

# Акустическая аппаратура для озвучения

## Часть 4. Мощные низкочастотные акустические блоки (band-pass)

**И.А. Алдошина**

В предыдущих статьях был выполнен анализ наиболее распространенных типов акустических излучателей для систем озвучения и звукоусиления: рупорных громкоговорителей и звуковых колонок. При всех преимуществах, которые они обеспечивают – регулируемая характеристика направленности и большой уровень звукового давления, – для них характерны проблемы при воспроизведении низких частот, поскольку для расширения низкочастотного диапазона требуется значительное увеличение их габаритов. Попытки воспроизвести низкие частоты с помощью звуковых колонок привели к созданию особых двухполосных акустических систем, получивших название «музыкальные колонки», где для воспроизведения низких частот использовались большие низкочастотные громкоговорители, а остальной диапазон воспроизводился с помощью набора СЧ/ВЧ-громкоговорителей. Однако этот компромисс приводил к значительному увеличению габаритов и веса, уменьшал возможности регулирования характеристик направленности и т.д.

В связи с этим на протяжении уже нескольких лет ведутся работы на ряде известных фирм по поиску таких конструкторских решений при создании мощных акустических систем для озвучения различных помещений, которые позволяли бы воспроизводить низкие частоты, т.е. обеспечивать качественное воспроизведение музыкальных программ, но при этом сохраняли бы приемлемые габариты и вес, позволяющие их подвешивать на стенах и устанавливать в помещении.

Различные фирмы добились необходимых результатов разными конструктивными способами, однако поскольку имеется много общего в их конструктивном исполнении, рассмотрим основные технические решения на примере одной из самых удачных конструкций: мощной широкополосной акустической системы для озвучения Acoustimass Professional Speaker system фирмы Bose (рис. 1).

Фирма Bose была основана в 1964 г. профессором Массачусетского Института технологии (MIT) доктором Amar G. Bose и все эти годы, наряду с разработкой акустической аппаратуры для озвучения помещений и автомобилей, для систем «Домашнего театра» и

Примечание. Начало см. «Install Pro», 2003, №2, 3, 5 (21, 22, 24)

др., она уделяла большое внимание научным исследованиям, поэтому ей принадлежит приоритет в создании таких технических решений, как Direct/Reflecting Speaker Technology, Acoustic Waveguide Technology, Acoustimass Speaker Technology и др.



**Рис.1. Мощный акустический агрегат для озвучения Acoustimass Professional Speaker System**



**Рис.2. Структура отраженных звуков в помещении**



**Рис.3. Акустическая система для работы на отраженных звуках (при установке в углу помещения)**



**Рис.4. Корпус, изготовленный по технологии Acoustic Waveguide**

В основе первого решения лежит мысль о том, что подавляющая часть энергии в помещении поступает к слушателю в виде отраженных звуков (рис. 2), поэтому была создана акустическая система с таким размещением громкоговорителей, чтобы они излучали в основном в сторону боковых стен и к слушателю приходила акустическая энергия в виде отраженных лучей (с соотношением отраженного звука к прямому 8:1) (рис. 3). С 1967 г. Bose постоянно использует этот принцип построения для своих акустических систем различного применения в кино, системах мультимедиа и др.

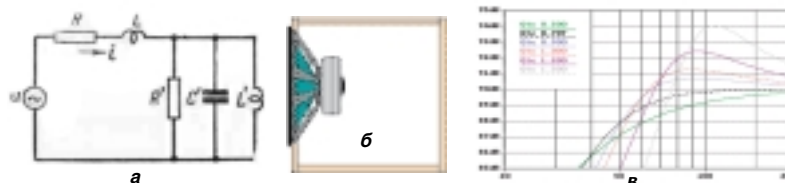
Второе направление – Acoustic Waveguide Technology включает в себя использование особой формы низкочастотного акустического оформления. Как известно (постараемся в дальнейшем рассказать об этом подробнее), в качестве низкочастотного оформления в акустических системах применяются десятки различных вариантов корпусов, среди них, в частности, оформления с фазоинвертором типа лабиринт или трансмиссионная линия, использование которых позволяет снизить частоту настройки фазоинвертора. Фирма предложила один из вариантов лабиринта, т.е. корпус низкочастотного громкоговорителя нагружен на длинную свернутую трубу с выходом на фазоинвертор, что позволяет существенно снизить частоту настройки фазоинвертора и тем самым увеличить уровень давления в области самых низких частот. Например, в корпусе высотой 30 см удалось разместить трубу длиной 2 м (рис. 4).

