



МИНИСТЕРСТВО ОБРАЗОВАНИЯ И НАУКИ  
РОССИЙСКОЙ ФЕДЕРАЦИИ  
ФЕДЕРАЛЬНОЕ АГЕНТСТВО ПО ОБРАЗОВАНИЮ  
Технологический институт  
Федерального государственного образовательного  
учреждения высшего профессионального образования  
«Южный федеральный университет»

КАФЕДРА РАДИОПРИЕМНЫХ УСТРОЙСТВ И  
ТЕЛЕВИДЕНИЯ

# КОМПЬЮТЕРНОЕ МОДЕЛИРОВАНИЕ АКУСТИЧЕСКИХ СИСТЕМ

Методическое пособие  
по курсу

## Звукотехника

Для студентов радиотехнических специальностей всех форм обучения.



ТАГАНРОГ 2010

Клименко В.В., Кравец А.В. Компьютерное моделирование акустических систем. – Таганрог: Изд-во Технологического института ЮФУ, 2010. – 24 с.

Методическое пособие составлено в помощь студентам радиотехнического факультета всех форм обучения для изучения курса «Звуко-техника».

В пособии рассматриваются методы компьютерного моделирования акустических систем с использованием свободно распространяемой программы JBL SpeakerShop.

Описаны порядок установки программы, ее интерфейс и особенности работы с ней на отдельных этапах – задания параметров громкоговорителя, выбора типа акустического оформления, определения геометрических размеров элементов акустического оформления и анализа результатов моделирования.

Основное внимание в пособии уделено исследованию степени влияния на характеристики громкоговорителя в диапазоне низких частот двух получивших наибольшее распространение видов акустического оформления – закрытого корпуса и корпуса с фазоинвертором.

В пособии также приводятся примеры использования программы JBL SpeakerShop для решения ряда практических задач, возникающих при разработке акустических систем.

Ил. 10. Библиограф.: 6 назв.

Рецензент Н.И. Мережин, канд. тех. наук, доцент кафедры ТОР ТТИ ЮФУ.

## ВВЕДЕНИЕ

Современные акустические системы (АС) представляют собой сложные электро-механо-акустические преобразователи, расчет которых достаточно сложен. Неоценимую помощь в разработке таких систем оказывают программы компьютерного моделирования.

К сожалению, до сих пор нет программ, позволяющих произвести полное моделирование многополосной АС с учетом всех входящих в ее состав элементов, включая электрические (разделительные фильтры, фильтры-компенсаторы и т.п.). Причиной этого является отсутствие адекватных моделей АС в области средних и высоких частот (СЧ и ВЧ). На этих частотах длина излучаемых АС волн становится соизмеримой с геометрическими размерами акустического оформления (АО) АС. В результате возникают различного рода интерференционные явления, в том числе вызванные резонансами корпуса АО.

Для области низких частот (НЧ), где длины излучаемых АС волн велики по сравнению с геометрическими размерами АО, возможна разработка таких моделей, что позволяет реализовать их программным методом. В этих моделях громкоговоритель (ГР) НЧ диапазона и АО представляются в виде эквивалентных электрических и акустических схем, параметры которых можно считать сосредоточенными в предположении, что ГР диапазона НЧ работает преимущественно в поршневом режиме. Последнее означает, что выше частоты резонанса ГР диапазона НЧ его АЧХ определяется собственной АЧХ ГР и от типа и параметров АО не зависит. Это условие всегда выполняется для ГР диапазона СЧ и ВЧ, так как значение частот раздела всегда выбираются выше значений резонансных частот указанных ГР.

В диапазоне НЧ резонансная частота ГР и область частот, лежащая ниже, попадают в полосу воспроизведения указанного ГР. В этом случае тип АО и его параметры оказывают очень существенное влияние на результирующие параметры АС. Поэтому подавляющая часть программ компьютерного моделирования ориентирована на исследование поведения характеристик АС в зависимости от выбранного ГР и типа АО (и его параметров) именно в диапазоне НЧ.

В данном пособии рассматриваются основные принципы работы с программой JBL SpeakerShop, разработанной известным производителем акустического оборудования – фирма JBL. Указанная программа является свободно распространяемой и доступна в сети Интернет.

## 1. ИСХОДНЫЕ ДАННЫЕ ДЛЯ МОДЕЛИРОВАНИЯ

Большой вклад в разработку эквивалентных моделей ГР в АО и методик их расчета внесли А.Н. Thiele и R.H. Small. Ими был предложен ряд параметров (параметры Тиле-Смолла или Т/S-параметры), которые описывают ГР диапазона НЧ (и, с некоторыми оговорками, СЧ) при условии их работы в поршневом (компрессионном) режиме (когда в диффузоре не возникают продольные колебания и его можно уподобить поршню). Общее количество параметров, включая параметры АО, более 30. Однако для проведения моделирования нет необходимости задавать их все, поскольку некоторые параметры можно выразить через другие, а часть из них, например, объем корпуса АО, могут быть самостоятельно заданы пользователем.

Имеется ряд Т/S-параметров, без которых проведение моделирования невозможно. Эти параметры включены в ГОСТ 16122-87, где также описана методика их экспериментального определения (возможность экспериментального определения Т/S-параметров, в частности, в любительских условиях, способствовало их широкому распространению). Ниже будут приведены перечни Т/S-параметров, необходимых для проведения моделирования в JBL SpeakerShop.

### 1.1. Минимальный набор Т/S-параметров

- 1)  $F_s$  – резонансная частота ГР;
- 2)  $V_{as}$  – эквивалентный объем ГР;
- 3)  $Q_{ts}$  – полная добротность ГР.

