

УДК 628.5.17.2:534.83

## МОДЕЛИРОВАНИЕ И РАСЧЕТ НИЗКОЧАСТОТНОГО ЗВУКА В ГАЗОВОДНЫХ СИСТЕМАХ ЭНЕРГЕТИЧЕСКИХ УСТАНОВОК С ИСПОЛЬЗОВАНИЕМ МЕТОДА АКТИВНОЙ КОМПЕНСАЦИИ

© 2010 А.В. Васильев, В.В. Пимкин, И.В. Буцаев, Е.В. Васильев

Тольяттинский государственный университет

Поступила в редакцию 14.12.2010

Описаны результаты моделирования и расчета элементов и систем активной компенсации низкочастотного звука в газопроводных системах энергетических машин и установок.

Ключевые слова: звук, энергетические установки, активная компенсация, моделирование, расчет, газопроводные системы

### 1. ВВЕДЕНИЕ

Снижение уровня звука в области высоких и средних частот в газопроводных системах энергетических машин и установок достаточно эффективно осуществляется традиционными средствами: пассивными (реактивными, диссипативными) глушителями и звукоизоляцией. Метод активной компенсации все более широко используется для снижения низкочастотного звука. Этот метод развивается за последние десятилетия с появлением высокопроизводительной компактной цифровой вычислительной техники.

Данная работа посвящена проблемам моделирования и расчета элементов и систем активной компенсации низкочастотного звука в газопроводных системах энергетических машин и установок.

### 2. МАТЕМАТИЧЕСКАЯ МОДЕЛЬ

Численные методы (метод конечных элементов, метод граничных элементов, их комбинация), несомненно, обладают широкими возможностями (LMS Virtual.Lab Acoustics, ANSYS) [4-6]. Однако такое моделирование и программное обеспечение довольно дорогостоящее и зачастую недоступно. В связи с этим оно используется в системах, где преобладает трёхмерное представление объекта моделирования. Передача и излу-

чение звука в газопроводных системах энергетических установок в низкочастотном диапазоне и параметры глушителей шума могут быть эффективно описаны с помощью аналитической одномерной модели, основанной на методе электроакустических аналогий.

Газопроводная система при моделировании может быть разбита на ряд акустических элементов, выполненных в виде участков с различными сочленениями: расширениями, камерами, отводными каналами и т. п. [1-3]. При этом делается ряд допущений:

- при движении газового потока по волноводу возмущения давления  $p$  и плотности  $\rho$  малы по сравнению с величинами для внешней среды  $p_0$  и  $\rho_0$ ;

- пренебрегаем небольшими колеблющимися величинами при описании формы одномерных колебаний акустического давления (т. е. волновое уравнение является линейным);

- операторы дифференцирования в волновом уравнении являются "линейными".

Параллельно с электроакустической моделью, расчёт которой осуществляется в частотной области, авторами разработана дискретно-временная модель. Её назначение – моделирование цифровой системы управления, формирование различного рода сигналов, а также предоставления таких инструментов визуализации рассчитанных результатов, как осциллограф, анализатор спектра и т. п. Дискретно-временная модель строится на основе "дискретных цифровых элементов". Такой элемент имеет некоторое количество входов  $I$  и некоторое количество выходов  $O$ . На входы подаются сигналы (вещественные числа), согласно реализуемой элементом функции осуществляется вычисление выходных сигналов. Некоторые элементы, например такие, как "осциллограф" ( $I = 1, O = 0$ ) только считывают информацию со входов и отображают её в своей экранной форме. Другие же, например "ге-

---

Андрей Витальевич Васильев – доктор технических наук, профессор, директор института химии и инженерной экологии. E-mail: avassil62@mail.ru

Пимкин Владимир Владимирович – аспирант кафедры "Механика и инженерная защита окружающей среды". E-mail: NIL9@tltsu.ru

Буцаев Илья Валериевич – аспирант кафедры "Механика и инженерная защита окружающей среды". E-mail: NIL9@tltsu.ru

Евгений Викторович Васильев – аспирант кафедры "Механика и инженерная защита окружающей среды". E-mail: ea\_komlik@mail.ru