Наконец, Acoustimass Speaker Technology, в основе которой принцип построения оформлений для низкочастотных блоков. Она используется для создания мощных акустических агрегатов, предназначенных для озвучения больших пространств. В последние годы, особенно в связи с развитием аппаратуры для систем Surround Sound, начали активно использоваться принципы раздельного воспроизве-

дения низких частот с помощью отдельных субвуферов. Поскольку слух плохо локализует частоты до 200 Гц, применение таких блоков позволяет размещать их в любом месте помещения, что конструктивно очень удобно. Для корпусов таких низкочастотных блоков в настоящее время широко используется конструкция, получившая название «полосовой фильтр» (band-pass), хотя и другие виды оформлений также находят свое применение.

Как известно, наибольшее распространение среди бытовых и профессиональных акустических систем имеют низкочастотные оформления типа «закрытый корпус» и «корпус с фазоинвертором» (о принципах работы которого, надеюсь, удастся поговорить в дальнейшем). Закрытый корпус, конструкция, эквивалентная схема и форма АЧХ которого для разных значений добротности показаны на рис. 5, позволяет получить гладкий спад на низких частотах и низкий уровень переходных искажений, но не дает возможности увеличить уровень отдачи на низких частотах при сохранении небольших габаритов.

Для решения этой задачи был предложен в 30-е годы тип оформления «фазоинвертор» (рис. 6), который при правильной настройке позволяет увеличить эффективность излучения на низких частотах. Однако возможности для изменения параметров в процессе настройки в таких системах очень ограни-



**Рис.5. Закрытый корпус: а – общий вид; б – эквивалентная схема; с – форма АЧХ при разных значениях добротности**

чены. Именно стремление сохранить высокую эффективность излучения при ограниченных размерах, обеспечив при этом возможность широкого варьирования параметрами, привело к созданию нового типа оформления, получившего название «полосовой фильтр» (рис. 7).

Первый патент на такую конструкцию получил A.d'Alton в 1934 г. Следующий патент был выдан аспиранту Массачусетского Университета Н. Lang в 1954 г. Однако интерес серьезных фирм-производителей к этому виду оформления возник только после доклада L. Fincham на 63-м конгрессе AES в 1979 г. Учитывая, что L. Fincham был в то время руководителем всемирно известной фирмы KEF, выпускающей лучшие мировые системы категории Hi-Fi, неудивительно, что к его мнению научный мир прислушался очень внимательно. В 1982 г. два французских инженера Augris и Santens опубликовали во французском журнале методику расчета таких оформлений. Вскоре после этого в 1985 г. фир-



**Рис.6. Корпус с фазоинвертором**



**Рис.7. Оформление типа «полосовой фильтр» четвертого порядка**

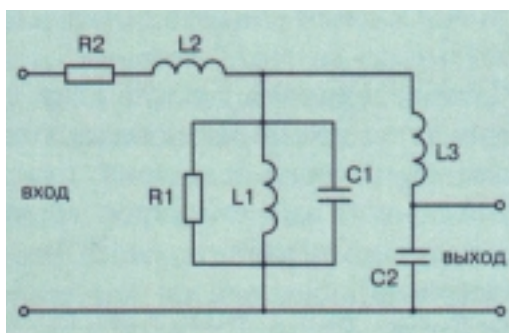


Рис.8. Эквивалентная схема оформления типа «полосовой фильтр» четвертого порядка

ма Bose получила патент на новую разновидность оформления с двумя фазоинверсными камерами (band-pass шестого порядка), который и был использован при создании акустической системы Acoustimass. На 81-м конгрессе AES выступил с докладом, посвященным проектированию корпусов такого типа, известный специалист Е. Geddes, что также способствовало популяризации этих видов оформлений. Наконец, в 1988 г. статья Augris и Santens была переведена на английский язык и опубликована в журнале *Speaker Builder*, после чего начался настоящий бум в создании таких низкочастотных оформлений. В настоящее время они очень широко используются в проектировании низкочастотных блоков, применяемых в акустической аппаратуре при озвучении, в автомобильных системах, в системах для «Домашнего театра» и т.д.