Этот набор параметров позволяет SpeakerShop определить такие характеристики по звуковому давлению, как: нормированная амплитудно-частотная характеристика (АЧХ), фазо-частотная характеристика (ФЧХ), групповое время задержки (ГВЗ)

### 1.2. Расширенный набор параметров

- 1)  $R_e$  – сопротивление катушки ГР по постоянному току;
- 2)  $L_e$  – индуктивность катушки ГР;
- 3)  $P_e$  – пиковая мощность ГР;
- 4)  $Q_{ms}$  – механическая добротность ГР;
- 5)  $Q_{es}$  – электрическая добротность ГР (параметр  $Q_{ts}$  выражается через  $Q_{ms}$  и  $Q_{es}$ , поэтому достаточно задать только два любых параметра – третий будет автоматически вычислен);

- 6)  $S_d$  – площадь диффузора ГР или  $D_{ia}$  – его диаметр;
- 7)  $X_{max}$  – максимально допустимое смещение катушки ГР

Расширенный набор T/S-параметров включает в себя минимальный набор T/S-параметров и позволяет SpeakerShop дополнительно определить такие параметры, как: зависимость импеданса (полного электрического сопротивления) ГР от частоты (необходимо для настройки АС), зависимость абсолютного давления ГР от частоты, уровень характеристической чувствительности (SPL) и КПД ( $\eta_0$ ) ГР, минимально допустимые геометрические размеры тоннеля для корпуса с фазоинвертором (ФИ).

### 1.3. T/S-параметры акустического оформления

В данном пособии будут рассматриваться только два вида АО: закрытый корпус (closed box) и корпус с ФИ (vented box). Поэтому далее будет приведен перечень T/S-параметров, необходимый для моделирования только указанных типов АО.

- 1)  $F_3$  – частота среза АЧХ, определяемая по уровню – 3 дБ;
- 2)  $V_c$  – внутренний объем закрытого корпуса (без ФИ);
- 3)  $V_b$  – внутренний объем корпуса с фазоинвертором, л;
- 4)  $F_c$  – частота резонанса ГР в закрытом корпусе;
- 5)  $F_b$  – частота настройки фазоинвертора, Гц;
- 6)  $Q_{tc}$  – добротность ГР в закрытом корпусе;
- 7)  $Q_L$  – добротность фазоинвертора;
- 8)  $D_v$  – площадь или диаметр отверстия фазоинвертора;
- 9)  $L_v$  – длина фазоинвертора.

### 1.4. T/S-параметры громкоговорителя 100ГДН-1

Для демонстрации базовых принципов работы с программой будут рассмотрены примеры, в которых используется громкоговоритель 100ГД-1 со следующими параметрами: номинальная мощность –  $P_e = 100$  Вт, активное сопротивление –  $R_e = 6,9$  Ом, полная добротность –  $Q_{ts} = 0,2$ , частота резонанса –  $F_s = 12,8$  Гц, эквивалентный объем –  $V_{as} = 446$  л, диаметры диффузора –  $D_{ia} = 25,2$  см, допустимое максимальное смещение катушки –  $X_{max} = 12$  мм, индуктивность –  $L_e = 0,4$  Гн, электрическая добротность –  $Q_{es} = 0,206$ , механическая добротность –  $Q_{ms} = 7,08$ , импеданс –  $Z = 8$  Ом.

## 2. МОДЕЛИРОВАНИЕ В JBL SPEAKERSHOP

### 2.1. Инсталляция программы

Дистрибутив программы, свободно доступный в Интернете, содержит две папки: DISK1 и DISK2. Если дистрибутив находится в виде архива, его необходимо распаковать. Затем содержимое папки DISK2 необходимо скопировать в папку DISK1.

В папке DISK1 необходимо запустить файл SETUP.exe. Инсталлятор предложит место размещения программы, по умолчанию C:\JBL. Далее при установке инсталлятор попросит вставить DISK2. *Ничего не изменяя* в отрывшемся окне, нажмем ОК.

В конце инсталляции откроется проводник с ярлыками двух установленных программ – SpeakerShop Enclosure Module 1.0 и SpeakerShop Crossover Module 1.0, которые можно перенести на рабочий стол.

Из этих программ будет использована только первая. Вторая предназначена для расчета пассивных разделительных фильтров и в данном пособии не рассматривается.

После запуска SpeakerShop Enclosure Module 1.0 появится заставка, щелкнув по которой (или по кнопке Continue) происходит переход в основное окно программы (рис. 2.1).

### 2.2. Ввод TS-параметров громкоговорителя

Войдите в **Loudspeaker** → **Params--full** и в открывшемся окне введите TS-параметры 100ГДН1 (параметр *Qes не вводить*), производителя Manufacturer и модель Model Name (например, USSR и 100GDN-1); чувствительность Sensitivity переключите на **1 watt** (рис. 2.2).

При вводе значения Dia автоматически определяется площадь *Sd*.

В поле Number of drivers – ничего менять не надо.

Для определения незаполненных значений параметров нажмите **Calculate Unknown**. Обратите внимание, что рассчитанный параметр  $Qes = 0,2058$  практически совпал с заданным 0,206.

Сохраните параметры ГП в базе данных, для чего нажмите **Add to Database**.

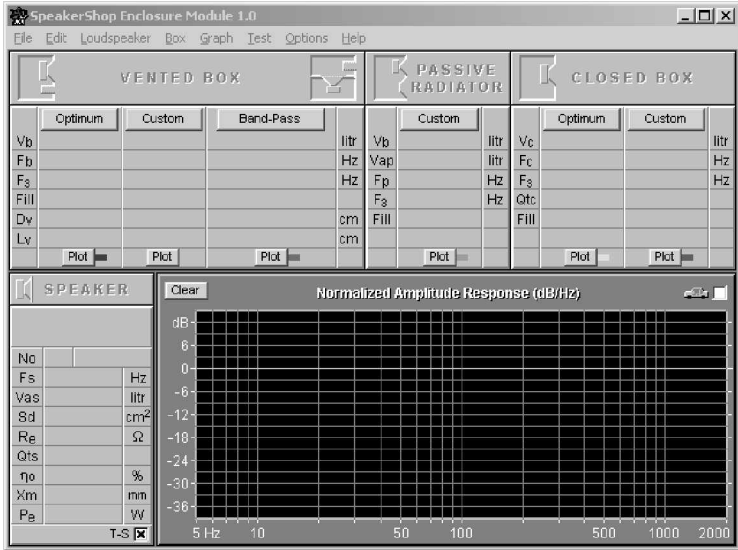


Рис. 2.1. Основное окно программы

Рис. 2.2. Окно ввода параметров громкоговорителя

Загрузить в проект параметры ГР из базы данных можно командой **Loudspeaker** → **Load from Database**.

