в то время высокодобротных динамиков ($Q_{ts} > 1$). Конструктивно фильтр представлял собой отдельный объем в корпусе АС, отделенный от основного перегородкой с двумя отверстиями диаметрами 23 и 31 мм. Общий объем АС был значительно больше — примерно 80 л.

В конструкции современных акустических систем, однако, резонатор Гельмгольца используется крайне редко. Например, в сверхкомпактном автомобильном сабвуфере Pioneer TS-WX30 режекторный фильтр предназначен для подавления струйных шумов фазоинвертора (рис. 2, рис. 3) [1].

Применение резонатора Гельмгольца очень перспективно при создании малогабаритных акустических систем



Рис. 3

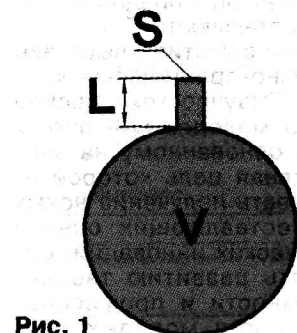


Рис. 1

значении отношения площади отверстия к площади сечения полости точность такого приближения вполне удовлетворительна. Основная часть кинетической энергии колебаний оказывается сосредоточенной в горле резонатора, где колебательная скорость частиц воздуха имеет наибольшую величину.

Собственную частоту резонатора Гельмгольца определяют по формуле

$$F = \frac{C_0}{2\pi} \sqrt{\frac{S}{VL}}, \quad (1)$$

где F — частота, Гц; C_0 — скорость звука в воздухе (340 м/с); S — сечение отверстия, м²; L — длина отверстия, м; V — объем резонатора, м³.

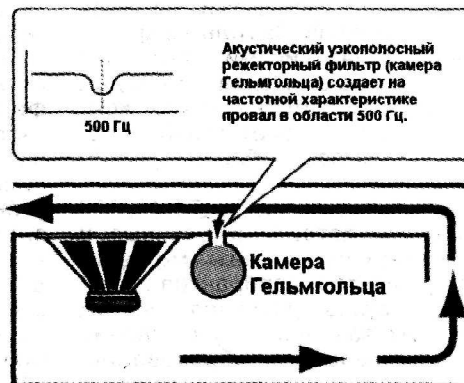


Рис. 2

дать снаружи, он становится режекторным фильтром, поглощающим энергию внешних колебаний. Глубину режекции можно изменить, увеличив потери в горле резонатора с помощью звукопоглощающего материала или уменьшив сечение отверстия.

В акустической системе первой очереди стереофонической радиолы "Симфония" в качестве низкочастотного двухчастотного режекторного фильтра использовался резонатор Гельмгольца. Частоты настройки составляли 50 и 100 Гц, а режектор предназначался

на основе высокочастотных динамических головок.

В малогабаритных громкоговорителях закрытого типа традиционно используют динамические головки с низкой добротности ($Q_{ts} = 0,3...0,4$) с низкой частотой собственного резонанса $F_s = 20...25$ Гц. После установки в закрытый корпус упругость воздуха в объеме этого корпуса складывается с упругостью подвеса, в результате чего частота резонанса и полная добротность возрастают до оптимальных значений — соответственно $F_s = 40...50$ Гц и $Q_{tc} = 0,7...0,8$. Однако снижение добротности и частоты основного резонанса таких головок достигнуто ценой значительного увеличения массы подвижной системы, что приводит к понижению чувствительности до 82...84 дБ/Вт/м. В результате для возбуждения низкоэффективной АС требуется усилитель значительной мощности — многие десятки и даже сотни ватт.

Очевидно, что повышение чувствительности АС до значений 90...92 дБ/Вт/м позволит снизить потребляемую мощность усилителя до 30...40 Вт. Как известно, для повышения чувствительности АС следует выбирать головки с повышенной полной добротностью ($Q_{tc} = 0,7...1$). Частота основного резонанса таких головок при умеренно жестком подвесе не может быть слишком низкой

($F_c = 40...70$ Гц), поэтому эквивалентный объем V_{as} измеряется десятками литров. При установке подобной головки в корпус небольшого объема частота резонанса и добротность возрастут до недопустимых значений ($Q_{tc} = 1,5...2$; $F_s = 100...150$ Гц). Но это обстоятельство меньше всего волнует разработчиков дешевых музыкальных центров. Впрочем, гулкий, "размытый" бас возникает не только от этого.

