



**МИНИСТЕРСТВО КУЛЬТУРЫ РОССИЙСКОЙ ФЕДЕРАЦИИ
ФЕДЕРАЛЬНОЕ ГОСУДАРСТВЕННОЕ БЮДЖЕТНОЕ ОБРАЗОВАТЕЛЬНОЕ
УЧРЕЖДЕНИЕ ВЫСШЕГО ОБРАЗОВАНИЯ
«САНКТ-ПЕТЕРБУРГСКИЙ ГОСУДАРСТВЕННЫЙ ИНСТИТУТ КИНО И ТЕЛЕВИДЕНИЯ»**

Факультет телевидения, дизайна и фотографии
Кафедра аудиовизуальных систем и технологий

ДОПУЩЕНА К ЗАЩИТЕ
Заведующий кафедрой
аудиовизуальных систем и
технологий

_____ А.И. Ходанович
_____ 2021 г.

**ВЫПУСКНАЯ
КВАЛИФИКАЦИОННАЯ РАБОТА**

на тему: Исследование нелинейных волновых процессов в психоакустике
музыкальных звуков
по направлению подготовки 11.03.01 «Радиотехника»

Руководитель д.пед.н, проф. Ходанович Александр Иванович

Нормоконтроль д.пед.н, проф. Ходанович Александр Иванович

Обучающийся гр. 1734 Лопаскина Екатерина Андреевна

Проверка на антиплагиат
Оригинальность _75,2_%

Ответственный
Ходанович А.И.

**Санкт-Петербург
2021**

Оценка «отлично»
Секретарь ГАК
Патрикеева Е.Ю.

Содержание

Введение	5
Глава 1. Методология научных исследований в музыкальной акустике и психоакустике	7
1.1. Методы математической физики в музыкальной акустике.....	7
1.2. Физика слуха в истории и методологии психоакустики.....	21
Глава 2. Нелинейные динамические модели колебательных и волновых процессов в психоакустике	31
2.1. Свободные колебания длинной наноразмерной акустической цепочки связанных осцилляторов	31
2.2. Вынужденные колебания длинной наноразмерной системы Ферми-Паста-Улама в модели бегущей волны на базилярной мембране	338
Глава 3. Комбинационное рассеяние звука в психоакустике	43
3.1. Звукотембральные факторы акустического сигнала.....	43
3.2. Субъективные гармоники в спектре звуковых колебаний. Музыкальное явление Тартини.....	46
Глава 4. Экономическое обоснование и оценка безопасности труда и жизнедеятельности в условиях проекта	52
4.1. Техничко-экономическое обоснование проекта	52
4.2. Безопасность жизнедеятельности и экология	5757
Заключение.....	677
Список литературы	69

ВВЕДЕНИЕ

Объект исследования - методология научных исследований нелинейных волновых процессов в психоакустике.

Предмет исследования - модели нелинейных волновых процессов в психоакустике музыкальных звуков.

Цели и задачи исследования – провести анализ научной и методической литературы по теме исследования и на этом основании определить методологию научного исследования в разработке нелинейной динамической модели волновых процессов в базилярной мембране слуховой системы человека; изучить методы расчёта амплитудного спектра музыкальных инструментов в формализме моделей математической физики; исследовать явление комбинационного рассеяния звука с экспериментальной проверкой полученных теоретических данных. Провести апробацию результатов выпускной квалификационной работы.

Актуальность исследования заключается в изучении волновых процессов в психоакустике с позиции методологии моделирования нелинейных колебаний в дискретной динамической системе. Исследование резонансов длинной наноразмерной цепочки связанных осцилляторов Ферми-Паста-Улама, а также нелинейных явлений комбинационного рассеяния музыкального звука. Развитие классических научных работ в психоакустике нобелевского лауреата Георга фон Бекеша. Рассматриваются методические аспекты изучения фундаментальных научных проблем с использованием современных компьютерных систем и технологий.

Научная новизна исследования

Впервые в практике выпускных квалификационных работ:

- ✓ Исследованы нелинейные динамические модели волновых процессов в психоакустике музыкальных звуков.
- ✓ Получен амплитудный спектр колебания струны, прямоугольной и круглой мембраны в случае возбуждения прямоугольным импульсом.

- ✓ Исследованы резонансы энергии вынужденных колебаний длинной наноразмерной системы Ферми-Паста-Улама в динамической модели базилярной мембраны, а также получена зависимость от частоты периодической внешней силы.
- ✓ Проведён спектральный анализ комбинационного рассеяния, а также экспериментальная проверка нелинейных свойств слуха при наличии субъективных гармоник музыкального звука.

Теоретическая и практическая значимость работы

В выпускной квалификационной работе развита теория нелинейных волновых процессов в психоакустике на основе классических работ нобелевского лауреата Георга фон Бекеша.

В работе использовалось современное программное и математическое обеспечение, интерактивная графика системы компьютерной математики Maple. Разработаны алгоритмы и комплекс программ математического моделирования колебательных и волновых процессов в дискретной динамической системе Ферми-Паста-Улама. Проведен расчет частоты субъективной гармоник в спектре комбинационного рассеяния звука, а также экспериментальная проверка музыкального явления Тартини.

Разработанный комплекс программ целесообразно использовать в научной работе при изучении методов математического и компьютерного моделирования, для иллюстраций и демонстрационных примеров в общем курсе физики, а также при изучении дисциплины «Теоретические основы акустики» и «Нелинейные колебания и волны» для направления подготовки бакалавров 11.03.01 - Радиотехника.

ГЛАВА 1. МЕТОДОЛОГИЯ НАУЧНЫХ ИССЛЕДОВАНИЙ В МУЗЫКАЛЬНОЙ АКУСТИКЕ И ПСИХОАКУСТИКЕ

1.1. Методы математической физики в музыкальной акустике

1.1.1 Спектр колебаний конечной струны под действием прямоугольного импульса

Решение задачи о колеблющейся струне, а точнее, математическое описание поведения струны после сообщения ей некоторой возмущающей силы, в XVIII веке породило дискуссию между учёными того времени, а полученное решение дало импульс для развития таких областей математики как теория дифференциальных уравнений в частных производных, математический анализ и теорию функций вещественного переменного, теорию тригонометрических рядов Фурье и теорию обобщённых функций и пространств Соболева. Что интересно, это, возможно, единственная задача, когда чувство слуха привело к важным математическим открытиям.[1]

Во времена античности считалось, что частота колебания является основой высоты звучания тона. И только в XVII веке была установлена точная зависимость между частотой и длиной струны, Исааком Бекманом. Им было дано геометрическое доказательство того, что частота обратно пропорциональна длине, а значит, пифагорейские отношения длин можно также интерпретировать как взаимные отношения частот. Это позволило выявить фундаментальную зависимость, поскольку высота тона определяется исключительно частотой колебания, а длина определяет высоту лишь в тех случаях, когда материал, поперечное сечение и натяжение струны остаются постоянными. Данная зависимость между частотой ν , натяжением T , площадью поперечного сечения A и длиной струны l была экспериментально открыта Марином Мерсеном (1625 г.):

$$\nu \sim \frac{1}{l} \cdot \sqrt{\frac{T}{A}}.$$

В 1713 году Тейлор Брук на основе математических допущений выявил, что отклонение струны от начального положения можно выразить с помощью функции от одной переменной $y = y(x)$. Тейлор предположил, что форма струны в момент колебания имеет вид полусинусоидальной волны:

$$y = k \sin \frac{\pi x}{l},$$

а также установил, что сила, действующая на элемент, пропорциональна d^2y/dx^2 . Узнав об открытии Тейлора, Жан Лерон Д'Аламбер пошёл ещё дальше, и заметил, что отклонение также зависит от времени t , также как от пространственной координаты x , а значит ускорение должно быть выражено d^2y/dt^2 , следовательно, фигурируют частные производные. Это позволило строго применить второй закон Ньютона, и в 1747 году переформулировал закон, найденный Тейлором, в терминах дифференциального уравнения с частными производными и записал уравнение колебания струны в виде того, что мы сейчас называем волновым уравнением, введя обозначения $u(x, t) \equiv y(x, t)$:

$$\frac{\partial^2 u}{\partial t^2} = a^2 \frac{\partial^2 u}{\partial x^2}$$

К исследованию этого уравнения приводит рассмотрение процессов поперечных колебаний струны, продольных колебаний стержня, электромагнитных колебаний, акустических колебаний и др. Это уравнение является простейшим уравнением *гиперболического типа* [2].

Метод Фурье или метод разделения переменных является одним из наиболее распространённых методов решения уравнений с частными производными. Рассмотрим этот метод примере задачи о колебаниях однородной струны, закреплённой на концах. Эта задача сводится к решению волнового уравнения.

Будем искать решение уравнения:

$$\frac{\partial^2 u}{\partial t^2} = a^2 \frac{\partial^2 u}{\partial x^2}, \quad 0 < x < l, \quad t > 0 \quad (1.1.1)$$

$$u(0, t) = 0, u(l, t) = 0, t \geq 0 \quad (1.1.2)$$

и начальным условиям

$$u(x, 0) = f(x), \quad \left. \frac{\partial u}{\partial t} \right|_{t=0} = F(x), \quad 0 \leq x \leq l \quad (1.1.3)$$

Данная математическая модель описывает колебания однородной струны, длины l , закрепленной на концах, если, в какой-то начальный момент времени известны начальные смещения и начальные скорости точек струны.