*Примечание.*

При изменении параметров ГР и внесении его в базу данных без изменения наименования производителя и модели, в базе будут находиться два ГР с одинаковыми наименованиями, но разными параметрами, так как SpeakerShop перезапись *не производит*.

Нажмите **Accept**, после чего параметры ГР будут введены в программу и произойдет возврат в основное окно программы, при этом в поле **SPEAKER** отобразятся введенные и рассчитанные параметры.

Сохраните проект (**File** → **Save Desing As...**).

*Примечание.*

SpeakerShop некорректно отображает имена папок, набранных кириллицей.

После ввода параметров программа автоматически определит оптимальные (с точки зрения ее разработчиков) параметры акустического оформления типа закрытого корпуса и корпуса с ФИ, которые будут отображены под кнопками **Optimum** в полях **CLOSED BOX** и **VENTED BOX** появятся рассчитанные параметры.

Критерии оптимальности будут рассмотрены ниже.

В поле Fill отображается степень заполнения корпуса звукопоглощающим материалом, по умолчанию заполнение отсутствует (none). Поля Dv и Lv остаются незаполненными (см. далее).

### 2.3. Графическое представление результатов моделирования

После определения программой параметров двух вариантов АО можно получить графики частотно-зависимых характеристик.

Тип характеристики отображается вверху поля графика. По умолчанию – это нормализованная АЧХ. Выбрать другой тип характеристики можно из пункта меню **Graph** или при помощи горячих клавиш F4...F9.

Если введены не все TS-параметры, необходимые для полного моделирования, то некоторые характеристики будут недоступны.

Для построения на одном графике двух кривых требуемой характеристики (в данном случае – нормированной АЧХ) для закрытого



корпуса и корпуса с ФИ необходимо нажать кнопки **Plot** в обоих полях **Optimum** (рис. 2.3).

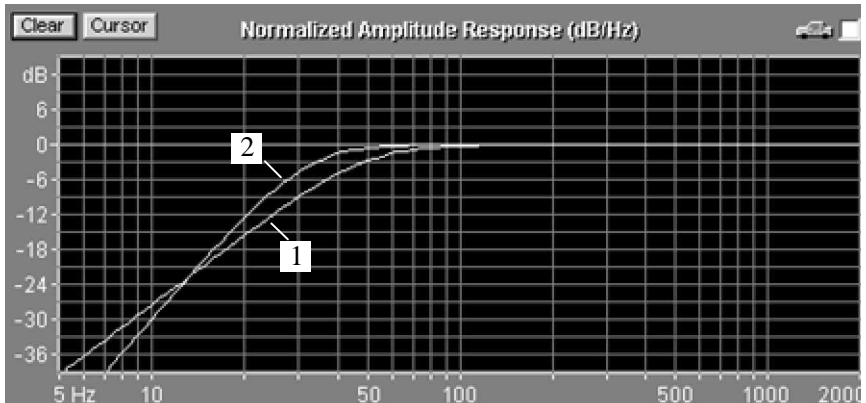


Рис. 2.3. АЧХ оптимального закрытого корпуса и корпуса с фазоинвертором

Кривая 1 соответствует АЧХ закрытого корпуса, кривая 2 – АЧХ корпуса с ФИ.

Очистка поля графика производится кнопкой **Clear**.

Кнопка **Cursor** включает отображение курсора, перемещением которого можно управлять при помощи щелчка мыши на одной из кнопок навигации, появляющихся в поле **Cursor**. При этом справа от поля кнопок навигации появляется поле, на котором отображаются значения частоты и величины отображаемого на кривой параметра в точке положения курсора.

Курсор отключается повторным нажатием на кнопку **Cursor**.

Если отображается несколько кривых, то курсор будет помещаться только на последней из построенных кривых.

Чтобы изменить вид отображения кривых необходимо войти в меню **Graph** → **Configure**. Здесь возможно отключить режим перекрытия (при вводе новой кривой ранее выведенная кривая удаляется), изменить толщину кривой, включить заполнение под кривой, а также выбрать форму курсора. Новые установки для отображения графика будут действовать только для вновь выводимых кривых.

#### 2.4. Критерии оптимальности моделирования в JBL SpeakerShop

Анализ показывает, что для предложенных программой оптимальных параметров двух вариантов АО АЧХ в обоих случаях оказывается максимально плоской. При этом для закрытого корпуса частота среза на уровне  $-3$  дБ будет равна 48,7 Гц при объеме корпуса  $\sim 33$  л, а для корпуса с ФИ – 34,1 Гц при объеме корпуса  $\sim 54$  л. Крутизна спада АЧХ закрытого корпуса составляет 12 дБ/окт., а корпуса с ФИ – 24 дБ/окт., что полностью соответствует теории.

Из максимально плоской АЧХ следует то, что для использованного типа ГР программа по умолчанию использовала аппроксимацию Баттерворта. Для закрытого корпуса это означает, что значение  $Q_{tc}$  было принято равным 0,707.

Однако критерий оптимальности для расчета параметров закрытого корпуса можно задать и самостоятельно.

Для этого нажмите на кнопку **Optimum** в поле **CLOSED BOX**, после чего откроется окно, приведенное на рис. 2.4.