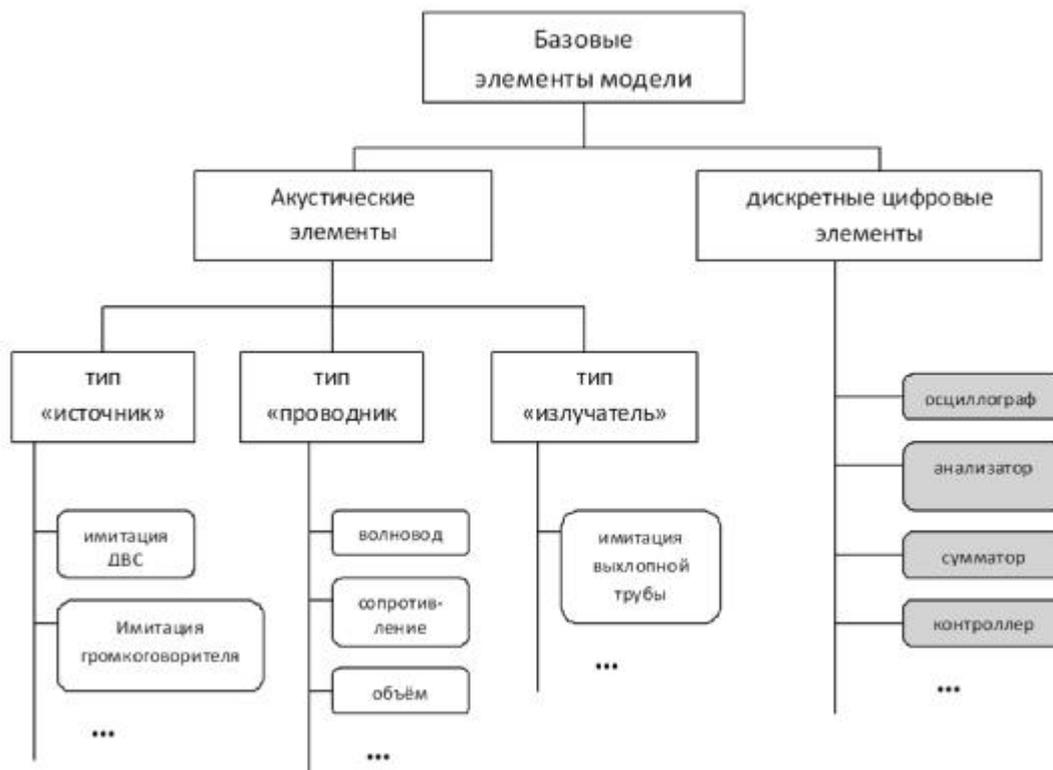


Рис. 1. Иерархия элементов модели

нератор гармонических сигналов” ( $I = 0$ ,  $O = 1$ ) лишь формируют сигналы на своём выходе. Более сложные элементы, подобные модели контроллера осуществляют расчёт выходных сигналов по собственной подпрограмме. На рис. 1 представлена иерархическая схема применяемых в программе элементов.

Акустические элементы при моделировании можно разделить на три основных типа:

1. “Источник” – имитация реальных источников звука (громкоговоритель, ДВС); моделируется набором гармоник (частота, амплитуда, фаза).

2. “Проводник” – имитирует различные части газоведа; моделируется матрицей передачи.

3. “Излучатель” – описывает передачу акустической мощности из газоведа в окружающую среду и отражение от открытого конца трубы.

Каждый акустически элемент характеризуется следующими свойствами:

- Количество присоединений  $n$ ;
- Математическое описание;
- Геометрическая форма и размер сечений волновода в местах стыковки.

### 2.1. Количество присоединений, $n$

Определяет количество возможных соединений с другими акустическими элементами. Например, для трубы-волновода  $n = 2$ , для тройника  $n = 3$ , для излучателя или источника  $n = 1$ .

### 2.2. Математическое описание

Для каждого акустического элемента описываются выражения элементов матрицы передачи (пассивный четырехполюсник в терминологии электроакустических аналогий)

$$\begin{bmatrix} A & B \\ C & D \end{bmatrix}, \tag{1}$$

в виде

$$\begin{aligned} A &= a(\omega, \dots), \\ B &= b(\omega, \dots), \\ C &= c(\omega, \dots), \\ D &= d(\omega, \dots), \end{aligned} \tag{2}$$

где  $\omega$  – частота звуковой волны.