Решение задачи (1.1.1) – (1.1.3) начнём с поиска частных решений (1.1.1), имеющих вид

$$u(x, t) = T(t)X(x), \quad (1.1.4)$$

где $X(x)$ – функция только переменного x , а $T(t)$ – функция только переменного t . При этом будем полагать, что каждое из решений (1.1.4) удовлетворяет граничным условиям (1.1.2) и не равно нулю. Подставляя (1.1.4) в (1.1.1), получим:

$$T''(t)X(x) = a^2T(t)X''(x)$$

или после деления на XTa^2

$$\frac{T''(t)}{a^2T(t)} = \frac{X''(x)}{X(x)}$$

Поскольку левая часть уравнения является функцией только от t , а правая только от x , то равенство возможно, если они равны одной и той же постоянной:

$$\frac{T''(t)}{a^2T(t)} = \frac{X''(x)}{X(x)} = -\lambda, \quad (1.1.5)$$

где знак минус берётся для удобства дальнейших вычислений.

Из соотношения (1.1.5) получаем два обыкновенных дифференциальных уравнения:

$$T''(t) + \lambda a^2 T(t) = 0, \quad (1.1.6)$$

$$X''(x) + \lambda X(x) = 0. \quad (1.1.7)$$

Граничные условия (1.1.2) дают

$$u(0, t) = X(0)T(t) = 0, \quad u(l, t) = X(l)T(t) = 0,$$

отсюда следует, что функция $X(x)$ должна удовлетворять условиям:

$$X(0) = 0, \quad X(l) = 0. \quad (1.1.8)$$

Таким образом, в связи с нахождением функции $X(x)$ мы приходим к простейшей задаче на собственные значения: найти те значения параметра λ , при которых существуют нетривиальные решения задачи

$$\begin{cases} X''(x) + \lambda X(x) = 0 \\ X(0) = X(l) = 0 \end{cases}$$

1. При $\lambda < 0$ общее решение уравнения (1.1.6) имеет вид

$$X(x) = C_1 e^{-\sqrt{-\lambda}x} + C_2 e^{\sqrt{-\lambda}x}$$

Потребовав выполнения граничных условий (1.1.8), получим

$$\begin{cases} C_1 + C_2 = 0 \\ C_1 e^{-\sqrt{-\lambda}l} + C_2 e^{\sqrt{-\lambda}l} = 0 \end{cases}$$

Определитель системы:

$$\begin{vmatrix} 1 & 1 \\ e^{-\sqrt{-\lambda}l} & e^{\sqrt{-\lambda}l} \end{vmatrix} = e^{\sqrt{-\lambda}l} - e^{-\sqrt{-\lambda}l} \neq 0,$$

следовательно, $C_1 = C_2 = 0$ и при $\lambda < 0$ существуют только нулевые решения $X(x) \equiv 0$.

2. Пусть $\lambda = 0$. Общее решение дифференциального уравнения $X''(x) = 0$ имеет вид $X(x) = C_1 x + C_2$. Требование граничных условий означает:

$$\begin{cases} C_1 \cdot 0 + C_2 = 0 \\ C_1 \cdot l + C_2 = 0 \end{cases}$$

откуда следует, что $C_1 = C_2 = 0$ и при $\lambda = 0$ существуют только тривиальные решения $X(x) \equiv 0$.

3. Пусть $\lambda > 0$. Общее решение дифференциального уравнения (1.1.7) имеет вид

$$X(x) = C_1 \cos \sqrt{\lambda} x + C_2 \sin \sqrt{\lambda} x.$$

Требование удовлетворения граничных условий (1.1.8) означает:

$$\begin{cases} C_1 \cdot 1 + C_2 \cdot 0 = 0 \\ C_1 \cos \sqrt{\lambda} l + C_2 \sin \sqrt{\lambda} l = 0 \end{cases}$$

Из первого уравнения $C_1 = 0$, из второго получаем

$$\sin \sqrt{\lambda} l = 0.$$

Откуда, получаем собственные значения

$$\lambda = \lambda_n = \left(\frac{\pi n}{l}\right)^2, \quad n = 1, 2, \dots,$$

а собственные функции задачи будут иметь вид –

$$X_n(x) = \sin \frac{\pi n}{l} x, \quad n = 1, 2, \dots$$

(собственные функции определены с точностью до постоянного множителя, который выбрали равным 1).

При $\lambda = \lambda_n$ уравнение (1.1.6) можно переписать в виде

$$T_n''(t) + \lambda_n a^2 T_n(t) = 0.$$

Найдём общее решение линейного, однородного уравнения с постоянными коэффициентами второго порядка.

Общее решение этого уравнения имеет вид:

$$T_n(t) = A_n \cos \frac{a\pi n}{l} t + B_n \sin \frac{a\pi n}{l} t,$$

где A_n и B_n – произвольные постоянные.

Возвращаясь к задаче (1.1.1) – (1.1.3), заключаем, что только функции

$$u_n(x, t) = X_n(x) T_n(t) = \left(A_n \cos \frac{a\pi n}{l} t + B_n \sin \frac{a\pi n}{l} t \right) \sin \frac{\pi n}{l} x \quad (1.1.9)$$

удовлетворяют уравнению (1.1.1) и граничным условиям (1.1.2) при любых A_n и B_n . В силу линейности и однородности уравнения (1.1.1) всякая конечная сумма решений будет также решением (1.1.1). То же справедливо и для ряда

$$u(x, t) = \sum_{n=1}^{\infty} \left(A_n \cos \frac{a\pi n}{l} t + B_n \sin \frac{a\pi n}{l} t \right) \sin \frac{\pi n}{l} x, \quad (1.1.10)$$

если он сходится равномерно и его можно дважды почленно дифференцировать по x и по t .

Остаётся найти постоянные A_n и B_n , так чтобы выполнялись начальные условия (1.1.3).

Продифференцируем ряд (1.1.10) по t :

$$\frac{\partial u}{\partial t} = \sum_{n=1}^{\infty} \frac{a\pi n}{l} \left(-A_n \sin \frac{a\pi n}{l} t + B_n \cos \frac{a\pi n}{l} t \right) \sin \frac{\pi n}{l} x. \quad (1.1.11)$$

Полагая в (1.1.10) и (1.1.11) $t = 0$, в силу начальных условий (1.1.3), получим

$$f(x) = \sum_{n=1}^{\infty} A_n \sin \frac{\pi n}{l} x \quad \text{и} \quad F(x) = \sum_{n=1}^{\infty} \frac{a\pi n}{l} B_n \sin \frac{\pi n}{l} x. \quad (1.1.12)$$

Из теории рядов Фурье известно, что произвольная кусочно-непрерывная функция $\phi(x)$ и кусочно-дифференцируемая функция, заданная в промежутке $0 \leq x \leq l$, разлагается в ряд Фурье:

$$\phi(x) = \sum_{n=1}^{\infty} b_n \sin \frac{\pi n}{l} x, \quad b_n = \frac{2}{l} \int_0^l \phi(x) \sin \frac{\pi n}{l} x dx, \quad n = 1, 2, \dots$$

Если функции $f(x)$ и $F(x)$ удовлетворяют условиям разложения в ряд Фурье, то

$$f(x) = \sum_{n=1}^{\infty} f_n \sin \frac{\pi n}{l} x$$

$$f_n = \frac{2}{l} \int_0^l f(x) \sin \frac{\pi n}{l} x dx, \quad n = 1, 2, \dots$$

и

$$F(x) = \sum_{n=1}^{\infty} F_n \sin \frac{\pi n}{l} x,$$

$$F_n = \frac{2}{l} \int_0^l F(x) \sin \frac{\pi n}{l} x dx, \quad n = 1, 2, \dots$$

Сравнение этих рядов с формулами (1.1.12) даёт

$$A_n = \frac{2}{l} \int_0^l f(x) \sin \frac{\pi n}{l} x dx = f_n, \quad n = 1, 2, \dots \quad (1.1.13)$$

$$B_n = \frac{2}{a\pi n} \int_0^l F(x) \sin \frac{\pi n}{l} x dx = \frac{l}{a\pi n} F_n, \quad n = 1, 2, \dots \quad (1.1.14)$$

Таким образом, функция, построенная в виде ряда (1.1.10), коэффициенты которого определяются по формулам (1.1.13) и (1.1.14) даёт решение исследуемой задаче (1.1.1) – (1.1.3).

Воспользуемся функциями символьной математики Maple и построим огибающую амплитудного спектра колебаний струны в частном случае возбуждения струны ударом, т.е. $f(x) = 0$ и $F(x) = A(\theta(x - x_1) - \theta(x - b x_2))$ - начальная скорость в виде прямоугольного импульса (Рисунок 1).

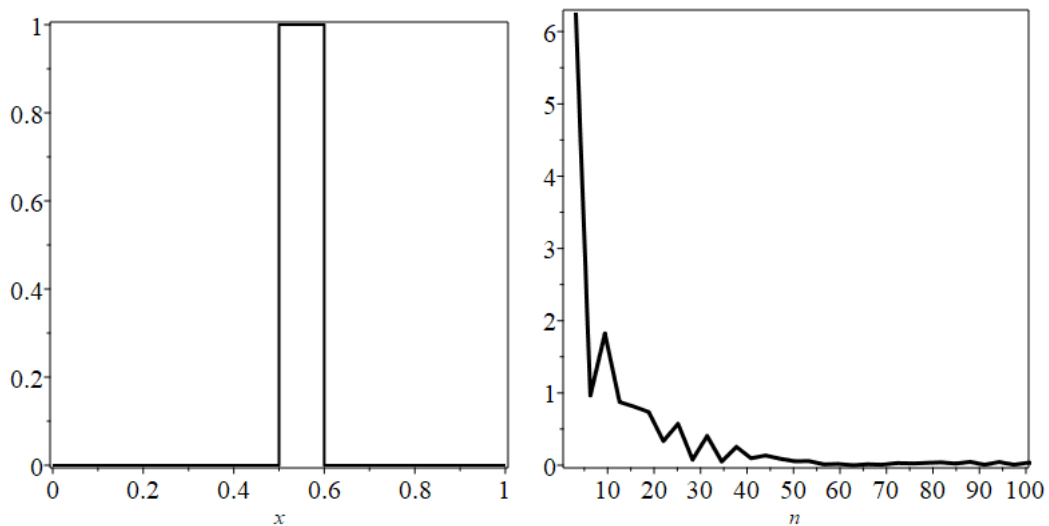


Рисунок 1. Прямоугольный импульс начальной скорости и огибающая спектра колебаний струны.