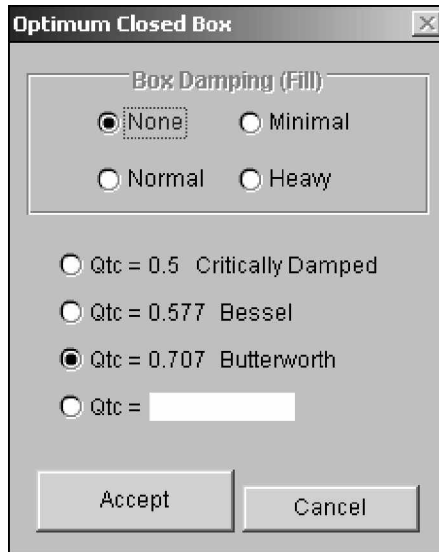


Рис. 2.4. Окно параметров установок оптимизации для закрытого корпуса

В поле **Box Damping (Fill)** задается степень заполнения звукопоглощающим материалом: **None**, **Minimal** и **Heavy** – заполнение отсутствует или составляет 5 %, 10 % и 20 % от объема корпуса АС соответственно.

Ниже находится поле задания значения добротности  $Q_{tc}$ . Не все значения добротности могут быть доступны, так как должно выполняться условие  $Q_{ts} < Q_{tc}$ . Если  $Q_{ts} < 0,707$ , что выполняется для 100 ГДН-1, – программа по умолчанию принимает  $Q_{tc} = 0,707$  и использует аппроксимацию Баттерворта (что и было сделано). Если же значение  $Q_{ts}$  находится в диапазоне от 0,707 до 1, то программа по умолчанию принимает  $Q_{tc} = 1$  (аппроксимация Чебышева).

Неприятным моментом является то, что при значениях  $Q_{ts}$  чуть меньших 0,707 программа пытается реализовать аппроксимацию Баттерворта, а это приводит к нереализуемым конструкциям с объемом в тысячи литров. Аналогичное явление происходит при  $Q_{ts} > 1$ .

В приведенном на рис. 2.4 окне выберите  $Q_{tc} = 0,707$ , нажмите **Акцепт** и выведите кривую АЧХ для оптимального закрытого корпуса (режим перекрытия кривых графика должен быть включен). Затем повторите указанные действия для  $Q_{tc} = 0,5$  и  $Q_{tc} = 1,2$ .

График полученных кривых АЧХ приведен на рис. 2.5.

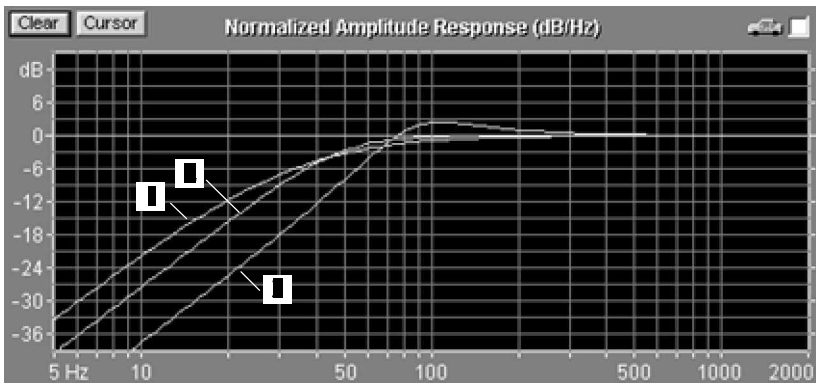


Рис. 2.5. АЧХ закрытого корпуса при различных значениях  $Q_{tc}$

Для  $Q_{tc} = 0,5$  (кривая 1)  $V_b = 75$  л,  $F_3 = 52,3$  Гц; для  $Q_{tc} = 0,707$  (кривая 2)  $V_b = 33$  л,  $F_3 = 48,7$  Гц; для  $Q_{tc} = 1,2$  (кривая 3)  $V_b = 9,8$  л,  $F_3 = 87,3$  Гц.

При  $Q_{tc} = 0,5$  наблюдается улучшение отдачи на НЧ (+3 дБ на частоте 20 Гц), однако это происходит на уровне -12 дБ, что может быть и незамечено слушателем. Однако пологий спад АЧХ приводит к тому, что частота среза несколько смещается вверх по отношению к АЧХ, построенной для  $Q_{tc} = 0,707$ . При этом требуемый объем получается в ~2,3 раза больше.

При  $Q_{ts} = 1,2$  частота среза повышается почти в два раза по отношению к АЧХ, полученной при  $Q_{tc} = 0,707$ . При этом на АЧХ появляется резонансный выброс на частоте около 100 Гц величиной в 3 дБ (2 раза по громкости), что будет причиной появления гула. Однако требуемый объем получается в ~2,3 раза меньше.

Для задания параметров оптимального моделирования корпуса с ФИ необходимо нажать кнопку **Optimum** в поле **VENTED BOX**. При этом появится окно, аналогичное изображенному на рис. 2.4, однако доступными параметрами в этом случае будут только степень заполнения и добротность потерь QL. Последний параметр трудно контролируем, и установленное по умолчанию значение 7, является наиболее типовым, изменять которое не целесообразно (обычно QL уменьшается до 5 при объемах корпуса порядка 300 л и более).

Таким образом, критерий оптимальности для корпуса с ФИ в данной программе не столь очевиден, как для закрытого корпуса. Программа пытается определить параметры АО с целью формирования АЧХ без выбросов, однако уже при  $Q_{ts} = 0,4$  рекомендуемый ей объем корпуса АС составляет порядка 300 л. Объем до 100 л по принятому в программе критерию оптимальности для корпусов с ФИ реализуем при  $Q_{ts} < 0,26$ . При этом тип аппроксимации близок к Баттервортовской.

В программах, разработанных в более позднее время, например, Bass Vox Pro, этот недостаток устранен, и при задании параметров оптимального моделирования корпуса с ФИ можно задавать тип аппроксимации – АЧХ может иметь оговоренную неравномерность при разумных объемах корпуса.