Предлагается способ решения этой проблемы — подавление резонансного "горба" режекторным фильтром в виде резонатора Гельмгольца, что позволит сохранить высокую чувствительность громкоговорителя и получить гладкую АЧХ. Немаловажно и то, что размеры резонатора малы в сравнении с длиной волны гасимых колебаний и габариты АС существенно не увеличиваются.

При разработке конструкции такого громкоговорителя необходимо измерить или рассчитать частоту резонанса головки в корпусе заданного объема. Затем рассчитываем на эту частоту резонатор Гельмгольца. Естественно, для расчета нужно брать объем корпуса за вычетом объема, занимаемого динамической головкой. Этот объем упоминается далеко не всегда; для головок диаметром 13—16 см его можно принять равным 0,5...1 л и 1...1,5 л для головок диаметром 20—25 см. Можно измерить объем, занимаемый головкой, методом вытеснения соответствующего объема воды, упаковав динамик в полиэтиленовый пакет. Топить его полностью не обязательно — достаточно погрузить в воду магнитную систему и большую часть диффузора-держателя.

Для расчета частоты резонанса головки можно воспользоваться известной формулой

$$F_c = F_s \sqrt{1 + \frac{V_{as}}{V_c}} \quad (2)$$

где F_c — частота резонанса головки в закрытом оформлении, Гц; F_s — частота основного резонанса головки в свободном пространстве, Гц; V_{as} — эквивалентный объем, л; V_c — объем корпуса, л.

Теперь на эту частоту нужно рассчитать резонатор Гельмгольца, предварительно выбрав объем режекторной камеры. Для эффективного поглощения он должен составлять 10...30 % объема основной камеры. Понятно, что чем больше добротность динамической головки (и выше резонансный пик), тем больший объем камеры нужен, но пока здесь чистейшая эмпирика, математического аппарата у автора нет.

Если в формуле (1) выразить площадь отверстия через диаметр, раскрыть радикалы и сократить, получим выражение для определения диаметра отверстия (рис. 4):

$$d = \frac{4F}{C_0} \sqrt{\pi V L} \quad (3)$$

где F — частота, Гц; C_0 — скорость звука в воздухе (340 м/с); d — диаметр отверстия, м; L — длина отверстия (толщина перегородки), м; V — объем резонатора, м³.

Просто? Но только на первый взгляд. Этих формул достаточно для расчета

корпусов объемом в десятки литров (как в "Симфонии"). Но при разумном объеме режекторной камеры (до 3...5 л, иначе АС уже не будет малогабаритной) и толщине перегородки 8...10 мм диаметр отверстий получается смешотворно малым — миллиметры. Для таких малых отверстий необходимо учитывать пограничный слой воздуха вдоль отверстия (в идеале и чистоту обработки его поверхности) — в результате эффективный диаметр отверстия меньше физического на 1...3 мм. Очевидно, что этого недостаточно для подавления серьезного резонанса, и эффективность подобного фильтра близка к нулю. Экспериментальная проверка на макете двухкамерной АС подтвердила предположение — потребное по формуле (3) отверстие диаметром 5 мм никак не повлияло ни на частоту резонанса, ни на "бубнение".

Для решения этой проблемы есть два способа. Первый — увеличить глубину отверстия, т. е., по существу, перейти к внутреннему фазоинвертору. Причем его необходимо разместить в основном объеме корпуса (рис. 5) — в противном случае занимаемый тоннелем объем придется вычесть из объема режекторной камеры, что усложнит расчет.

Второй способ — сохранив диаметр отверстий, увеличить их число; перегородка при этом превратится в разновидность панели акустического сопротивления (ПАС). Таким образом, каждое отверстие будет представлять собой отдельную колебательную систему со своей собственной частотой резонанса. Для расширения полосы подавления можно разнести частоты настройки (как это делается в многоконтурных полосовых LC-фильтрах).