Таким образом, все элементы матрицы представляются как функции от частоты и некоторых других параметров, индивидуальных для каждого акустического элемента (например, такие геометрические характеристики, как площадь сечения и длина газоведа).

При этом подобные матрицы передачи акустического элемента составляются для всех направлений, т. е. всех возможных вариантов пар “вход-выход”. Таким образом, для трубы будет

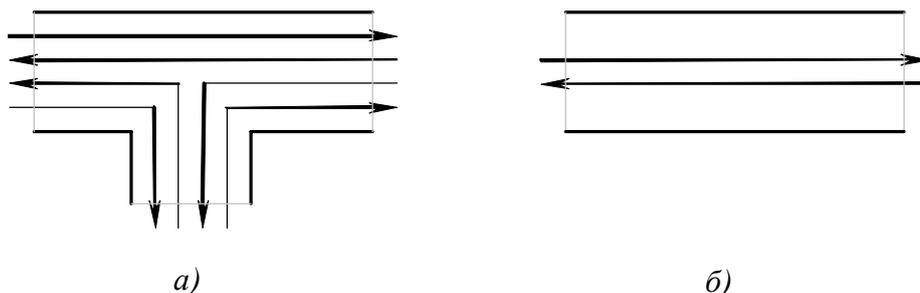


Рис. 2. Возможные направления прохождения волны

определено две матрицы, для тройника – шесть. На рисунке каждая линия изображает одно из возможных направлений передачи.

### 2.3. Геометрическая форма и размер сечений волновода в местах стыковки

Каждое присоединение описывается геометрическими размерами его сечения. Построение модели акустического волновода осуществляется путём его сборки из отдельных акустических элементов. Каждый элемент может стыковаться с другим элементом, обладающим входом с таким же сечением.

В дополнение к этому элемент типа “источник” содержит список (массив) мод, каждая из которых характеризуется следующими величинами: частота, амплитуда, фаза.

В общем случае источник является многомодовым, однако в простейших случаях представляется одной гармоникой. Для упрощения хранения набора гармоник и упрощения обработки посредством дискретного преобразования Фурье список мод представим в виде массива комплексных чисел, действительная часть которых определяет амплитуду, мнимая – фазу, а порядковый номер в массиве – соответствующую ему частоту.

Сочленение временной и частотной моделей происходит путём введения специальных элементов обладающих входами/выходами обоих типов. Основные из них:

“Одномодовый громкоговоритель”

На входе: сигналы, задающие амплитуду волны  $A$ , частоту  $\omega$ , фазу  $j$

На выходе: гармоника с соответствующими характеристиками:

$$P = A \cdot e^{j(\omega t + \varphi)}$$

$$\dot{X} = P/Z_a \quad (3)$$

“Многомодовый громкоговоритель”

На входе: сигнал, задающий амплитуду волны  $A(t)$

На выходе:  $N$  гармоник, пересчитанных бы-

стрым преобразованием Фурье (FFT) по выборке из  $A(t)$ .

“Излучатель с микрофоном”

На входе: присоединение к волноводу

На выходе: рассчитанный по всем модам от всех источников суммарный уровень звука  $P_s(t)$ .

### 3. ПРОЦЕСС МОДЕЛИРОВАНИЯ

Интерфейс программы построен по идеологии, схожей с модулем Simulink™ пакета MATLAB™. Добавление элементов осуществляется перетаскиванием их мышью из панели элементов на рабочее пространство. Перемещение элементов в рабочем пространстве и создание между ними связей также производится при помощи мыши. Двойным щелчком по элементу вызывается индивидуальная оконная форма данного элемента. Она отображает визуальную информацию по элементу и позволяет редактировать его параметры.

Пользовательский интерфейс программы продемонстрирован на рис. 3.

Запуск модели (кнопка “старт” [4]) инициирует расчёт модели на заданном интервале времени.

### 4. РАСЧЁТ И ОСОБЕННОСТИ РЕАЛИЗАЦИИ МОДЕЛИ

Расчёт модели осуществляется на заданном интервале времени с выбранной частотой дискретизации по времени (намного меньшей периода исследуемых частот), согласно следующим принципам.

Для “дискретных цифровых элементов” каждый квант времени осуществляется пересчёт выходных сигналов по состоянию входных согласно реализуемой элементом функции.