*В результате определения оптимальных параметров для АО типа закрытого корпуса и корпуса с ФИ определяются такие параметры, как объем корпуса, частота настройки фазоинвертора и нижняя граничная частота АС.*

## 2.5. Определение геометрических размеров корпуса

По полученному требуемому объему корпуса программа позволяет определить его геометрические размеры.

Для этого выполните **Box** → **Dimensions...**, после чего появится окно, изображенное на рис. 2.6.

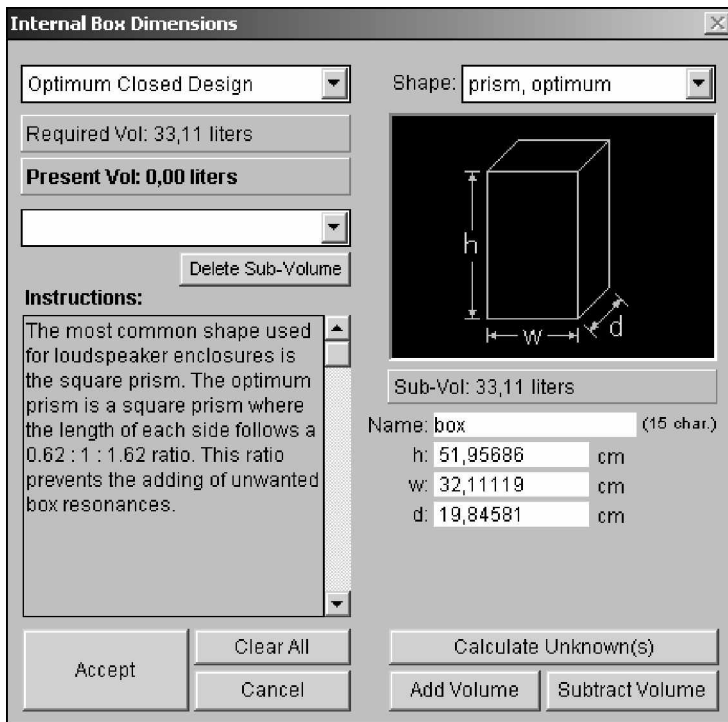


Рис. 2.6. Окно определения геометрических размеров корпуса

Из раскрывающегося списка слева вверху можно выбрать тип акустического оформления.

Форма корпуса выбирается из раскрывающегося списка справа вверху. По умолчанию программа выдает параметры для стандартного корпуса в виде параллелепипеда, соотношение сторон которого подчиняется золотому сечению (prism optimum, 0,62:1:1,62).

Если выбран другой тип корпуса, то необходимо вручную ввести один или несколько его размеров. Поля неизвестных размеров должны быть обязательно очищены. Для их определения нажмите **Calculate Unknown(s)**. Если количества введенных размеров недостаточно – программа выдаст предупреждение.

*Операцию **Calculate Unknown(s)** необходимо обязательно выполнять при смене типа акустического оформления или перерасчете его параметров – значения в полях **Required Vol** и **Sub-Vol** должны обязательно совпадать.*

Для очистки всех полей нажмите **Clear All**.

Если необходимо сохранить параметры корпуса, ему требуется задать имя в поле **Name** (по умолчанию – box), добавить в список вариантов конструкций корпусов нажатием на **Add Volume** и **Accept**. В противном случае нажмите **Cancel**.

Следует иметь в виду, что при последующем обращении к окну определения геометрических размеров программа будет автоматически предлагать именно это форму корпуса.

Для оптимальных размеров закрытого корпуса и корпуса с ФИ исходя из требуемого объема  $V_b$  33 и 54 л были получены соответственно следующие геометрические размеры корпусов:  $52 \times 32 \times 20$  см и  $61 \times 38 \times 23$  см (значения округлены).

## 2.6. Определение геометрических размеров фазоинвертора

Для определения геометрических размеров ФИ выполните **Box** → **Vent...**, после чего откроется окно, изображенное на рис. 2.7.

В этом окне задается количество фазоинверторов **Number** и один из его геометрических размеров – длина тоннеля  $L_v$  или параметр его порта  $D_v$ . Если порт имеет круглую форму – выбирается **Diameter** и  $D_v$  определяет его диаметр, если порт имеет круглую или прямоугольную форму – выбирается **Area** и  $D_v$  определяет его площадь.

После ввода одного из параметров другой будет вычислен исходя из определенного ранее значения  $F_b$  при нажатии на клавишу ENTER, а полученные результаты будут переданы в поле параметров основного окна программы после нажатия на кнопку **Accept**. Если  $D_v$  задает площадь, то в поле параметров после его численного значения появится буква **a**. Если задано больше двух фазоинверторов, перед этим численным значением появится множитель, например, **2x**.

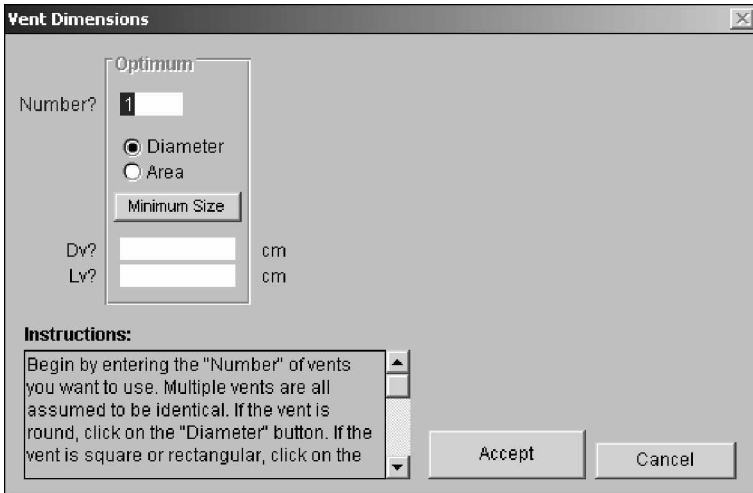


Рис. 2.7. Окно определения геометрических размеров фазоинвертора

Кнопка **Minimum Size** позволяет программе самостоятельно определить эти минимальные допустимые значения  $L_v$  и  $D_v$ , однако только в том случае, если были заданы такие TS-параметры, как  $S_d$  и  $X_{max}$ . В противном случае программа выдаст сообщение об ошибке.

