УДК 681.8

ДИНАМИЧЕСКИЕ МОДЕЛИ В АКУСТИЧЕСКОМ ПРОЕКТИРОВАНИИ МАЛЫХ МУЗЫКАЛЬНЫХ ПОМЕЩЕНИЙ

Хвостицкая А.И.

Санкт-Петербургский государственный институт кино и телевидения,
Санкт-Петербург, Россия
e-mail: hvostitskaya@yandex.ru

Аннотация. В данной статье рассматриваются главные характеристики динамической модели в виде акустической цепочки связанных между собой осцилляторов в многомодовом звуковом поле, а также её свойства, которые неблагоприятно влияют на акустическую картину при проектировании малого музыкального помещения. Выявлены и проанализированы основные формулы, помогающие в выполнении корректировки акустики на стадии проектных работ.

Ключевые слова: акустика, малое музыкальное помещение, акустическая цепочка, система осцилляторов, многомодовое поле, стоячие волны, звуковая волна, моды, частота, амплитудный коэффициент.

DYNAMIC MODELS IN ACOUSTIC DESIGN OF SMALL MUSIC ROOMS

Khvostitskaya A.I.
St. Petersburg State University of Film and Television, St. Petersburg, Russia
e-mail: hvostitskaya@yandex.ru

Abstract. This article discusses the main characteristics of a dynamic model in the form of an acoustic chain of interconnected oscillators in a multimode sound field, as well as its properties that adversely affect the acoustic picture when designing a small music room. The main formulas that help in performing acoustics correction at the stage of design work are identified and analyzed.

Keywords: acoustics, small music room, acoustic chain, system of oscillators, multimode field, standing waves, sound wave, modes, frequency, crest factor.

В музыкальных помещениях с малой площадью довольно трудно достичь хорошего показателя акустических свойств, поэтому эти свойства вносят определённые коррективы на качество звучания получающихся композиций, воспринимаемое исполнителем и слушателем. Проектирование акустики малых музыкальных помещений является одной из важнейших и кропотливых задач при создании необходимых учебных классов и репетиционных комнат.

Методологическая основа научного исследования базируется на методах анализа и синтеза. Сначала благодаря анализу подробно рассматривается теоретическая составляющая о системе связанных осцилляторов и многомодовом поле, а после через синтез устанавливаются взаимодействия между их признаками и свойствами, объединяя между собой полученные результаты для дальнейшего исследования акустического проектирования.

Системой связанных осцилляторов называют структурную схему, состоящую из определённого количества N маятников, которые последовательно соединены между собой пружинами, или систему, которая представляет собой электрические контуры, связанные друг с другом, или наборы материальных точек, также соединённых вместе пружинами (рисунок 1). В случае, когда связь между осцилляторами отсутствует, каждый из тел совершает независимые колебания около своей точки равновесия, и их положение можно ограничить определённой областью пространства.[1]

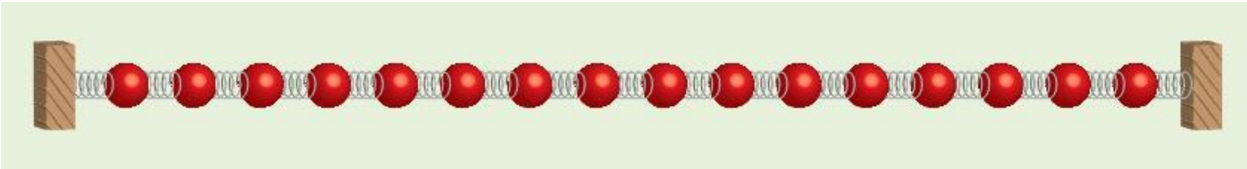

Рисунок 1. Пример системы связанных осцилляторов, показанный на классической акустической цепочке Ферми-Паста-Улама [2]

Но в системе связанных осцилляторов локализация колебаний имеет другую картину. Система связанных осцилляторов приходит в действие благодаря одиночному сигналу, который соответствует возникновению одномодового (периодического) колебания, или их набору в виде преобразованного звукового сигнала, который показывает многомодовый характер звукового поля помещения. Колебания, возникшие у первого осциллятора, возбуждают колебания соседних осцилляторов, которые, в свою очередь, распространяют их по цепочке следующим телам из-за упругих свойств пружины, образуя ансамбль из элементов. Первоначально возбуждённые колебания первого осциллятора прекратятся, передавая колебательную энергию вдоль полученной цепи. Это действие в дальнейшем приводит к последовательному смещению сгущений с постоянной скоростью и уменьшению плотности соединения масс, упруго связанных между собой. Данный перенос колебательной энергии системы осцилляторов в пространстве является волновым распространением частиц.[3]

Рассмотрим подробнее поведение акустической цепочки в многомодовом пространстве. Многомодовое пространство образуется благодаря явлению стоячих волн, где при движении две бегущие в противоположные направления звуковые волны встречаются, при этом они могут усиливать друг друга, а амплитуда результирующей волны должна оказаться вдвое больше амплитуды складывающихся вместе волн. Акустическая цепочка в это время никуда не двигается, как бы «стоит» в комнате, а впоследствии происходит её так называемое «расщепление» благодаря воздействию квазигармонических составляющих звучания.