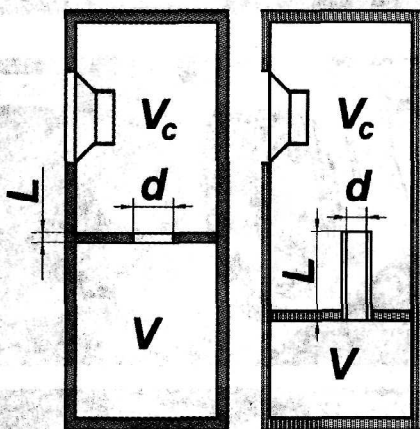


Рис. 4

Рис. 5

Однако четкого критерия для определения числа отверстий у автора нет. С одной стороны, их не должно быть слишком много, иначе нарушатся условия работы резонатора. Суммарная площадь отверстий не должна превосходить 10 % эффективной площади сечения режекторной камеры (критерий максимума). С другой стороны, из опыта изготовления ПАС (популярных 30—40 лет назад) известно, что суммарная площадь отверстий должна быть соизмерима с площадью диффузора (критерий минимума).

Эти критерии при определенных условиях могут противоречить друг другу, но здравый смысл подсказывает, что суммарная площадь отверстий должна быть не меньше 10 % от площади диффузора:

$$0,1 S_{диф} \leq \sum S_{отв} \leq 0,1 V^{2/3} \quad (4)$$

Такое акустическое оформление использовано автором при разработке относительно компактных низкочастотных автомобильных АС — полный объем корпусов не превышает 10,5 л. Громкоговорители установлены под передними сиденьями автомобиля Renault Kangoo [2] и работают в низкочастотном звене системы с многополосным усилением, номинальная подводимая мощность составляет 35 Вт.

Для реализации проекта были выбраны автомобильные эллиптические низкочастотные головки из комплекта трехполосной АС Prology Iridium IX-69.3с [3]. Их параметры вполне типичны для головок средней ценовой категории: размеры — 6"×9" (160×230 мм); площадь диффузора $S_{диф} = 250$ см²; эквивалентный объем $V_{as} = 40$ л; частота основного резонанса $F_s = 40$ Гц; полная добротность $Q_{ts} = 0,6$; чувствительность $SPL = 92$ дБ/Вт/м; максимальная мощность $P_{max} = 40$ Вт.

Головки такого типа предназначены для работы в акустическом экране или в корпусе значительного объема — не менее 80 л. Доступный для установки динамиков объем — 7,5...8 л (левый и правый корпуса несколько различаются). По всем канонам ничего хорошего ждать не приходится — в таком корпусе частота резонанса и полная добротность (по формуле 2) составят $F_c = 97...100$ Гц, $Q_{tc} = 1,47...1,5$. Для классического закрытого корпуса на редкость отвратительные характеристики, не так ли? И это еще не самый худший вариант, поскольку данный тип динамиков выбран с учетом частоты резонанса. Для динамиков 6"×9" массовых серий частота $F_s = 50...60$ Гц и показатели будут еще хуже.

В качестве разумного компромисса между желаниями и возможностями был выбран объем режекторной камеры 1 л. Толщина перегородки — 8 мм. По формуле (3) получаем диаметр отверстия 5,7 мм. Чтобы компенсировать неизбежные погрешности расчета и изготовления, разброс и изменение характеристик динамических головок со временем, резонатор выполнен двухчастотным. Частоты поглощения разнесены выше и ниже расчетной частоты резонанса таким образом, что их среднее геометрическое совпадает с ней. Для этого в перегородке выполнено 50 отверстий диаметром 5 мм и 30 отверстий диаметром 6,5 мм. Частоты настройки — соответственно 85 и 110 Гц (формула 1). Суммарная площадь отверстий составляет 20 см² и распределена между отверстиями разного диаметра примерно поровну.