Чаще всего в современных моделях субвуферов используются два вида таких оформлений (хотя имеются и другие разновидности): «полосовой фильтр» четвертого порядка и шестого порядка.

Низкочастотное оформление первого типа представляет собой соединение двух видов корпусов: заднего закрытого и переднего с фазоинвертором (см. рис. 7). Заднее закрытое оформление обеспечивает спад низких частот, т.е. его характеристика аналогична фильтру верхних частот второго порядка со спадом 12 дБ/октава. Переднее оформление с фазоинвертором обеспечивает спад верхних частот аналогично фильтру четвертого порядка со спадом 24 дБ/октава. В результате все это оформление в целом работает как «полосовой фильтр». Использование такого оформления открывает принципиально новые возможности для управления его характеристиками: меняя объем задней и передней камер, параметры фазоинвертора с соответствующим подбором параметров низкочастотного громкоговорителя, можно добиться изменения полосы пропускания, частоты среза и чувствительности акустической системы в очень широких пределах.

Эквивалентная схема такой акустической аппаратуры (рис. 8) представляет собой систему из двух связанных контуров: один контур – закрытый ящик (параметры –  $R_1, L_1, C_1$ ), второй – ящик с фазоинвертором

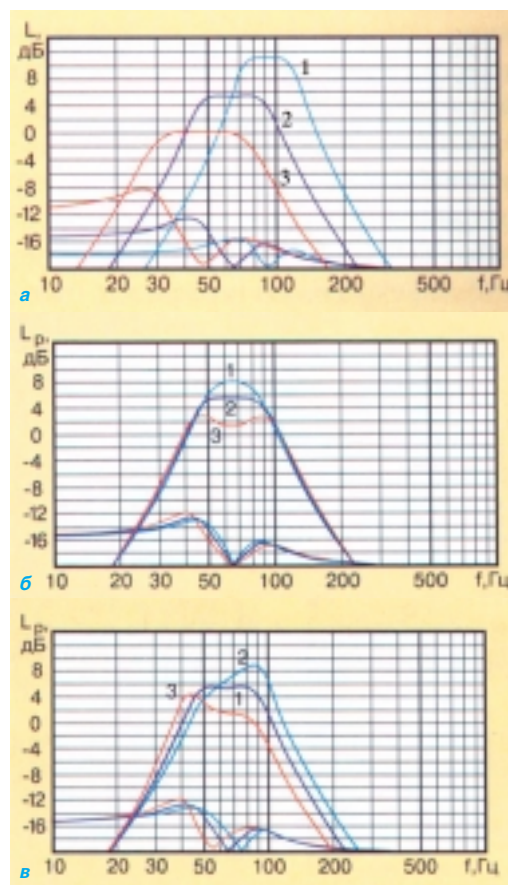


Рис.9. Изменение АЧХ при различных: а – объемах задней закрытой камеры; б – объемах передней камеры; в – параметрах настройки фазоинвертора

(параметры –  $L_2, L_3, C_2, R_2$ ). Фазоинвертор настраивается на частоту подвижной системы громкоговорителя с учетом установки его в закрытую камеру ( $f_c^*$ ):

$$F_c = f_s \sqrt{V_{as}/V_c + 1},$$

где  $V_c$  – объем закрытой камеры,

$V_{as}$  – эквивалентный объем для данного громкоговорителя.

В такой системе можно изменять три основных параметра: объем закрытой камеры, объем передней камеры и частоту настройки фазоинвертора.

Результаты экспериментов с субвуфером JL Audio 10W1-4, использующим низкочастотный громкоговоритель диаметром 300 мм, объем закрытой камеры 13,77 л, объем передней камеры – 21,87 л и частоту настройки фазоинвертора – 64 Гц, представлены на рис. 9. Соответствующие этому оформлению частотная характеристика и характеристика смещения звуковой катушки показаны на рис. 9, а (кривая 2). Если уменьшить объем закрытой камеры до 7,9 л, произведя при этом перенастройку фазоин-

\* Подробнее с принципами построения эквивалентных схем для акустических систем и методами расчета их параметров можно ознакомиться в книге: Алдошина И.А., Войшвилло А.Г. «Высококачественные акустические системы», 1989 (Изд-во «Радио и Связь»).