Для акустических элементов:

1. Для каждого источника согласно теории графов определяется путь (цепочка элементов) от источника до излучателя.

2. Для каждой моды каждого из источников согласно определённому пути вычисляется матрица передачи, равная произведению всех матриц передачи в цепочке.

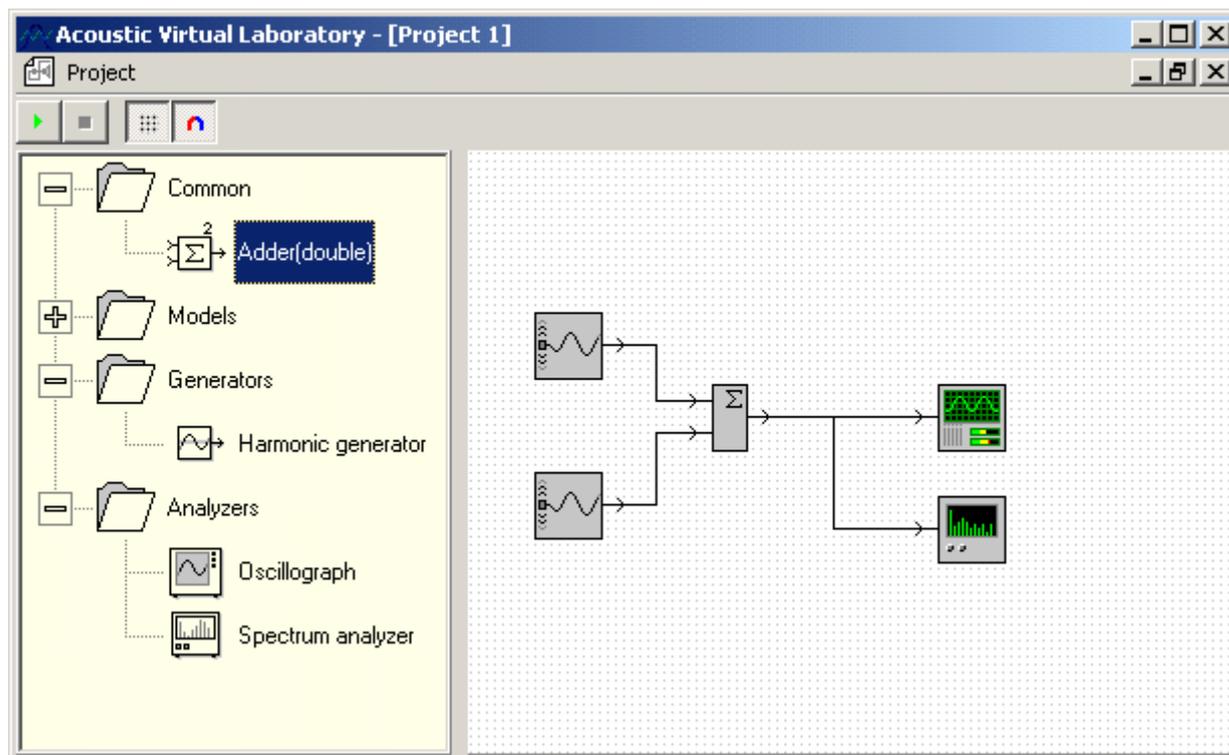


Рис. 3. Пользовательский интерфейс программы

$$A_{\Sigma V} = \prod_{j=1}^k A_j = \begin{bmatrix} A_1 & B_1 \\ C_1 & D_1 \end{bmatrix} \times \begin{bmatrix} A_2 & B_2 \\ C_2 & D_2 \end{bmatrix} \times \dots \times \begin{bmatrix} A_k & B_k \\ C_k & D_k \end{bmatrix}. \quad (4)$$

Здесь  $k$  – количество звеньев (элементов) в цепочке.

3. Для каждого излучателя согласно принципу суперпозиции для каждого кванта времени вычисляются энергия излучения, уровень звуковой мощности и величина давления  $p(t)$ .

Для повторного использования построенной модели предусмотрено её сохранение в специальный файл проекта, а также загрузка из него. Принимая во внимание неоднородность хранимых данных, их строгую иерархию и способы работы с ними, в качестве формата хранения данных модели выбран XML. EXtensible Markup Language (расширяемый язык разметки), или XML как его принято называть, является одним из языков разметки документов, созданным для того, чтобы можно было воспользоваться языком SGML (Standard Generalized Markup Language – стандартный язык общей разметки) в среде World Wide Web. В отличие от HTML, который определяет фиксированный или статистический класс документов, XML позволяет определять собственные пользовательские классы документов.