Результаты измерений готовой АС могут показаться фантастическими: частота резонанса — 55...58 Гц, добротность — 0,83...0,85. Уверенно и без искажений воспроизводится диапазон от 50 Гц, с незначительными искаже-

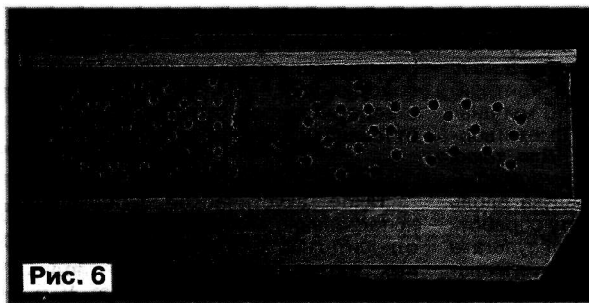


Рис. 6

Готовый корпус зашпаклеван, обработан шлифовальной машиной, покрыт автомобильной мастикой "Антигравий", затем окрашен. На лицевую панель наклеен декоративный алюминированный пластик. К шпангоуту прикреплен кусок мягкого поролона, выполняющий функции

звукопоглотителя; для подключения проводов на боковой стенке установлена стандартная чашка с пружинными контактами.

Некоторые этапы изготовления АС представлены в иллюстрациях. Так, на фото рис. 6 показаны перегородка и режекторная камера в процессе изготовления, вид сзади. В перегородке видны отверстия; задняя и боковые стенки режекторной камеры еще не установлены. На фото рис. 7 — перегородка и режекторная камера в процес-

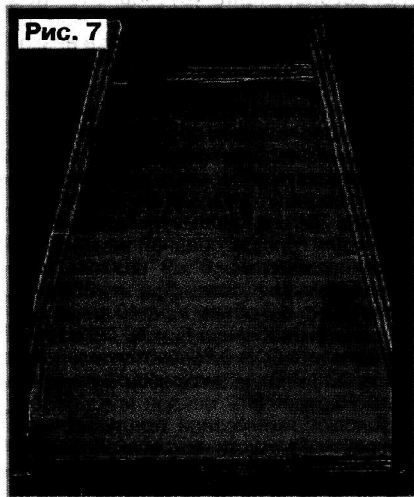


Рис. 7

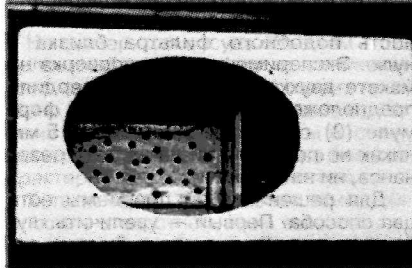


Рис. 10

се изготовления, вид сбоку. Хорошо видно поперечное сечение корпуса и стыки деталей. На фото рис. 8 показана герметизация режекторной камеры (вид спереди). Задняя и боковые стенки режекторной камеры приклеены. На фото рис. 9 в отверстии левого корпуса (вид спереди) виден шпангоут. На фото рис. 10 показан этап отделки панели, а к шпангоуту прикреплен поролон. На фото рис. 11 — готовая АС. Ее левый и правый громкоговорители устанавливаются под передними сиденьями, как показано на фото рис. 12.

Чертежи корпуса не приводятся намеренно. Во-первых, для домашней акустики столь причудливые формы совершенно не нужны — они имеют смысл только для Renault Kangoo именно в этой комплектации, именно с такими сиденьями (поэтому на корпусе под левым сиденьем появился скос). Габариты определялись "по месту" с помощью картонных шаблонов, затем — картонного макета корпуса. Во-вторых, акустическое оформление рассчитано не только под определенную модель, но и под совершенно конкретные экземпляры динамиков. Это не означает, что для повто-