Уменьшение диаметра ФИ ведет к уменьшению его длины, что очень желательно. Однако имеется ограничение на их минимальные размеры, поскольку в тоннеле ФИ из-за большой скорости перемещения воздушных масс возникает турбулентность, являющаяся причиной возникновения сильного шума и других посторонних призвуков.

Для 100ГДН-1 были определены следующие параметры ФИ: длина тоннеля  $L_v = 109$  см, диаметр порта 11,8 см при предлагаемой программой частоте настройки ФИ  $F_b = 23,2$  Гц.

Установить в корпусе размером  $61 \times 38 \times 23$  трубу длиной 109 см достаточно проблематично. При этом реальный объем корпуса станет меньше расчетного. К сожалению, этот факт программа не учитывает – необходимо самостоятельно определить объем, занимаемый тоннелем, и на эту величину увеличить объем корпуса. Также программа не учитывает объем, занимаемый собственно ГР. Эти недостатки были устранены в более поздних программах моделирования АС, где учитывается, например, такой факт, как к какой из сторон передней панели прикреплен ГР – внешней или внутренней.

## 2.7. Пользовательская установка параметров моделирования

Программа позволяет решать обратную задачу – получить характеристики АС при заданном пользователем объеме корпуса и частоте настройки ФИ при произвольных TS-параметрах ГР.

Очевидно, что получаемые при этом характеристики уже не становятся оптимальными с точки зрения разработчиков программы, но могут оказаться более подходящими для пользователя, например, по критерию минимизации размеров акустической системы.

Рассмотрим, как это реализуется на примере закрытого корпуса.

Нажмите **Custom** в поле **CLOSED BOX**. В появившемся окне **Custom Closed Box**, в отличие от окна, изображенного на рис. 2.4, уже можно по выбору задать значение или добротности  $Q_{tc}$ , или объема  $V_c$ . После ввода одного из параметров и нажатия клавиши ENTER введенный параметр пересчитывается в другой. При нажатии на **Accept** оба параметра будут переданы в основное окно программы.

Как и для построения графиков для оптимальных параметров, нажмите кнопку **Plot** внизу поля **CLOSED BOX/Custom**.

Для корпуса с ФИ нажмите **Custom** в поле **VENTD BOX**. В появившемся окне **Custom Vented Box** возможно задать объем  $V_b$  или частоту среза  $F_3$  (с пересчетом одного параметра в другой), и частоту настройки фазоинвертора  $F_b$ , а также добротность фазоинвертора  $QL$  и степень заполнения звукопоглощающим материалом.

При задании  $V_b$  или  $F_3$  при нажатии на **Optimum Fb** программа сама может определить оптимальное значение  $F_b$ .

Кроме того, имеется дополнительная опция расширенного баса (**Extended Bass**). При этом параметры  $V_b$ ,  $F_3$  и  $F_b$  автоматически определяются программой таким образом, чтобы отдача по НЧ была максимально возможной.

На рис. 2.8 приведены кривые АЧХ корпусов с фазоинверторами, рассчитанных по методике для оптимального варианта (кривая 1) и варианта с расширенным басом (кривая 2).

Несмотря на то, что частота среза для варианта с расширенным басом даже увеличилась на 1,3 Гц, на частотах ниже 25 Гц наблюдается увеличение отдачи по низким частотам (до +12 дБ).

Значения  $V_b$  и  $F_b$ , полученные таким образом, являются минимальными, при которых на АЧХ отсутствуют выбросы ниже граничной частоты  $F_3$ .



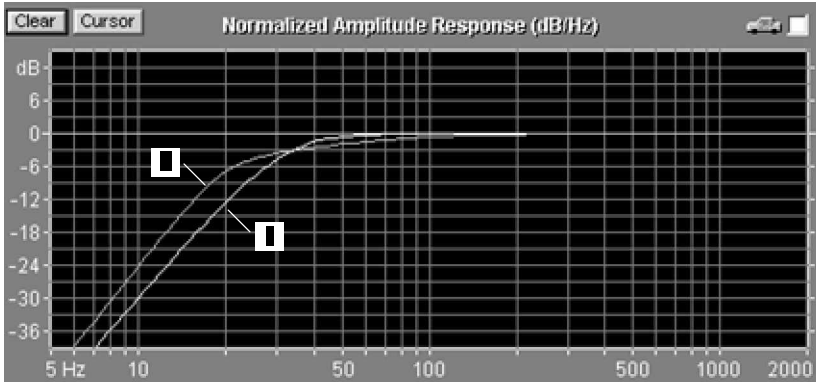


Рис. 2.8. АЧХ корпуса с фазоинвертором

Необходимо иметь ввиду, что в диапазоне ниже частоты  $F_3$  высока вероятность повреждения ГР ввиду его раздемпфирования. Это требует применения «инфранизких» фильтров, аннулирующих обеспечиваемый опцией расширенного баса дополнительный подъем на НЧ.

## 2.8. Групповое время задержки акустической системы

На рис 2.9. приведены кривые ГВЗ для оптимального закрытого корпуса (кривая 1), оптимального корпуса с ФИ (кривая 2) и корпуса с ФИ с опцией расширенного баса (кривая 3) в диапазоне НЧ.