Выясним физический смысл функций (1.1.9), при этом функции $u_n(x, t)$ можно переписать в виде

$$\begin{aligned} u_n(x, t) &= \sqrt{A_n^2 + B_n^2} \left(\frac{A_n}{\sqrt{A_n^2 + B_n^2}} \cos \frac{a\pi n}{l} t + \frac{B_n}{\sqrt{A_n^2 + B_n^2}} \sin \frac{a\pi n}{l} t \right) \sin \frac{\pi n}{l} x = \\ &= \sqrt{A_n^2 + B_n^2} \left(\sin \phi_n \cos \frac{a\pi n}{l} t + \cos \phi_n \sin \frac{a\pi n}{l} t \right) \sin \frac{\pi n}{l} x = \\ &= \sqrt{A_n^2 + B_n^2} \sin \frac{\pi n}{l} x \sin \left(\frac{a\pi n}{l} t + \phi_n \right) \end{aligned}$$

или

$$u_n(x, t) = \alpha_n \sin \frac{\pi n x}{l} \sin \left(\frac{a \pi n}{l} t + \phi_n \right), \quad (1.1.15)$$

где $\alpha_n = \sqrt{A_n^2 + B_n^2}$, $\operatorname{tg} \phi_n = \frac{A_n}{B_n}$.

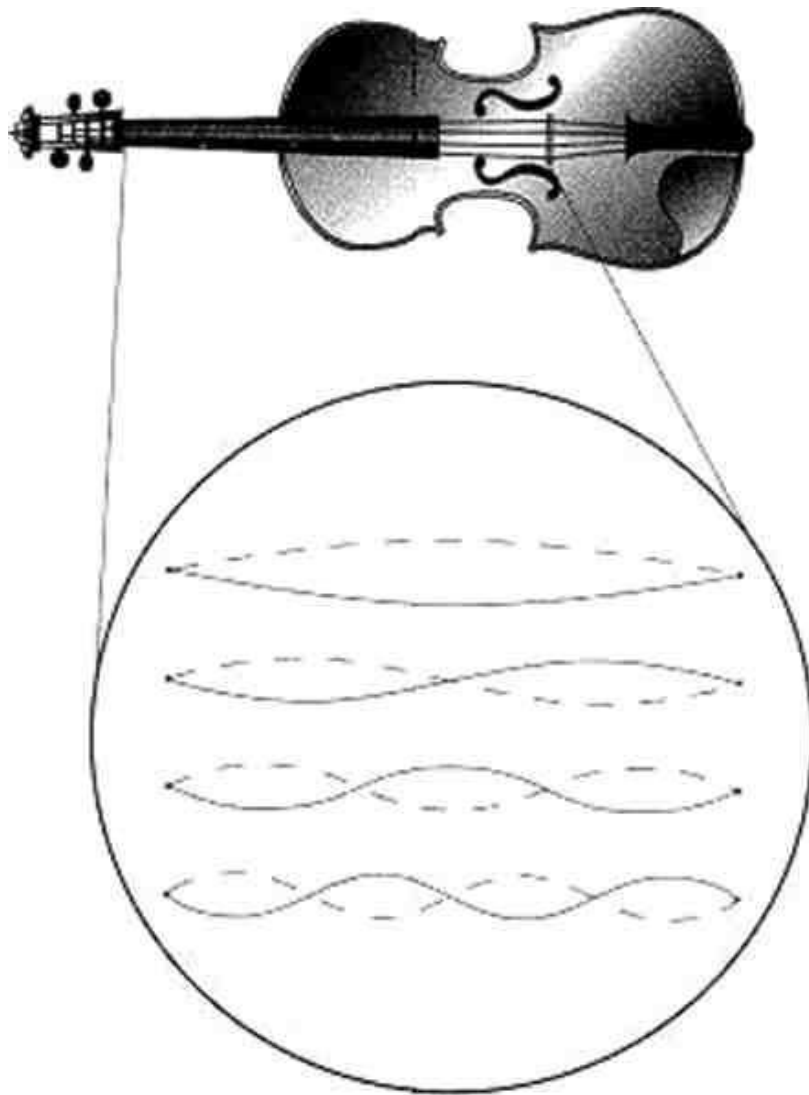


Рисунок 2. Стоячие волны струны

Из формулы (1.1.15) видно, что все точки струны совершают гармонические колебания с одной и той же частотой $\omega_n = \frac{a \pi n}{l}$ и фазой ϕ_n . Амплитуда колебаний зависит от координаты точки и равна $\alpha_n \sin \frac{\pi n}{l} x$. При таком колебании все точки струны одновременно достигают своего максимального отклонения в ту или иную сторону и одновременно проходят положение равновесия. Такие колебания струны называются стоячими волнами (рис. 2).

Когда струна колеблется, она издаёт звук, высота которого зависит от частоты колебаний $\omega_n = \frac{a\pi n}{l}$ (где $a = \sqrt{\frac{T_0}{\rho}}$, T_0 – натяжение струны, ρ – линейная плотность струны), а сила звука – от максимальной амплитуды колебаний α_n . Колебания с наименьшей частотой $\omega_1 = \frac{a\pi}{l}$ описывают самый низкий звук, который создает струна, он называется основным тоном или первой гармоникой. Колебаниям $u_n(x, t)$ с $n > 1$ отвечают более высокие звуки- верхние гармоники или обертоны, частоты которых пропорциональны частоте основного тона $\omega_n = n\omega_1$, а амплитуды убывают с ростом n .

Решение (1.1.10) в виде ряда можно интерпретировать акустическим образом: звук, издаваемый струной, складывается из отдельных гармоник, он содержит основной тон и обертоны, влияющие на тембр звука.

1.1.2 Волновое уравнение в плоскости для мембраны как физическая модель ударного музыкального инструмента

Мембраной называют свободно изгибающуюся натянутую плёнку, которая может быть физической моделью барабана (ударного музыкального инструмента).

Пусть в положении равновесия мембрана расположена в плоскости Oxy и занимает некоторую область D . Далее предположим, что мембрана находится под действием равномерного натяжения T , приложенного к мембране к краям мембраны. Это означает, что если провести линию по мембране в любом направлении, то сила взаимодействия между двумя частями, разделенными элементами линии, пропорциональна длине элемента и перпендикулярна его направлению. Величина силы, действующей на элемент ds линии, будет равна Tds .

Будем рассматривать только поперечные колебания мембраны, при которых каждая её точка движется перпендикулярно плоскости Oxy параллельно оси z . Тогда смещение u точки (x, y) мембраны будет функцией от x, y и t .

Рассматриваем далее только малые колебания мембраны. Опустим вывод уравнения и укажем конечный результат. В случае однородной мембраны уравнение малых колебаний мембраны можно записать в виде

$$\frac{\partial^2 u}{\partial t^2} = a^2 \left(\frac{\partial^2 u}{\partial x^2} + \frac{\partial^2 u}{\partial y^2} \right) + f(x, y, t),$$

где $a = \sqrt{\frac{T}{\rho}}$, T – натяжение, ρ – плотность, $f(x, y, t) = \frac{p(x, y, t)}{\rho}$, где $p(x, y, t)$ – внешняя сила, действующая на мембрану.

Если внешняя сила отсутствует, то есть $p(x, y, t) = 0$, то получим уравнение свободных колебаний однородной мембраны

$$\frac{\partial^2 u}{\partial t^2} = a^2 \left(\frac{\partial^2 u}{\partial x^2} + \frac{\partial^2 u}{\partial y^2} \right).$$

Как и при рассмотрении колебаний струны, одного уравнения недостаточно для полного определения движения мембраны; нужно задать в начальный момент времени $t = 0$ смещение и скорость всех точек мембраны:

$$u|_{t=0} = \varphi_0(x, y), \quad \left. \frac{\partial u}{\partial t} \right|_{t=0} = \varphi_1(x, y).$$

Далее, так как на контуре L мембрана закреплена, то должно быть

$$u|_L = 0$$

при любом $t \geq 0$.