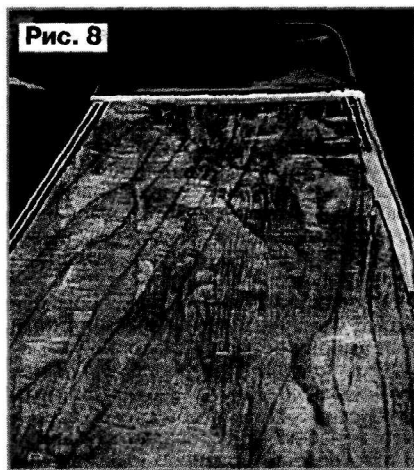


Рис. 8

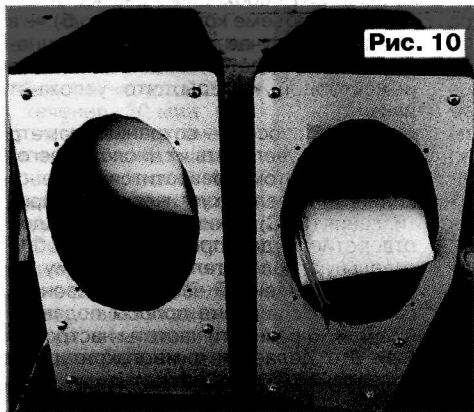


Рис. 11

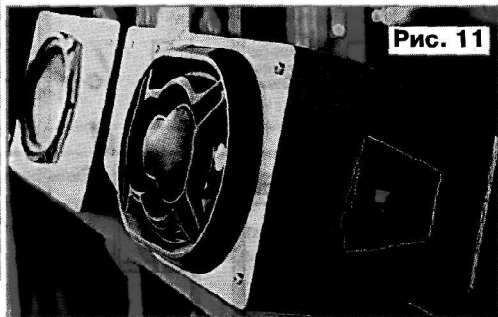
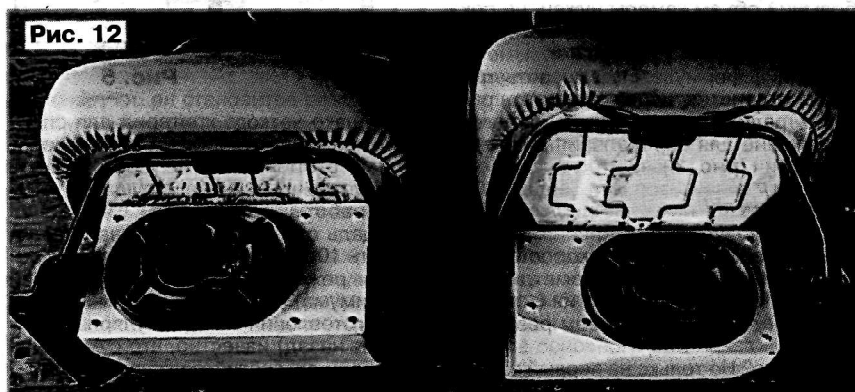


Рис. 12



ниями и ослаблением — от 40 Гц. Звучание музыкальных композиций отличается плотным и мягким басом.

Корпуса АС выполнены из традиционных материалов — фанеры и МДФ на эпоксидном клее. В средней части корпуса установлен укрепляющий шпангоут. Для повышения жесткости верхней и нижней стенок в промежутках между шпангоутом и боковыми стенками вклеены пластины МДФ (ламинат), затем стенки залиты сплошным слоем эпоксидной смолы и прогреты феном. Задняя стенка поглотительной камеры, верхний и нижний скосы выполнены из МДФ. Толщина стенок корпуса достигает 30 мм, продолжительность сушки перед финишной обработкой корпуса — 12 дней.

рения нужно искать именно Prology Iridium IX-69 и никакие другие — но для других динамических головок и параметры будут другие, поэтому весь расчет придется проделать заново. И для достижения максимального результата лучше параметры измерить, а не брать из справочника — отклонения бывают довольно значительными.

Предложенная методика применима и к расчету домашней АС. По-

скольку массогабаритные показатели там не столь существенны, к проектированию можно подходить более гибко — начиная с выбора динамических головок. Средне- и высокочастотные громкоговорители домашней АС, а также разделительные фильтры следует выбирать исходя из оптимального сопряжения границ рабочей полосы частот для используемых головок.

ЛИТЕРАТУРА

1. **Шихатов А.** Акустические резонаторы. — Мастер 12 вольт, 2004, № 55.
2. **Шихатов А.** Угрошение резонанса. — Мастер 12 вольт, 2005, № 68.
3. Компонентная акустика Prology IX-69.3с. — <<http://www.prology.ru/good/294>>.

Редактор — А. Соколов, иллюстрации — автора