вертора, поскольку резонансная частота громкоговорителя при этом вырастет, то получится кривая 1. Если же, наоборот, увеличить объем внутренней камеры до 29,7 л, то получится третья кривая (при соответствующей перестройке фазоинвертора). Сравнение этих кривых показывает, что уменьшение объема задней закрытой камеры сужает полосу воспроизведения и повышает чувствительность системы. Увеличение, наоборот, расширяет полосу воспроизведения в сторону низких частот, но при этом снижает чувствительность. Необходимо отметить, что одновременно возрастает амплитуда смещения звуковой катушки, что может привести к ее тепловым и механическим повреждениям.

Следующим параметром является объем передней камеры. Если изменять ее объем (сохраняя объем задней камеры) и частоту настройки фазоинвертора постоянной (при этом, правда, надо менять его размеры, так как с изменением объема воздуха в ящике меняется частота настройки), то увеличение и уменьшение объемов передней камеры от тех же основных размеров, что и выше, приводит к изменению формы АЧХ (рис. 9, б). Здесь не меняется ширина АЧХ, но уменьшается чувствительность при уменьшении объема (кривая 1 – увеличенный объем, 2 – оптимальный объем, 3 – уменьшенный объем).

Третья степень свободы при настройке такого корпуса – это изменение частоты настройки фазоинвертора (рис. 9, в). Результаты увеличения частоты настройки от 64 (кривая 1) до 75 Гц (кривая 2) и уменьшения до 45 Гц (кривая 3) показывают, что симметричность кривой сохраняется только при точной настройке фазоинвертора на частоту громкоговорителя в выбранном закрытом объеме.

Таким образом, выбор оптимальных параметров и их оптимальная настройка являются довольно сложным делом, но сейчас уже достаточно подробно разработана теория таких оформлений, в Internet даже имеется калькулятор для их расчета (например, <http://www.carstereo.com/help/Articles.cfm>).

Преимуществом этих оформлений является возможность достаточно легко варьировать шириной полосы пропускания и чувствительностью.

Полученная при этом крутизна спада АЧХ оказывается довольно невысокой, поскольку здесь используется конструкция, эквивалентная фильтру второго порядка (закрытый объем) и четвертого порядка (объем с фазоинвертором). Это одна из причин, по которой для таких низкочастотных блоков рекомендуется применять еще и электрические фильтры, что дает возможность точнее регулировать частоту среза и крутизну спада.

Следующим этапом в создании мощных низкочастотных систем явилась конструкция корпуса, запатентованная фирмой Bose, в которой используются передняя и задняя камеры с фазоинвертором (рис. 10). Как видно из этой конструкции, она может рассматриваться как система шестого порядка с более крутыми склонами по краям.

В этой системе проблемы настройки усложняются, но в ней получается меньший уровень нелинейных искажений, так как они отфильтровываются одинаковыми по конструкции камерами, и большая эффективность внутри полосы пропускания. К числу недостатков можно отнести довольно узкую полосу пропускания, некоторое увеличение длительности переходных процессов за счет большой крутизны спадов, возрастание амплитуды смещения подвижной системы за пределами полосы пропускания, что также обуславливает необходимость применения дополнительных электрических фильтров.

Расчет оформлений типа «полосовой фильтр» шестого порядка может быть выполнен и с помощью калькулятора, данного в Internet (адрес указан выше).

Для расчета должны быть заданы параметры Small-Thiele для низкочастотной головки громкоговорителя (их определение было дано в статье Install-Pro, 2003, №4):  $f_S$  – резонансная частота головки,  $Q_{TS}$  – добротность головки,  $V_{AS}$  – эквивалентный объем. Расчет позволит получить:  $V_F, V_R$  – объем передней и задней камер,  $f_F, f_R$  – частоту среза передней и задней камер, полосу пропускания и чувствительность.

Поскольку, как уже было отмечено выше, АЧХ низкочастотного блока с таким оформлением обычно ограничена диапазоном до 150 – 200 Гц, где локализация звука практически отсутствует, субвуфер может быть установлен в любом месте помещения (в углу, у стены и т.д.), а это также дает возможность увеличить уровень низкочастотных составляющих за счет отражений.