1.1.2.1 Свободные колебания прямоугольной мембраны

Рассматриваем малые колебания однородной прямоугольной мембраны со сторонами p и q , закреплённой по контуру. Эта задача сводится к решению волнового уравнения

$$\frac{\partial^2 u}{\partial t^2} = a^2 \left(\frac{\partial^2 u}{\partial x^2} + \frac{\partial^2 u}{\partial y^2} \right)$$

при граничных условиях

$$u|_{x=0} = 0, \quad u|_{x=p} = 0, \quad u|_{y=0} = 0, \quad u|_{y=q} = 0$$

и начальных условиях

$$u|_{t=0} = \varphi_0(x, y), \quad \frac{\partial u}{\partial t}|_{t=0} = \varphi_1(x, y).$$

Будем искать частные решения уравнения в виде

$$u(x, y, t) = T(t)v(x, y),$$

Удовлетворяющие граничным условиям. Подставляя u в уравнение мембраны получим

$$\frac{T''(t)}{a^2 T(t)} = \frac{v_{xx} + v_{yy}}{v} = -\lambda^2.$$

Отсюда, принимая во внимание граничные условия, будем иметь

$$T''(t) + a^2 \lambda^2 T(t) = 0,$$

$$\frac{\partial^2 v}{\partial x^2} + \frac{\partial^2 v}{\partial y^2} + \lambda^2 v = 0,$$

$$v|_{x=0} = 0, \quad v|_{x=p} = 0, \quad v|_{y=0} = 0, \quad v|_{y=q} = 0.$$

Решая эту задачу аналогично решению уравнения колебаний струны и, положив $v(x, y) = X(x)Y(y)$, получим решение.

$$u(x, y, t) = \sum_{m,n=1}^{\infty} (A_{mn} \cos(a\lambda_{mn}t) + B_{mn} \sin(a\lambda_{mn}t)) \sin \frac{m\pi x}{p} \sin \frac{n\pi y}{q},$$

где

$$A_{mn} = \frac{4}{pq} \int_0^p \int_0^q \varphi_0(x, y) \sin \frac{m\pi x}{p} \sin \frac{n\pi y}{q} x dx,$$

$$B_{mn} = \frac{4}{a\lambda_{mn}pq} \int_0^p \int_0^q \varphi_1(x, y) \sin \frac{m\pi x}{p} \sin \frac{n\pi y}{q} x dx,$$

$$\lambda_{mn} = \pi^2 \left(\frac{m^2}{p^2} + \frac{n^2}{q^2} \right).$$

```
> with(plots):
animate3d(cos(t*x)*sin(t*y),x=-Pi..Pi, y=-Pi..Pi,t=1..2);
```

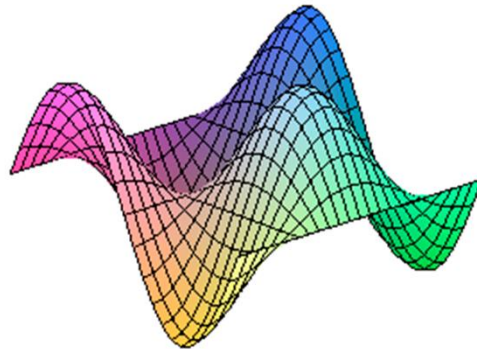


Рисунок 3. Анимация колебаний прямоугольной мембраны в среде Maple.

Каждый член этого ряда представляет собой *стоячую* волну, при которой точки мембраны совершают гармоническое колебательное движение с частотой $\omega_{mn} = a\pi \sqrt{\frac{m^2}{p^2} + \frac{n^2}{q^2}}$ (рис. 3).

Случай мембраны отличается от случая струны тем, что для последней каждой частоте собственных колебаний соответствует своя форма струны, которая просто разделяется узлами на несколько равных частей. Для мембраны же может оказаться, что одной и той же частоте соответствует несколько фигур мембраны с различными положениями узловых линий, то есть линий, вдоль которых амплитуда колебаний равна нулю.

1.1.2.2 Свободные колебания круглой мембраны

Рассмотрим свободные колебания однородной круглой мембраны радиуса R с центром в начале координат, закреплённой по контуру. Задача приводится к решению волнового уравнения

$$\frac{\partial^2 u}{\partial t^2} = a^2 \left(\frac{\partial^2 u}{\partial x^2} + \frac{\partial^2 u}{\partial y^2} \right)$$

Вводя полярные координаты на плоскости

$$x = r \cos \theta, y = r \sin \theta,$$

уравнение запишем в виде

$$\frac{\partial^2 u}{\partial r^2} + \frac{1}{r} \frac{\partial u}{\partial r} + \frac{1}{r^2} \frac{\partial^2 u}{\partial \theta^2} = \frac{1}{a^2} \frac{\partial^2 u}{\partial t^2}$$

при граничном условии

$$u|_{r=R} = 0$$

и начальных условиях

$$u|_{t=0} = \varphi_0(r, \theta), \quad \left. \frac{\partial u}{\partial t} \right|_{t=0} = \varphi_1(r, \theta)$$

Рассмотрим тот случай, когда круглая мембрана совершает радиальные колебания, то есть такие колебания, при которых смещение и зависит только от u и t . Эти колебания имеют место в том случае, когда начальные условия имеют вид

$$u|_{t=0} = \varphi_0(r), \quad \left. \frac{\partial u}{\partial t} \right|_{t=0} = \varphi_1(r)$$

где $\varphi_0(r)$ и $\varphi_1(r)$ – заданные функции в интервале $(0, R)$. Так как в рассматриваемом случае u не зависит от угла θ , то уравнение принимает более простой вид:

$$\frac{\partial^2 u}{\partial r^2} + \frac{1}{r} \frac{\partial u}{\partial r} = \frac{1}{a^2} \frac{\partial^2 u}{\partial t^2}$$

Будем искать решения уравнения в виде

$$u(r, t) = T(t)W(r),$$

удовлетворяющие граничному условию. Далее, решая задачу методом Фурье, получим решение

$$u(r, t) = \sum_{n=1}^{\infty} \left(a_n \cos \frac{a \lambda_n r t}{R} + b_n \sin \frac{a \lambda_n r t}{R} \right) J_0 \left(\frac{\lambda_n r}{R} \right),$$

где J_0, J_1 – функции Бесселя 1 рода нулевого и первого индекса, λ_n – корни уравнения $J_0(\lambda) = 0$, (нули функции Бесселя) (Рисунок 4).

$$a_n = \frac{2}{R^2 J_1^2(\lambda_n)} \int_0^R r \varphi_0(r) J_0 \left(\frac{\lambda_n r}{R} \right) dr,$$

$$b_n = \frac{2}{a\lambda_n J_1^2(\lambda_n)} \int_0^R r \varphi_1(r) J_0\left(\frac{\lambda_n r}{R}\right) dr.$$

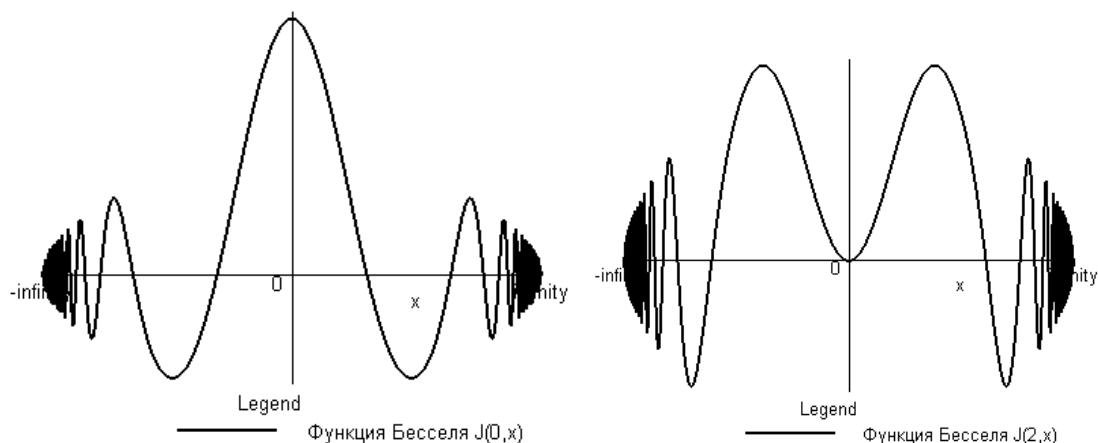


Рисунок 4. Функции Бесселя в задаче о круглой мембране.

Фундаментальные функции задачи о круглой мембране $\Psi_{mn}(r, \phi) = J_m(\pi\beta_{mn} \cdot \frac{r}{a}) \cdot \cos(m\phi)$ выражаются функциями Бесселя, а моды колебаний-нулями соответствующих специальных функций целого индекса $J_m(x) = (\frac{x}{2})^m \sum_{k=0}^{\infty} \frac{(-1)^k}{k! \Gamma(m+k+1)} (\frac{x}{2})^{2k}$. [3]

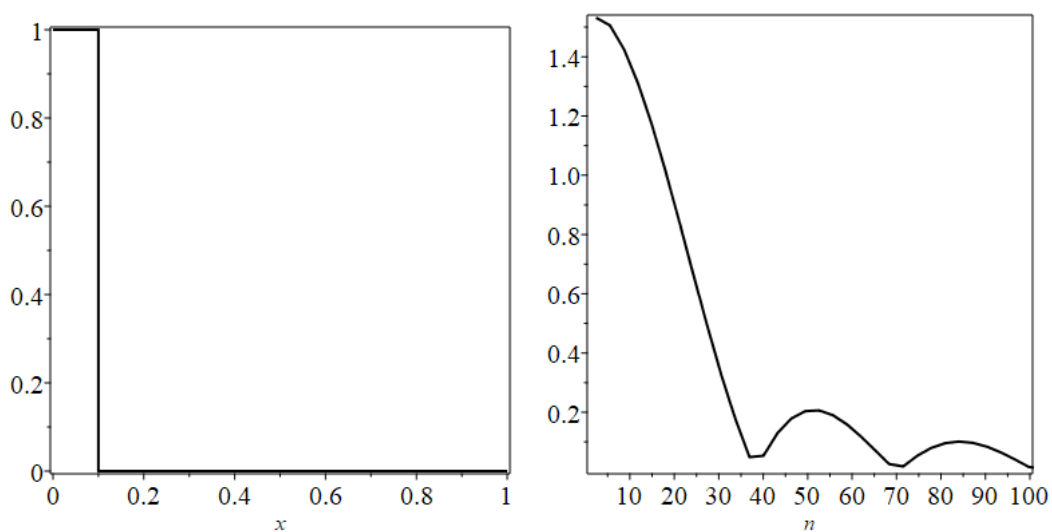


Рисунок 5. Огибающая амплитудного спектра колебаний круглой мембраны под действием прямоугольного импульса.