Во время непрерывной работы звукового источника, волна, которая исходит из него, будет складываться с отражённой волной. Для простоты, можно рассмотреть тот случай, где отражённая и падающая волны имеют практически одинаковую амплитуду. Уравнение (1) показывает выражение звуковой волны, которое выходит из источника, а уравнение (2) описывает поведение её отражения:

$$\xi_1 = Acos(\omega t - kx), \quad (1)$$

$$\xi_2 = Acos(\omega t + kx + \pi), \quad (2)$$

где А – амплитуда бегущей волны, ω – циклическая частота колебаний, k=ω/c – волновое число.

В результате сложения этих двух волн (уравнения 1 и 2) колебание в точке x будет подвергаться воздействию следующего закона (выражение 3):

$$\xi = \xi_1 + \xi_2 = 2A * \sin(kx) * \sin(\omega t) = B(x) * \sin(\omega t) \quad (3)$$

Получившееся выражение звуковой волны имеет название стоячей волны. Также получается, что колебательные амплитуды B(x) разных точек волны, которая получается в результате, различны. Точки, где амплитуда колебаний может равняться нулю, имеют название узлы. Для того чтобы определить их координаты, необходимо взять B(x)=0 или sin(kx)=0. А точки, чьи колебания имеют максимальную амплитуду, называются пучностями. Определить их координаты возможно из уравнения sin(kx)=±1. Из-за этих узлов и пучностей в комнате образуются так называемые «провалы» и «пики», неблагоприятно влияющие на акустическую картину комнаты. [4]

Результаты моделирования системы осцилляторов акустической цепочки в многомодовом пространстве (поле стоячих волн) представлены на рисунке 2:

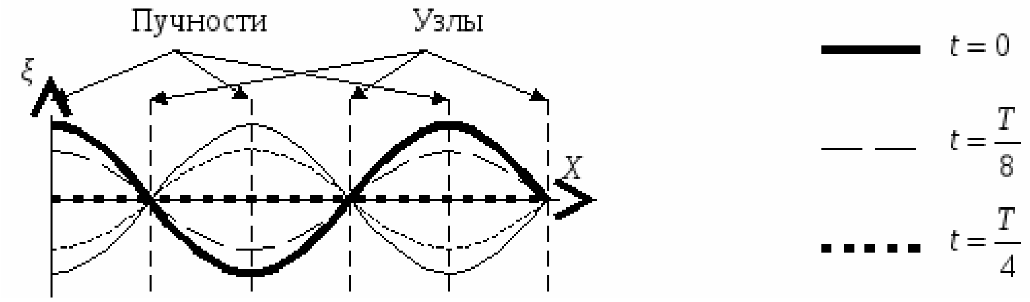

Рисунок 2. Поведение акустической цепочки системы осцилляторов в звуковом поле стоячих волн [4]

Также стоит обратить внимание на массу тел во время процесса колебаний, которая при распространении волны частицы остаётся неизменной, совершается только передача колебательной энергии путём изменения фаз колебаний цепи соседних соединённых частиц. Вся звуковая энергия, которая образуется звуковым источником в закрытых пространствах, расходуется на возбуждение аксиальных волн, т.е. волн следующих типов [5],[6],[7]:

- осевые, волны первого типа или осевые моды; их траектория волнового вектора параллельно направлена одному из рёбер рассматриваемого прямоугольного пространства. Они имеют огромное влияние на формирование звуковой среды в помещении, в особенности маленьких размеров. Звуковая энергия таких волн составляет 50% от общего числа образовавшейся энергии;

- тангенциальные или касательные, их моды имеют круговое движение, достигая четырёх сторон комнаты и оставаясь параллельно расположенными остальным двум сторонам. Звуковая энергия касательных волн образует около 25%;
- косые, их траектория волнового вектора направлена на последовательное отражение между всеми шестью поверхностями, которые ограждают прямоугольное помещение, не распространяясь параллельно ни одной из них. Такие волны быстрее всего затухают, поэтому доля от общего числа звуковой энергии составляет примерно 12%.

Многомодовая характеристика вызывает состояние колебания всей системы осцилляторов, демонстрируя при этом либо одну, либо другие моды, с периодичностью колебаний действующих частот, которые зависят от значений начальных положений.