Кроме этого, существует широкий ряд средств автоматизации разработки программного кода для работы с данным форматом, и XML достаточно распространён, хорошо стандартизован.

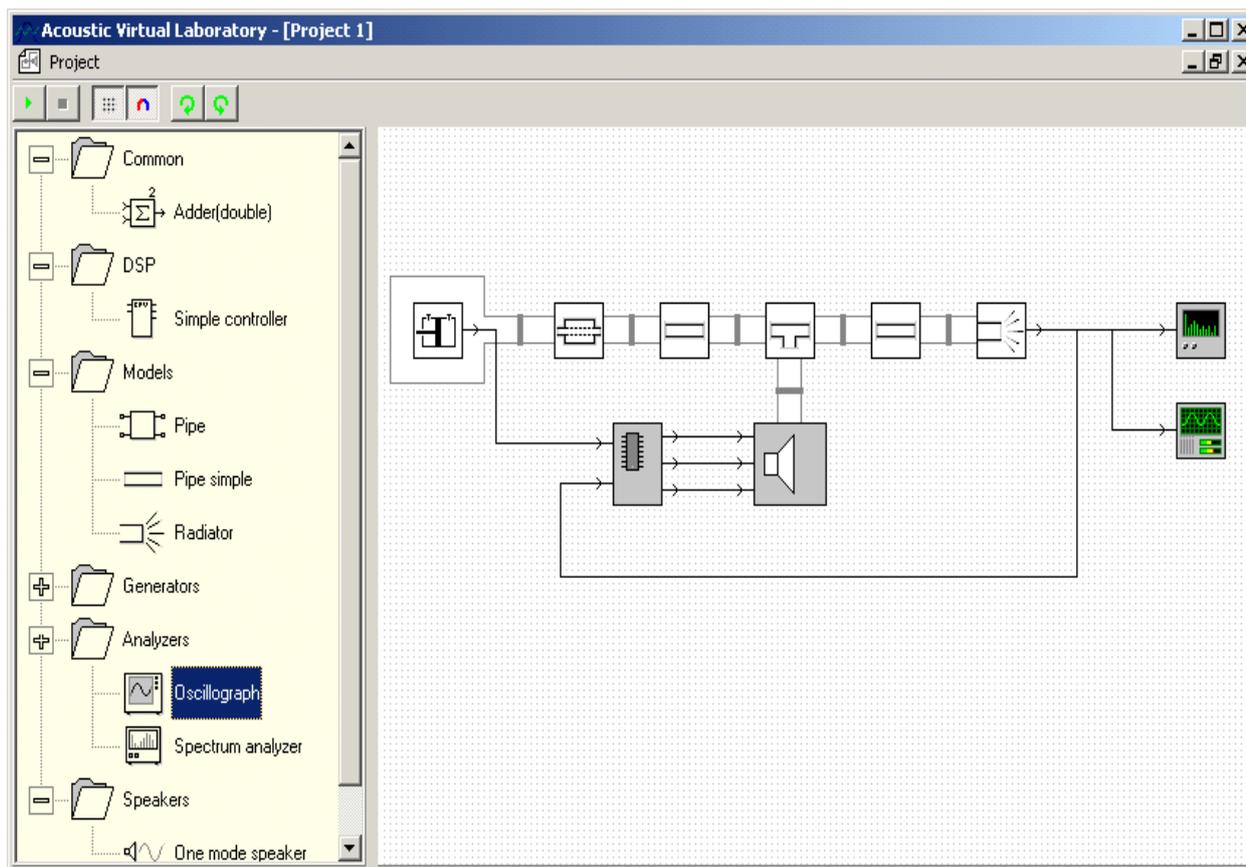
Схема сохранения данных построена по принципу контейнеров – в каждом элементе ре-

ализуются собственные функции чтения и записи индивидуальных данных в XML объект. Кодирование производилось на языке высокого уровня C++ с помощью визуальной среды разработки Borland C++ Builder 6.