Огибающая амплитудного спектра колебаний круглой мембраны под действием прямоугольного импульса представлена на рис. 5.

Интерес к дифференциальному уравнению Бесселя и его решениям $J_\nu(x)$, называемым цилиндрическими или бесселевыми функциями, оформился в виде систематических исследований ещё в XVIII веке. Это было вызвано тем, что уравнение Бесселя естественным образом возникало при решении различных физических задач.

Немецкий астроном, геодезист и математик Ф.В. Бессель (1784–1846) систематически исследовал один тип цилиндрических функций – цилиндрические функции I рода. В связи с этим название функции Бесселя иногда относят лишь к этому типу цилиндрических функций. Им было получено новое интегральное представление, рекуррентные соотношения, доказано наличие бесконечного множества нулей уравнения $J_0(x) = 0$. Следует отметить, однако, что многие существенные результаты теории цилиндрических функций были получены ранее в работах Д. Бернулли, Л. Эйлера, Ж. Лагранжа [4][5][6].

1.2. Физика слуха в истории и методологии психоакустики

1.2.1 Слуховая система человека и механизм восприятия звуков

Слуховой аппарат, называемый первичным акустическим преобразователем, состоит из трёх частей: I – наружного уха, II – среднего и III – внутреннего уха (рис. 6).

Наружное ухо состоит из ушной раковины 1 и слухового прохода 2, которая заканчивается тонкой плёнкой, имеющей вид конуса, обращённого острием в сторону среднего уха. Эта плёнка называется барабанной перепонкой 3. Средняя длина слухового прохода около 25 мм. Таким образом, слуховой проход представляет собой отрезок трубы, открытый на одном конце и закрытый на другом, где возможно возникновение резонансных явлений. Исходя из длины слухового прохода, первая

резонансная частота его находится в области 3 – 3,5 кГц, поэтому именно вблизи этой частотной области чувствительность слуха максимальна.

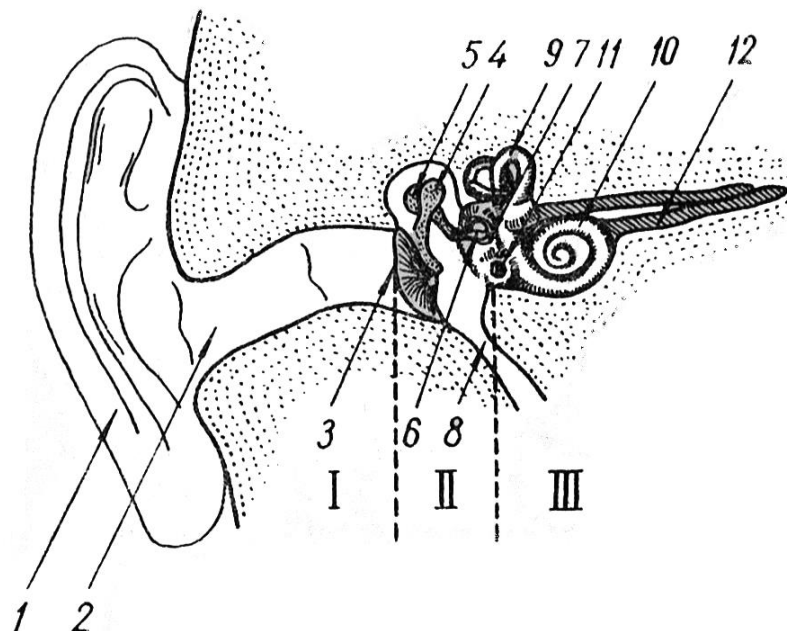


Рисунок 6. Слуховая система человека

Ушные раковины осуществляют бинауральное восприятие, локализацию источника звука и усиление звуковой энергии за счёт её концентрации, особенно в области средних и высоких частот.

Среднее ухо, отделённое от наружного барабанной перепонкой, – это заполненная воздухом полость, соединённая с носоглоткой евстахиевой трубой 8, предназначенной для выравнивания атмосферного давления в среднем ухе и внутри организма человека. При изменении атмосферного давления воздух может входить и выходить из среднего уха, из-за этого барабанная перепонка не реагирует на медленные изменения статического давления. Однако при быстром подъёме или спуске (например, находясь в самолёте) эти изменения ощущаются в виде «закладывания» ушей.

В среднем ухе находится система из трёх слуховых косточек: молоточка 4, наковаленки 5 и стремечка 6. Молоточек прикреплён одним

концом к барабанной перепонке, а вторым соприкасается с наковаленкой, которая при помощи маленькой связки соединена со стремечком. Основание стремечка входит в отверстие 7, называемое овальным окном, к краям которого оно прикреплено круговой связкой.

Среднее ухо выполняет функции:

- Согласование импедансов воздушной среды полости среднего уха с жидкой средой улитки внутреннего уха;
- Защита от громких звуков;
- Усиление звукового давления, передаваемого от барабанной перепонки во внутреннее ухо за счёт рычажного механизма системы слуховых косточек.

Внутреннее ухо находится в каналах височной кости и включает в себя орган равновесия (вестибулярный аппарат) и улитку.

Функции равновесия принадлежат полукружным кольцам 9, перемещение жидкости в которых при поворотах головы способствует ориентации в пространстве.

Улитка 10 играет основную роль в слуховом восприятии: она представляет собой трубку переменного сечения, свёрнутую три раза подобно панцирю улитки. В развёрнутом состоянии она имеет длину около 3,5 см. Полость улитки почти вдоль всей её длины разделена перегородкой. Верхняя половина называется преддверной лестницей, нижняя – барабанной лестницей. Она отделена от полости среднего уха перепонкой круглого окна 11. Преддверная и барабанная лестницы соединяются у вершины улитки отверстием, называемом геликотремой. Самым важным для восприятия звука элементом перегородки является базилярная мембрана, состоящая из нескольких тысяч поперечных волокон. Длина базилярной мембраны – около 32 мм, ширина вблизи стремечка – 0,05 мм, у вершины вблизи геликотремы – 0,5 мм. На базилярной мембране вдоль всей её длины покоится орган Корти, содержащий около 30000 чувствительных клеток, к которым подходят окончания слухового нерва 12. Слуховой нерв представляет собой

перекрученный ствол, сердцевина которого состоит из волокон, отходящих от верхушки улитки, а наружные слои – от нижних ее участков. Войдя в ствол мозга, нейроны взаимодействуют с клетками различных уровней, поднимаясь к коре и перекрещиваясь по пути так, что слуховая информация от левого уха поступает в основном в правое полушарие, где происходит главным образом обработка эмоциональной информации, а от правого уха в левое полушарие, где в основном обрабатывается смысловая информация.

Работа слухового аппарата упрощённо может быть представлена следующим образом. При изменениях внешнего давления, происходящих со звуковой частотой, барабанная перепонка совершает колебательные движения, передающиеся через систему слуховых косточек на основание стремечка, которое, подобно поршню, производит смещение жидкости в преддверной лестнице, проталкивая её через отверстие геликотремы в барабанную лестницу. Жидкость барабанной лестницы оказывает при этом давление на перепонку круглого окна, вызывая её смещение в сторону, противоположную движению стремечка.

В процессе передачи колебаний от барабанной перепонки к овальному окну внутреннего уха слуховые косточки выполняют роль трансформатора, согласующего сравнительно небольшое акустическое сопротивление воздушной среды с большим сопротивлением жидкости во внутреннем ухе. Трансформация происходит, в основном, из-за большой разницы в эффективных площадях барабанной перепонки и основания стремечка (акустическая трансформация) и рычажного действия молоточка и наковаленки (механическая трансформация). Результирующий коэффициент трансформации при этом равен примерно 20.

Описанный выше процесс переливания жидкости из преддверной лестницы в барабанную и обратно относится только к низкочастотным колебаниям. Колебания более высоких частот передаются непосредственно через мягкую часть перегородки улитки. Основной особенностью колебаний базилярной мембраны является локализация максимального колебательного

смещения в сравнительно небольшом участке её длины, причём место локализации зависит от частоты звука. Например, звуки частотой 60 - 80 Гц вызывают максимум смещения волокон, находящихся вблизи геликотремы; звуки частотой 15 – 20 кГц вызывают максимальное смещение волокон, располагающихся вблизи овального окна. Таким образом, звуки разных частот воспринимаются разными группами нервных окончаний: слух производит как бы спектральное разложение сложного колебания.

Преобразование механических колебаний мембраны в дискретные электрические импульсы нервных волокон происходит в органе Корти. Когда базилярная мембрана вибрирует, реснички на волосковых клетках изгибаются, и это генерирует электрический потенциал, что вызывает поток электрических нервных импульсов, дающих всю необходимую информацию о поступившем звуковом сигнале в мозг для дальнейшей переработки и реагирования.

1.2.2 Область слухового восприятия

Человек окружён всевозможными механическими колебаниями, возникающими и распространяющимися в воздухе, как в любой упругой среде. Воздушная среда обеспечивает не только жизнедеятельность человека, но и является звукопроводом, что позволяет людям общаться друг с другом при помощи речи, воспринимать любую информацию, осуществлять связь с природными явлениями, следить за их изменениями и соответственно реагировать на них.

Исходя из этого неудивительно, что человечество с давних времён стремилось познать её акустические свойства. Одним из важнейших открытий было установление конечной и сравнительно небольшой скорости распространения звука в воздухе. Этот факт впервые был установлен путём наблюдения разницы во времени между появлением молнии и звуком грома. В начале XVIII века Исаак Ньютон (1643–1727) установил, что скорость звука в газе равна квадратному корню из отношения статического давления

газа к его плотности. В дальнейшем Пьер Симон Лаплас (1749–1827) дополнил полученную Ньютоном формулу для определения скорости звука поправкой на теплопроводность среды. При исследованиях спектрального состава звука грома оказалось, что максимальные по мощности спектральные составляющие в ударах грома находятся, по данным различных исследователей, в диапазоне частот от 50–150 Гц до 400–500 Гц. Интенсивность звука грома в 10^{15} и более раз превышает интенсивность человеческого голоса. Подобные звуковые энергии зарегистрированы ещё при сильных извержениях вулканов и в непосредственной близости от мощнейших ракетных двигателей.