На основе принципа «полосового фильтра» был разработан мощный широкополосный агрегат для озвуч-

## З В У К

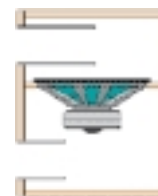


Рис. 10. Конструкция оформления типа «полосовой фильтр» шестого порядка



Рис. 11. Низкочастотный блок агрегата Acoustimass



Рис. 12. Различные способы установки Acoustimass в системах озвучения



Рис.13. Низкочастотный блок фирмы Bose

чения, получивший название Acoustimass Professional Powered Speaker System (рис. 11). В нем используется низкочастотный блок типа «полосового фильтра» шестого порядка, конструкция которого показана на рис. 1. Этот блок воспроизводит частоты до 200 Гц.

В качестве низкочастотного громкоговорителя применяется головка диаметром 380 мм с паспортной мощностью 300 Вт и большим ходом смещения до 4 мм. На задней стенке этого блока встроен усилитель 450 Вт, т. е. эта система активная. Средние и высокие частоты воспроизводятся с помощью шести СЧ/ВЧ-громкоговорителей диаметром 120 мм, воспроизводящих частоты 200 Гц – 18 кГц. В громкоговорителях применяется намотка шестигранным алюминиевым проводом, что увеличивает по отношению к круглому проводу плотность намотки и повышает чувствительность. Громкоговорители разме-



Рис.14. Комплект для озвучения с системой 502BP

щены на специальном выпуклом экране, что обеспечивает расширение суммарной характеристики направленности. Параметры такого устройства следующие: частотный диапазон 50 – 18 кГц (+/-3дБ), усилитель 450 Вт паспортной и 600 Вт пиковой мощности, максимум SPL на 1 м – 120 дБ, вес 36,4 кг, габариты – 40,6 x 56,5 x 59,1 см. Такая конструкция удобна для установки как на стене, так и на отдельной стойке (рис. 12). Эти модули достаточно широко используются для озвучения различных помеще-



Рис.15. Низкочастотный блок MTL-4 фирмы Electro-Voice

ний, например они установлены в залах Московского вокзала Санкт-Петербурга.

Идея использования мощных низкочастотных блоков, построенных по типу «полосового фильтра», все чаще реализуется в системах озвучения закрытых и открытых помещений, салонов автомобилей и т.д. Кроме создания на их основе широкополосных акустических систем типа вышеописанной, целым рядом фирм были разработаны модульные системы, где такие блоки используются в виде отдельной конструкции.

Та же фирма Bose выпустила отдельный активный модуль, на основе оформления типа «полосовой фильтр» шестого порядка – 502BP Acoustimass Low Frequency Enclosure/Subwoofer (рис. 13), который использует одну мощную низкочастотную головку диаметром 300 мм и обеспечивает следующие параметры: частотный диапазон 55 – 150 Гц, чувствительность 90 дБ/Вт/м, Max SPL – 122 дБ. В него встроен усилитель мощностью 450 Вт на канал (на нагрузку 8 Ом) и контроллер, обеспечивающий функции кроссовера, эквалайзера и др. В сочетании со средне-, высокочастотными модулями он дает возможность озвучивать помещения достаточно больших размеров (рис. 14).

Особой разновидностью такого типа оформлений («полосовой фильтр») является мощный низкочастотный блок (рис. 15), конструкция которого была запатентована в 1988 г. R.Newman и D.Carlson. В нем используются четыре мощные низкочастотные головки диаметром 18", нагруженные на общую внутреннюю закрытую камеру и внешние камеры с фазоинвертором. На базе такого блока фирма Electro-Voice создала мощную систему MTL-4, дополнив ее специальным средне-, высокочастотным блоком с набором рупорных громкоговорителей. Системы такого типа начали активно использоваться в концертной аппаратуре для озвучения, где до этого применялись в основном блоки, в которых в качестве акустического оформления служили свернутые рупоры.

Таким образом, новый вид акустического оформления типа «полосовой фильтр», который сначала казался просто конструкторской фантазией и производил (да и сейчас производит) очень странное впечатление (просто закрытый ящик с одним или двумя небольшими отверстиями и никаких громкоговорителей не видно), находит себе все большее применение в мощных акустических системах для озвучения и в системах типа «Домашний театр» (рис. 16), и еще неизвестно, какие новые применения ожидают его в ближайшее время.



Рис.16. Набор акустических систем для «Домашнего театра»