Реализация элементов модели в программе выполнена следующим образом. Все элементы модели являются наследниками абстрактного класса TVLObject. Код же каждого элемента находится в отдельном файле – подключаемой библиотеке DLL (dynamic-link library). Благодаря этому программа становится гибко перенастраиваемой и закладывает фундамент для дальнейшего развития. Добавление новых элементов модели в программу становится возможным путём копирования в её папку новых библиотек (dll-файлов).

Другим преимуществом такой реализации является то, что исчезает привязка к конкретной среде разработки. Используя описанный стандарт на интерфейс элемента модели (посредством абстрактного класса TVLObject) пользователь, обладающий навыками программирования, может самостоятельно добавить в программу собственные элементы. Для облегчения процесса разработки собственных элементов в среде Borland C++ Builder сформирован шаблон проекта DLL.

Пример реализации результатов моделирования и разработанного программного обеспечения для расчета активной компенсации звука в газоводных системах энергетических установок показан на рис. 4. Программное обеспечение



**Рис. 4.** Пример использования программного обеспечения для расчета активной компенсации звука в газопроводных системах энергетических установок

позволяет производить расчеты акустических характеристик элементов активной компенсации звука и газопроводных систем энергетических установок для различных параметров компенсируемого источника звука, элементов газопроводных систем, активных компенсирующих источников, анализаторов и др.

## 5. ЗАКЛЮЧЕНИЕ

Описаны результаты моделирования и расчета элементов и систем активной компенсации низкочастотного звука в газопроводных системах энергетических машин и Использование результатов моделирования и разработанного программного обеспечения позволяет рассчитывать акустические параметры активных компенсирующих источников и газопроводных систем энергетических установок.

*Авторы выражают благодарность Министерству образования и науки РФ за поддержку работы в рамках мероприятия 1.2.1 "Проведение научных исследований научными группами под*

*руководством докторов наук" направления 1 федеральной целевой программы "Научные и научно-педагогические кадры инновационной России" на 2009 – 2013 годы.*

## СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ

1. Васильев А. В. Снижение низкочастотного шума и вибрации в газопроводах энергетических установок с использованием метода активной компенсации СПб.: Изд-во Политехн. ун-та, 2004 . - 294 с.
2. Васильев А. В. Акустическое моделирование и комплексное снижение шума автомобильных двигателей внутреннего сгорания: Монография Самара: Издательство Самарского научного центра РАН, 2004 . - 296 с.
3. Лепендин Л. Ф. Акустика: Учеб. пособие для вузов. - М.: Высш. школа, 1978 . - 448 с. , ил.
4. Coyette J.-P, Wynendaele H. A review of numerical techniques for solving acoustic problems. NOISE-93, St.-Petersburg, Russia, 1993.
5. Von Estorff O. On the accuracy of numerical methods in acoustics: comparison of measurements and calculations. INTER NOISE 93, Leuven, Belgium, August 1993.
6. Augustinovich F. Calculation of noise control by numerical methods - what we can do and what we cannot do - yet. INTER NOISE 97, Budapest, Hungary, 1997.
7. Munjal M.L. Acoustics of ducts and mufflers. New York, Wiley Interscience, 1987.

**MODELING AND CALCULATION OF LOW FREQUENCY SOUND IN GAS-GUIDE SYSTEMS OF ENERGETIC PLANTS BY USING OF ACTIVE COMPENSATION METHOD**

© 2010 A.V. Vasilyev, V.V. Pimkin, I.V. Butsaev, E.V. Vasilyev

Togliatti State University

Results of modeling and calculation of elements and systems of active compensation of low frequency sound in gas guide systems of energetic machines and plants have been described.

Key words: sound, energetic plants, active compensation, modeling, calculation, gas guide systems

---

*Andrey Vasilyev, Doctor of Technical Science, Professor, Director of the Institute of Chemistry and Environmental Engineering. E-mail: avassil62@mail.ru*

*Vladimir Pimkin, Postgraduate of Department of Mechanics and Environmental Engineering. E-mail: NIL9@tltsu.ru*

*Ilya Butsaev, Postgraduate of Department of Mechanics and Environmental Engineering. E-mail: NIL9@tltsu.ru*

*Eugene Vasilyev, Student of Department of Mechanics and Environmental Engineering. E-mail: ea\_komlik@mail.ru*