Для того, чтобы у человека возникло ощущение звука, звуковая энергия должна быть не менее определенной величины, что имеет название *порог слухового восприятия*. Кроме энергетического, порог восприятия существует также и для ощущения частот звука.

В основу определения границ слухового восприятия, как громкостных, так и частотных, положен закон Вебера-Фехнера, связывающий параметры раздражения и ощущения: *одинаковые относительные изменения интенсивности раздражающей силы вызывают одинаковые приращения ощущения*.

В 1846 году этот закон открыл и сформулировал Эрнст Генрих Вебер (1795–1878 г.г.) – немецкий анатом и физиолог, один из основателей экспериментальной психологии. Впоследствии, в 1860 году немецкий учёный, философ Густав Фехнер (1801 –1887гг), также как и Вебер, работавший в области экспериментальной психологии, математически и экспериментально подтвердил закон Вебера. В дальнейшем этот закон получил название закона Вебера-Фехнера.

Применительно к определению слухового восприятия этот закон может быть сформулирован так: *слуховое ощущение пропорционально логарифму раздражения*. Причём раздражением может быть звуковое давление или

частота, что вызывает соответственно ощущение громкости или высоты звука.

Если представить себе область слышимости в «океане» различных колебательных процессов, то получится картина, которую условно можно представить на Рисунке 7 [7].

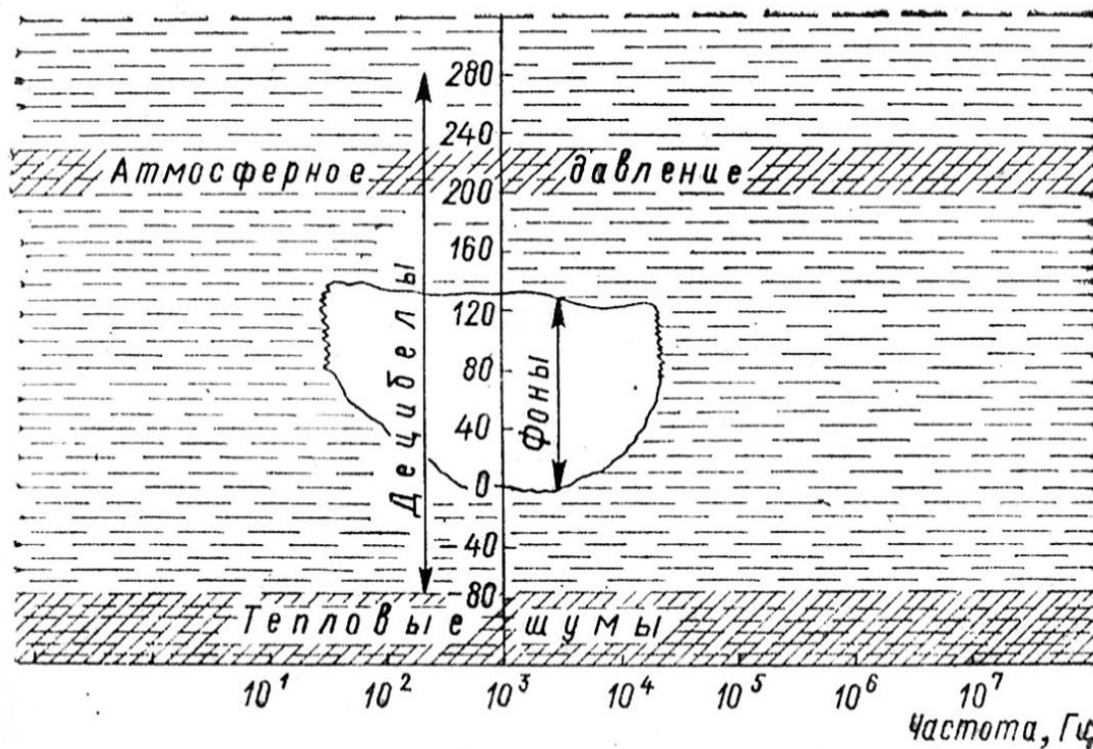


Рисунок 7. «Островок» слышимости в «океане» колебательных процессов.

Здесь изображена область слухового восприятия человека, получившаяся в виде маленького островка в «океане» всевозможных колебательных процессов. Нижняя, «южная граница области слышимости», называемая «порогом слухового восприятия», довольно сильно искривлена, что говорит о весьма существенной зависимости порога восприятия от частоты.

Самое маленькое значение энергия порога восприятия звука принимает вблизи частот 2–4 кГц, а точнее в области 3,4 кГц. Около этой частоты в

цилиндрическом канале внешнего уха, размером приблизительно 2,5 см, возникает $\frac{1}{4}$ волновой резонанс на частоте

$$f_{\text{рез}} = c_0 / \lambda_{\text{рез}}, \text{ где } \lambda_{\text{рез}} = 4 \times 2,5 \text{ см} = 0,1 \text{ м}.$$

Отсюда

$$f_{\text{рез}} = 340 / 0,1 = 3,4 \text{ кГц}$$

В районе этой частоты слух имеет максимальную чувствительность: минимальное звуковое давление здесь $p_{\text{мин}}$, что вызывает ощущение звука, составляет всего 10^{-5} Па. Эта чувствительность человека позволяет ему слышать лёгкий вздох, шелест листвы, даже шорох ползущего по стенке жучка. Амплитуда звуковых колебаний при этом лишь немного превышает размеры атома водорода ($3 \cdot 10^{-9}$ м).

Если увеличить эту величину в два раза, то получим пороговое значение звукового давления на частоте 1000 Гц. Это давление $p_0 = 2 \cdot 10^{-5}$ Па является для нас весьма важной величиной, так как именно относительно этого давления рассчитываются *уровни звуковых давлений* в децибелах, которыми, как правило, и оцениваются энергетические характеристики звука. Для частоты 1000 Гц пороговый уровень звукового давления составляет 0 децибел.

Уместно будет упомянуть и другую энергетическую характеристику звукового сигнала – *уровень интенсивности звука*, равную по значению уровню звукового давления, но выражаемую через пороговую интенсивность на частоте 1000 Гц. Поскольку интенсивность I и звуковое давление p связаны между собой соотношением

$$I = p^2 / \rho_0 c_0 [7],$$

где ρ_0 – плотность воздуха ($\rho_0 = 1,23 \text{ кг/м}^3$), пороговую интенсивность на частоте 1000 Гц можно определить из приведённого соотношения путём подстановки в него значения $p = p_0 = 2 \cdot 10^{-5}$ Па. Откуда $I_0 = p_0^2 / \rho_0 c_0$. Подставив сюда численные величины, получим

$$I_0 = (2 \cdot 10^{-5})^2 / (1,23 \cdot 340) = 10^{-12} \text{ Вт/м}^2.$$

При отсчёте звуковых давлений от границы слышимости вверх в средней части частотного диапазона восприятия, достижение величины звукового давления $p = (8-10)$ Па приводит к возникновению «порога неприятного ощущения», что свидетельствует о том, что воздействие таких давлений на барабанную перепонку вызывает чувство дискомфорта у слушателя. Звуковые давления величиной $p = (60-100)$ Па называются «порогом осязания». При достижении значений звуковых давлений $p = (150-200)$ Па наступает «болевой порог». Такие звуки настолько сильны, что слуховой аппарат воспринимает их как боль и через некоторое время начинает разрушаться. Однако в природе встречаются и гораздо большие давления, например, статическое или атмосферное давление имеет величину 10^{15} Па. Но и это не предел: сверхмощные нелинейные колебания возникают в природных явлениях, например цунами и землетрясения, или создаются с помощью специальных сирен и систем концентрации энергии. Можно сказать, что границы колебательных процессов здесь практически бесконечны.

На левой «западной» оконечности острова слышимости пороги восприятия и болевой порог практически сходятся. Дальше начинается область *инфразвуковых колебаний*. Сложно сказать, сколько здесь частот до границы восприятия, ведь кажется, что до нуля герц недалеко (напомним, что область слышимости начинается с 16–20 Гц), но в этом и заключается загадка логарифмического масштаба – ноль логарифмической шкалы лежит в минус бесконечности. Но это не значит, что если человек не воспринимает эти колебания как звук, то он на них не реагирует. В начале XX века было замечено, что мощные колебания низких частот существенно влияют на состояние человека – как физическое (воздействие на сердечно-сосудистые ритмы и ритмы головного мозга), так и психическое (возникновение состояний страха, эйфории, агрессивности). Стоит отметить, что в мощных

колебаниях низкочастотных громкоговорителей всегда присутствуют так называемые «субгармоники», т.е. частоты инфразвукового диапазона, способные при больших уровнях звукового давления воздействовать на аудиторию слушателей самым разнообразным образом, и не только как звук.

На «восточном» берегу острова слышимости, на частотах более (16–20) кГц начинается область *ультразвука*. Здесь человеком достигнуты колебания с частотами в мега- (10^6) и гигагерцы (10^9); неизвестно, на каких частотах инерция молекул или иные факторы положат предел возбуждению. Будучи неслышными, эти колебания ультразвуковых частот также небезразличны для организма человека и животных.