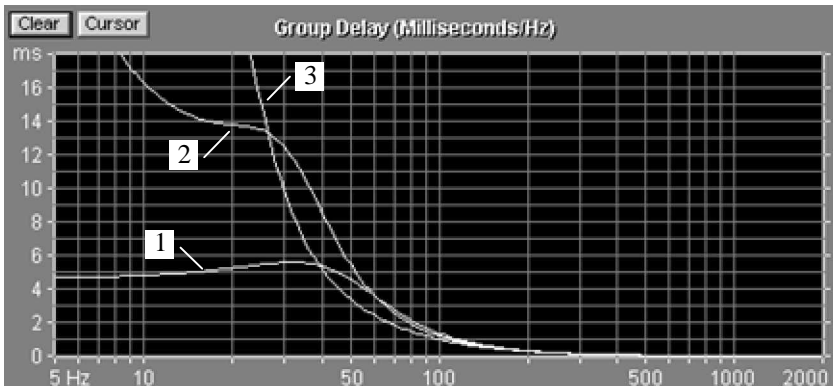


Рис. 2.9. ГВЗ для различных видов акустического оформления

Наименьшими значениями ГВЗ обладает оптимальный закрытый корпус. Оптимальный корпус с ФИ имеет существенно большие значения ГВЗ, но еще вполне допустимые. Корпус с ФИ с опцией расширенного баса имеет наихудшие характеристики по ГВЗ, особенно на тех частотах, на которых он обеспечивает дополнительный подъем по низким частотам (ниже 25 Гц).

Максимально допустимое значение ГРВ находится в пределах 15...20 мс.

## 2.9. Импеданс акустической системы

Предварительную настройку АС можно реализовать путем изменения ее импеданса и сравнения его со значениями, полученными в результате моделирования (рис. 2.10) в диапазоне НЧ.

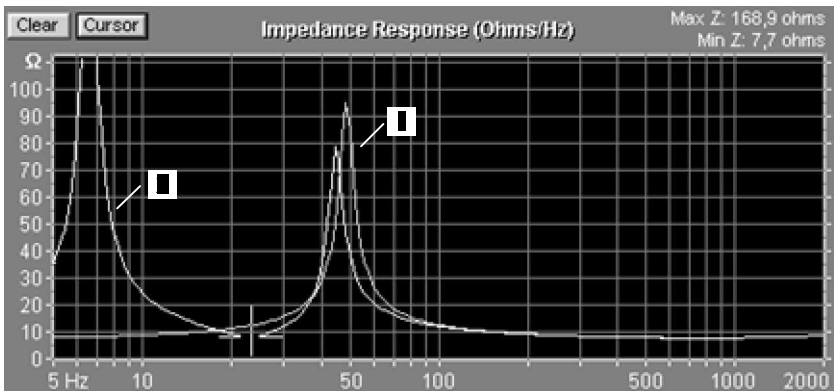


Рис. 2.10. Импеданс громкоговорителя в закрытом корпусе и корпусе с фазоинвертором

Для закрытого корпуса (кривая 1) необходимо достичь совпадения теоретического и экспериментального значения частот резонанса  $F_c$ , что можно попытаться сделать, изменяя количество звукопоглощающего материала или изменения объема корпуса.

Для корпуса с ФИ (кривая 2) необходимо достичь совпадения теоретической и экспериментальной частот настройки фазоинвертора  $F_b$  (отмеченная курсором точка минимума импеданса), что обычно производят путем изменения длины тоннеля ФИ или, что более технологично, площади порта.

### 3. ПРИМЕРЫ ПРАКТИЧЕСКОГО ИСПОЛЬЗОВАНИЯ JBL SPEAKERSHOP

*Пример 1.* Необходимо определить для 100ГДН-1 минимальные размеры закрытого корпуса, при котором нижняя граничная частота  $F_3$  будет не более 60 Гц. Допустимая неравномерность АЧХ не более +1 дБ.

Произведем определение параметров для оптимального закрытого корпуса:  $F_3 = 48,7$  Гц,  $V_c = 33,11$  л.

Видно, что возможно уменьшение объема корпуса  $V_c$ . Зададим  $Q_{tc} = 1,0$ . Неравномерность АЧХ будем определять поиском максимума на кривой АЧХ при помощи курсора:  $F_3 = 55,9$  Гц,  $V_c = 14,93$  л, неравномерность АЧХ +1,2 дБ.

Продолжая дальше итеративно изменять параметр  $Q_{tc}$ , определяем, что требуемая неравномерность АЧХ достигается при  $Q_{tc} = 0,95$ . При этом  $F_3 = 54,1$  Гц,  $V_c = 16,8$  л.

*Вывод.* Заданные параметры реализуемы при объеме корпуса меньшим на 51% от оптимального значения (при  $Q_{tc} = 0,707$ ).

*Пример 2.* Имеется готовый закрытый корпус размером 40×30×20 см. Необходимо определить возможность использования для 100ГДН-1 в этом корпусе, если неравномерность АЧХ не должна превышать +0,5 дБ.

Рассчитаем объем имеющегося корпуса, войдя в **Box** → **Dimensions...** Выберем тип корпуса **prism, square**, введем параметры его геометрических размеров  $h, w, d$  и получим объем  $V_c = 24$  л.

Введем значение полученного объема и определяем  $F_3 = 50,2$  Гц,  $Q_{tc} = 0,813$ , неравномерность АЧХ не превышает +0,3 дБ.

*Вывод.* Данный корпус можно использовать совместно с 100ГДН-1.

*Пример 3.* Для 100ГДН-1 был спроектирован закрытый корпус с параметрами  $F_3 = 50,2$ ,  $Q_{tc} = 0,9$ . Необходимо исследовать возможность введения в этот корпус фазоинвертора и определить, как при этом изменится  $F_3$ .

Определим объем уже имеющегося корпуса:  $V_b = 19,02$  л.

Введем этот параметр для корпуса с фазоинвертором, при этом используем оптимальное определение значения  $F_b$ :  $F_3 = 49,8$  Гц. Выигрыш крайне не значителен, тем более на АЧХ появляется выброс в 2,8 дБ на частоте 78 Гц. Оптимальное значение  $F_b = 34,6$  Гц. Введем значение  $F_b$  вручную:  $F_b = 25$  Гц. Величина выброса уменьшилась, но изменения полосы пропускания фактически не произошло.