Простейшим примером образования многомодового поведения звукового поля является возбуждение в помещении детерминированного периодического сигнала или квазипериодического, чьи характеристики временной формы звукового давления каждой точки рассматриваемого малого музыкального помещения с облицовкой, которая равномерно распределена и имеет слабое поглощение, можно представить гармонической комплексной характеристикой функции в виде суперпозиции (формула 4):

$$\widetilde{P_{\text{ст}}}(\omega, x, y, z, t) = B \sum_N \widetilde{A_{N\text{ст}}}(\omega, x, y, z, t) e^{-j(\omega t + \Psi_{N\text{ст}})}. \qquad (4)$$

Выделяем действительную часть выражения (формула 5):

$$P_{\text{ст}}(\omega, x, y, z, t) = B \sum_N A_{N\text{ст}}(\omega, x, y, z, t) \cos(\omega t + \Psi_{N\text{ст}}), \qquad (5)$$

где $A_{N\text{ст}}$ – нормируемый амплитудный коэффициент, $\Psi_{N\text{ст}}$ – нормируемый фазовый коэффициент, оба этих коэффициента определяются через характеристические функции приёма и излучения звука; B – общий амплитудный множитель; x, y, z – определённые координаты точки поля в пространстве; ω – круговая частота вынужденных колебаний, t – время.[8]

Из совокупности выражений (10-11) можно получить образованные по всему частотному диапазону пространственную и частотную характеристики рассматриваемого помещения, но для их расчёт требуется рассчитать значение функции нормируемого амплитудного коэффициента $A_{N\text{ст}}$. Если не брать во внимание такое свойство, что в общих случаях характеристическая функция представляется сложной зависимостью гиперболического вида, взятой от комплексного аргумента, то при идеализации условий помещения, а именно обозначения его точно прямоугольным, полностью гладким, с объёмом, почти не поглощающим звук, коэффициент можно записать в виде следующих гармонических сомножителей (формула 6):

$$A_{N\text{ст}} = \cos\frac{\pi n_x x}{L_x}\cos\frac{\pi n_y y}{L_y}\cos\frac{\pi n_z z}{L_z}, \qquad (6)$$

где L_x, L_y, L_z - являются размерами прямоугольного помещения; n_x, n_y, n_z – это целые числа натурального ряда, тройка которых указывает порядок (N) моды помещения.

Также для анализа звукового поля используется среднеквадратичная формула звукового давления (формула 7) при помощи операций кадрирования и суммирования определяются характеристики резонансного контура помещения.

$$\overline{P_{\text{ст}}}(\omega) = \sum_N \frac{A_{N\text{ст}}\omega^2}{[(\omega^2-\omega_N^2)\omega]^2+(\frac{2\omega_N K_N}{\omega})^2}, \qquad (7)$$

где ω_N – собственная круговая частота определённой N-ой моды помещения, а K_N – коэффициент затухания этой же N-ой моды. Если N будет стремиться к значению 1, то это означает наличие выраженного характера резонанса в звуковом поле помещения, т.е. рядом с каждой вынужденной частотой (или частотной полосой) располагается только единственная собственная частота помещения. Если рассматривать интервал частот вынужденных колебаний, в который попадает большое количество собственных мод малого музыкального помещения, то резонансная острота становится меньше, а при очень большом значении элемента N процесс превращается из детерминированного в статистический. Исключением этого правила являются так называемые случаи вырождения, это моменты, когда тройка чисел, определяющий порядок моды, попадает на одинаковую частоту.[8]

При помощи этих данных возможно осуществление точного расчёта величин собственных частот помещения и определение количественных параметров пространства, т.е. расчёт общего количества частот, находящийся в полосе анализа, и спектральной плотности частотного распределения, которые являются одними из главных критериев оценки происходящих волновых процессов при проектировании малых музыкальных помещений.

Список источников

1. Болотнов Д.В., Запрягаев С.А. Распознавание звуковых образов на основе анализа отклика системы осцилляторов. Вестник ВГУ, серия: «Системный анализ и информационные технологии» №1, 2012. – стр. 168-173

2. Ходанович А.И. Математическое моделирование на компьютере. Сборник задач и упражнений. – СПб.: Изд-во СПбГУКиТ, 2009. – 118 с.

3. Связанные гармонические осцилляторы. Упругие волны [электронный ресурс] //URL: https://helpiks.org/4-61264.html (дата обращения: 04.12.2022 г.)

4. Чмерева Т.М. Физика колебаний и волн: Методические указания к лабораторному практикуму. – Оренбуг: ГОУ ВПО ОГУ, 2003. – 75 с.
5. Мандель Л., Вольф Э. Оптическая когерентность и квантовая оптика. – Москва: Физмалит, 2000. – 896 с.
6. Астахов О.В. Мультистабильность, квазипериодичность и хаос в многомодовых автоколебательных системах, построенных на базе осциллятора Ван дер Поля. Автореферат диссертации на соискание учёной степени кандидата физико-математических наук. – Саратов, 2012. Научная электронная библиотека диссертаций и авторефератов; //URL: www.dissercat.com (дата обращения: 04.12.2022 г.)
7. Лихницкий А.М. Комната прослушивания. Рекомендации по проектированию [электронное пособие] //URL: https://cxo.lv/images/stories/Books/electro/aml.pdf (дата обращения: 04.12.2022 г.)
8. Борисов Л. А., Щиржецкий Х. А., Насонова Е. В. Акустика малых музыкальных помещений. Научный журнал «Academia. Архитектура и строительство» 2010.

Научный руководитель:

А.И. Ходанович – доктор педагогических наук, профессор, заведующий кафедрой аудиовизуальных систем и технологий СПбГИКиТ