Огромный вклад в изучении слуховой системы внёс Георг фон Бекеш — физик, один из основоположников современной физиологической акустики, что написал работы в области физиологии слуха, за что был удостоен Нобелевской премии в 1961 году. Своим трудом он дополнил работы Германа Гельмгольца, где не хватало существенных анатомических факторов и не было возможности построить теорию механической части уха. [8]

Обобщая его работы, а именно 83, в 1960 году вышла книга Бекеша «Experiments in Hearing», где в первой части даётся описание многочисленных разработанных тончайших измерительных аппаратов, а во второй поясняется работа механической части уха и осязательного аппарата, в последней же содержится информация о электрофизиологии улитки, той части, которая примыкает к механической части слухового аппарата.[9][10]

Основываясь на этой работе, в будущем пробелы были заполнены, можно было построить электрическую схему, имитирующую слуховой аппарат в его механической части. Теперь без сомнений можно описать устройство, материальные параметры и движения механической части слухового аппарата. [11]

ГЛАВА 2. НЕЛИНЕЙНЫЕ ДИНАМИЧЕСКИЕ МОДЕЛИ КОЛЕБАТЕЛЬНЫХ И ВОЛНОВЫХ ПРОЦЕССОВ В ПСИХОАКУСТИКЕ

2.1. Свободные колебания длинной наноразмерной акустической цепочки связанных осцилляторов

Классическая акустическая цепочка Ферми-Паста-Улама (ФПУ) (рис. 8) представляет собой цепочку из N частиц одинаковой массы, соединённых пружинами, с линейными и нелинейными составляющими в силе взаимодействия. Причём крайние точки системы остаются фиксированными.

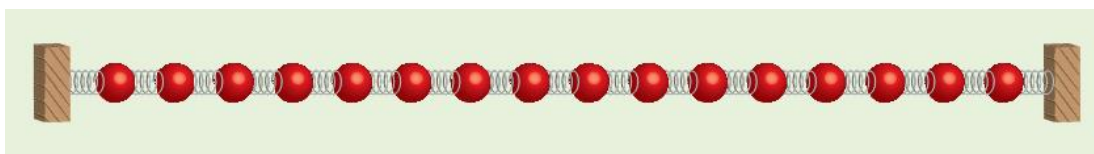


Рисунок 8. Акустическая цепочка ФПУ.

Поскольку система представлена конечным числом элементов, то для численных расчётов было удобнее вместо уравнения в частных производных, определяющего движение струны, взять конечное число обычных дифференциальных уравнений. Таким образом, были получены уравнения вида:

$$\ddot{x}_i = (x_{i+1} - 2x_i + x_{i-1}) + \alpha[(x_{i+1} - x_i)^2 - (x_i - x_{i-1})^2], \quad (2.1)$$

$$\ddot{x}_i = (x_{i+1} - 2x_i + x_{i-1}) + \beta[(x_{i+1} - x_i)^3 - (x_i - x_{i-1})^3] \quad (2.2)$$

соответственно для систем с квадратичным (коэффициент α) и кубическим (коэффициент β) членами силы. Здесь x_i обозначает смещение i -й массы от её начального положения. При этом α и β выбираются так, чтобы при максимальном смещении нелинейный член был мал, например, порядка одной десятой линейного.

Если число частиц будет принято бесконечным, то соответствующее уравнение в частных производных будет представлять собой обычное волновое уравнение с нелинейными членами сложной природы.

Известен так же другой случай:

$$\ddot{x}_i = \delta_1(x_{i+1} - x_i) - \delta_2(x_i - x_{i-1}) + c.$$

Здесь параметры δ_1 , δ_2 и c были не константами, но принимали различные значения в зависимости от того, являлись ли величины в скобках меньше или больше некоторого заранее фиксированного значения. Это условие аналогично заданию силы в форме кусочно-линейной функции смещения и эта функция в некотором роде воспроизводит кубическую зависимость. На Рисунке 9 приведены графики силы, как функции смещения для трёх случаев.



Рисунок 9. Графики, представляющие силу как функцию смещения

Для того чтобы выяснить, как же поведёт себя цепочка, форма цепочки, т.е. x как функция i , и кинетическая энергия как функция i подверглись разложению в ряды Фурье. На тот момент расчёты были доступны для максимального значения $i=64$. Так как задачу можно считать динамической, такое разложение сводится к лагранжевой замене переменных: вместо исходных $\dot{x}_i$ и x_i ($i=1,2,\dots,64$) можно ввести a_k и $\dot{a}_k$ ($k=1,2,\dots,64$), где

$$a_k = \sum x_i \sin \frac{ik\pi}{64}.$$

В задаче для квадратичной составляющей силы сумма кинетической и потенциальной энергий равна

$$E_{x_i}^{\text{кин}} + E_{x_i}^{\text{пот}} = \frac{1}{2} \dot{x}_i^2 + \frac{(x_{i+1} - x_i)^2 + (x_i - x_{i-1})^2}{2}$$

и

$$E_{a_k}^{\text{кин}} + E_{a_k}^{\text{пот}} = \frac{1}{2} \dot{a}_k^2 + 2a_k^2 \sin^2 \frac{\pi k}{128},$$

если пренебречь вкладом в потенциальную энергию за счёт квадратичного или высших членов, описывающих силу. В данном случае этот вклад составляет не более нескольких процентов.

Методике компьютерного моделирования при изучении фундаментальных научных проблем посвящены работы кафедры аудиовизуальных систем и технологий СПбГИКиТ [12], [13], [14], [15].

Рассмотренная ранее система Ферми-Паста-Улама с системой дифференциальных ньютоновских уравнений:

$$m\ddot{x}_i = -k \cdot (2x_i - x_{i-1} - x_{i+1}) + \alpha \cdot ((x_{i+1} - x_i)^2 - (x_i - x_{i-1})^2),$$

$$i = 1 \dots n$$

и однородными граничными условиями $x_0(t) = x_{n+1}(t) = 0$ может быть полезна для формирования понятий и представлений в физике конденсированного состояния (рис. 10).

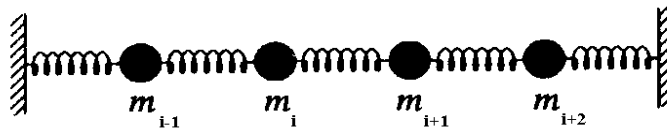


Рисунок 10. Модель волновых процессов в системе ФПУ

Очевидно, размерность фазового пространства исторических задач вычислительной физики ограничивалась техническими возможностями первых ЭВМ. Сегодня использование современных компьютерных технологий позволяет «качать» сотни связанных осцилляторов наблюдая нелинейные волновые процессы в наноразмерных структурах средствами интерактивной графики.

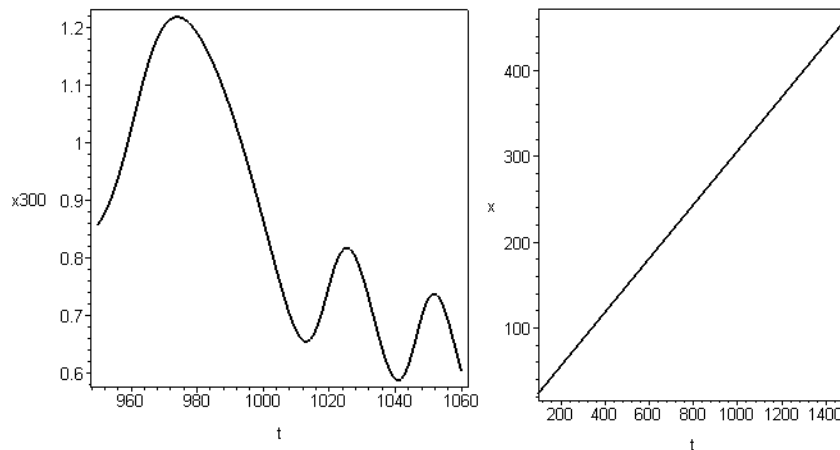


Рисунок 11. Определение скорости возмущения в наноразмерной цепочке связанных осцилляторов ФПУ

```
restart: with(plots): n:=5: N:=n-1; x[0](t):=0:
x[n](t):=0:
psys[1] := diff(x[1](t),t,t) = -k*(2*x[1](t)-x[2](t)-
x[0](t))+g*(x[2](t)-x[1](t))^2-g*(x[1](t)-x[0](t))^2,
x[1](0)=-0.5, D(x[1])(0)=0:
  for i from 2 to n-1 do psys[i] := diff(x[i](t),t,t)
= -k*(2*x[i](t)-x[i+1](t)-x[i-1](t))+g*(x[i+1](t)-
x[i](t))^2-g*(x[i](t)-x[i-1](t))^2, x[i](0)=0, D(x[i])(0)=0
od:
psys:={seq(psys[i],i=1..n-1),psys[1]}; k:=0.1:g:=0.05:
psol:= dsolve(psys, numeric): odeplot(psol,[t,-
x[3](t)],0..50,labels=[t,x3],numpoints=800,color=black):
```

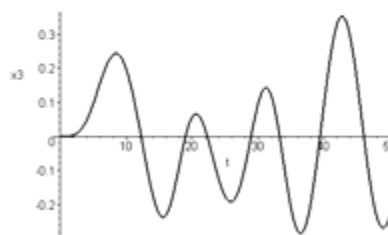


Рисунок 12. Программирование цепочки Ферми-Паста-Улама в среде Maple (метод Рунге-Кутты 4 порядка точности).

Предложенный алгоритм исследования системы ФПУ сводится к численному интегрированию массивов квадратов координат и скоростей

частиц, полученных численным решением динамических уравнений (методом Рунге-Кутты) в системе компьютерной математики Maple.[16][17]

В соответствии с фундаментальным физическим законом сохранения энергии, для каждой частицы $E_{\text{полн}} = \langle E_{\text{полн}} \rangle$, поэтому $\langle E_{\text{полн}} \rangle \sim \int x^2(t)dt$. [50].