*Вывод.* Введение фазоинвертора в рассматриваемый корпус смысла не имеет.

*Пример 4.* Для 100ГДН-1 был рассчитан корпус с фазоинвертором с оптимальными характеристиками, но не были учтены среднечастотный и высокочастотный громкоговорители, занявшие часть объема корпуса (~1,5 л). Определить, допустимо ли такое изменение объема при допустимой неравномерности АЧХ +1 дБ и неизменных параметрах фазоинвертора.

Определим объем рассчитанного корпуса:  $V_b = 54,26$  л и частоту настройки фазоинвертора (объем корпуса на него не влияет)  $F_b = 23,2$ . Введем значение нового объема  $V_b = 54,26 - 1,5 = 52,76$  при том же значении  $F_b$ .

В результате частота среза  $F_3$  увеличится с 33,9 до 34,3, но на частотах с 78 до 51 Гц будет наблюдаться монотонный спад до уровня – 0,5 дБ, что в принципе допустимо.

*Вывод.* Введение среднечастотного и высокочастотного громкоговорителей не приведет к существенному изменению характеристик акустической системы.

*Пример 5.* Для 100ГДН-1 был рассчитан корпус с фазоинвертором и оптимальными характеристиками. Необходимо исследовать вопрос возможности уменьшения нижней граничной частоты с  $F_3 = 33,9$  путем изменения частоты настройки фазоинвертора.

Поскольку для корпуса с оптимальными характеристиками  $F_b = 23,2$ , попробуем изменить ее значение в обе стороны. Уменьшение  $F_b$  ведет к увеличению  $F_3$ ; увеличение  $F_b$  вплоть до 33 Гц ведет к уменьшению  $F_3$ . Минимальное значение  $F_3 = 32,8$  достигается при  $F_b = 27,5$ , при этом на АЧХ появляется подъем в 0,4 дБ на частоте 66 Гц.

*Вывод.* Понизить значение нижней граничной частоты  $F_3$  для корпуса с фазоинвертором, имеющим оптимальные параметры, фактически невозможно (выигрыш в 1 Гц).

*Пример 6.* Для 100ГДН-1 разработан закрытый корпус с оптимальными параметрами. Необходимо выяснить, как изменится АЧХ, если в этот же корпус поместить два таких громкоговорителя?

Объем закрытого корпуса с оптимальными характеристиками  $V_c = 33,11$  л. Войдя в **Loudspeaker** → **Params--full** установим **Numbers** = 2, а **Mechanical Configuration** – Standart. Затем введем прежнее значение  $V_c = 33,11$ . В результате получим, что частота среза  $F_3$  повысилась с 48,7 до 54,3 Гц, а добротность  $Q_{tc}$  с 0,707 до 0,96, в результате чего на частоте 105 Гц появился подъем на 1 дБ.

*Вывод.* К каким-либо серьезным последствием данное конструктивное изменение не привело, но частот среза повысилась на 11 % (при анализе не был учтен объем, занимаемый громкоговорителями).

#### БИБЛИОГРАФИЧЕСКИЙ СПИСОК

1. Электроакустика и звуковое вещание: Учебное пособие для вузов/ Под. ред. Ю.А. Ковалгина. – М.: Горячая линия-Телеком, Радио и связь, 2007.
2. ГОСТ 16122-87. Громкоговорители. Методы измерения электроакустических параметров. – М.: Стандарты, 1987.
3. Афонин С.М. Создание акустических систем в домашних условиях. – М.: Эксмо, 2008.
4. Шихатов А.И. Концертный зал на колесах. – М.: ДМК Пресс, 2000.
5. Петрунин И.А. Акустическая лаборатория аудиофила-радиолобителя. Радиохобби, 2002. – №4. – С. 55-57.
6. Лукин Е. Моделирование акустики в Bass Box Pro. Радиохобби, 2007. – №2. – С. 42.

## СОДЕРЖАНИЕ

ВВЕДЕНИЕ.....	3
1. ИСХОДНЫЕ ДАННЫЕ ДЛЯ МОДЕЛИРОВАНИЯ.....	4
2. МОДЕЛИРОВАНИЕ В JBL SPEAKERSHOP.....	6
2.1. Инсталляция программы.....	6
2.2. Ввод TS-параметров громкоговорителя.....	6
2.3. Графическое представление результатов моделирования.....	8
2.4. Критерии оптимальности моделирования в JBL SpeakerShop.....	10
2.5. Определение геометрических размеров корпуса.....	13
2.6. Определение геометрических размеров фазоинвертора.....	15
2.7. Пользовательская установка параметров моделирования.....	16
2.8. Групповое время задержки акустической системы.....	17
2.9. Импеданс акустической системы.....	18
3. ПРИМЕРЫ ПРАКТИЧЕСКОГО ИСПОЛЬЗОВАНИЯ JBL SPEAKERSHOP.....	19
БИБЛИОГРАФИЧЕСКИЙ СПИСОК.....	21

КЛИМЕНКО Владимир Викторович  
КРАВЕЦ Андрей Викторович.

# КОМПЬЮТЕРНОЕ МОДЕЛИРОВАНИЕ АКУСТИЧЕСКИХ СИСТЕМ

Методическое пособие  
по курсу

## Звукотехника

Ответственный за выпуск  
Редактор  
Корректор

Клименко В.В.  
Селезнева Н.И.

ЛР № 020565 от 23.06.97 г.

Подписано к печати

Формат 60×80  $\frac{1}{16}$ .

Бумага офсетная.

Печать офсетная.

Усл. п.л. – 1,5

Уч-изд. л. – 1,3.

Заказ № .

Тираж 100 экз.

«С»

---

Издательство Технологического института  
Южного федерального университета  
ГСП 17А, Таганрог, 28, Некрасовский, 44

Типография Технологического института  
Южного федерального университета  
ГСП 17А, Таганрог, 28, Энгельса, 1