По теореме «о среднем» в математике средние кинетические энергии частиц находим также численным интегрированием:

$\langle E_{\text{кин}} \rangle \sim \int v^2(t)dt$, а средние потенциальные энергии как разность полной и кинетической энергии $\langle E_{\text{пот}} \rangle = \langle E_{\text{полн}} \rangle - \langle E_{\text{кин}} \rangle$, причем энергия цепочки при равномерном распределении энергий по степеням свободы (между частицами) $E = \langle E_{\text{полн}} \rangle N = \text{const}$.

В данном алгоритме используются физические и математические знания, что характерно для междисциплинарной области математического моделирования физических процессов и систем.

Заметим, что предложенный алгоритм расчёта энергий проще, чем алгоритм, основанный на теореме о *вириале* для средней кинетической энергии, поскольку рассматривается цепочка связанных осцилляторов. Поэтому средний вириал частицы оказывается достаточно сложным:

$$\langle E_{\text{кин}} \rangle = -\frac{1}{2} \langle F(x(t))x(t) \rangle.$$

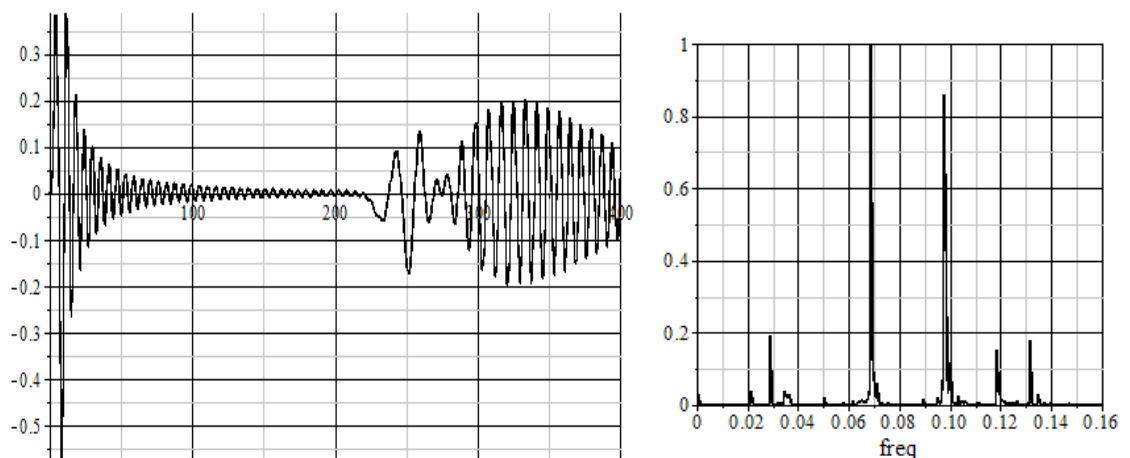


Рисунок 13. Спектральный анализ в нелинейной цепочке связанных осцилляторов [21].

Современное программное и математическое обеспечение, интерактивная графика позволяют выйти за рамки классической системы ФПУ и получить гистограммы равномерного распределения энергии по степеням свободы в малой окрестности средних значений для длинных наноразмерных цепочек. Это важно для дальнейшего изучения асимптотических решений и устойчивости нелинейных нормальных мод в термодинамическом пределе.[18][19]

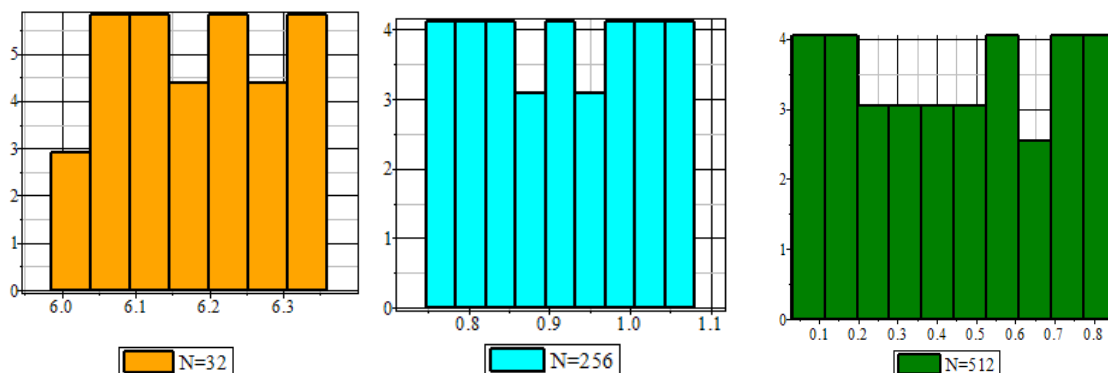


Рисунок 14. Гистограммы равномерного распределения энергии по степеням свободы в среде Maple.

В литературе феноменологическая термодинамика рассматривается как универсальная модель физической системы. Показано существование термического уравнения состояния из транзитивности термодинамического равновесия. Причём уравнения транзитивности всегда можно определить, мысленно разбивая рассматриваемую физическую систему на макроскопические подсистемы. Поэтому существенное увеличение размера цепочки оправдано, причём, внесение случайностей в динамику детерминированной системы возможно за счёт взаимодействия цепочки с окружающей средой, а также за счёт возможных случайных погрешностей вычислительного эксперимента.

В этом случае статистический закон о равномерном распределении энергии по степеням свободы можно обобщить на случай произвольной молекулярной системы с учётом дисперсии измеряемой энергии. На Рисунке

15 представлено равномерное распределение средних энергий по степеням свободы в системе ФПУ.

Вероятностный характер законов классической статистической физики, учитывающий случайности событий, как правило, связан с большим числом частиц и степеней свободы, неполнотой экспериментальных данных. Такая точка зрения со временем стала привычной и позволяла как-то примириться с парадоксальностью нелинейной динамики, но, тем не менее, оставляла чувство неудовлетворённости. Поэтому неопровержимое установление возможности, хаотического, непредсказуемого поведения детерминированных динамических систем, а также применимость законов статистической физики в модели ФПУ решающим образом затрагивает наши фундаментальные мировоззренческие представления о природе волновых процессов в нелинейных средах.[20][21][22]

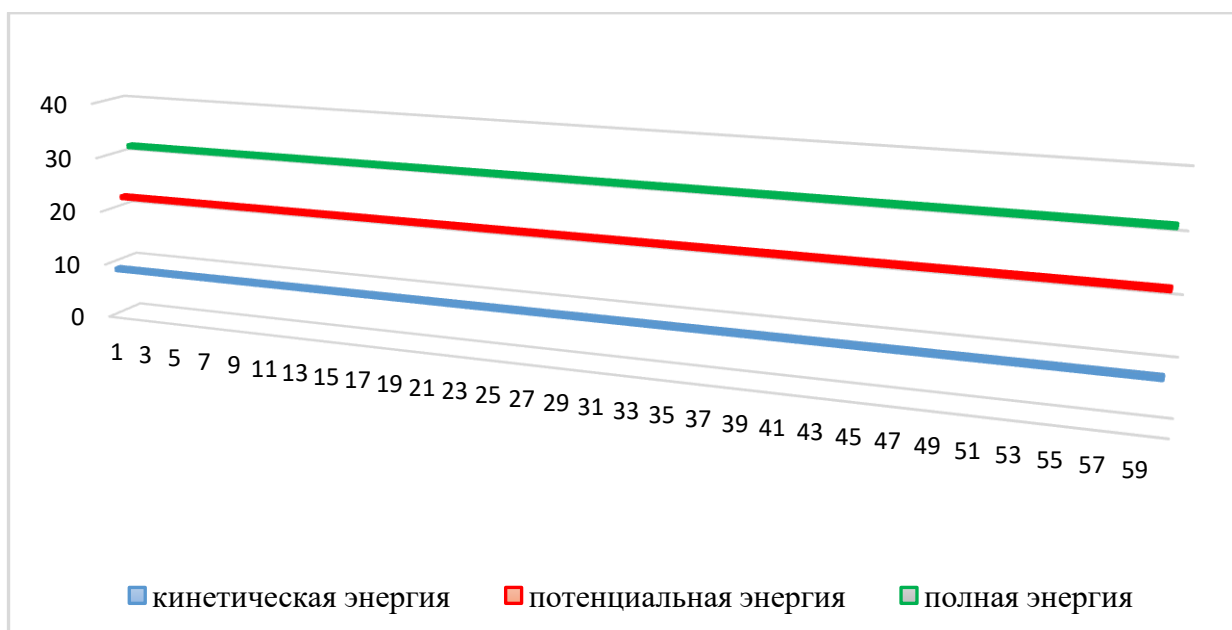


Рисунок 15. Равномерное распределение энергии ФПУ по степеням свободы в среде Excel.

2.2. Вынужденные колебания длинной наноразмерной системы Ферми-Паста-Улама в модели бегущей волны на базилярной мембране

Актуальность настоящего исследования заключается в том, что для дальнейшего развития технологий аурализации и психоакустики предлагаются современные методы формирования и передачи пространственного звукового образа, с помощью создания трёхмерных компьютерных моделей пространств с учётом широкого комплекса объективных параметров и, соответственно, вызываемых ими субъективных слуховых ощущений.

Изучению и разработке методов моделирования распространения волн в акустических средах, создание алгоритмов и программных средств для расчёта импульсного отклика и основных акустических параметров, вычисляемых на его основе, компьютерная реализация синтеза аэроакустических импульсов при распространении звуковых волн в моделируемых помещениях на основе созданного алгоритма аурализации посвящены работы [23],[24],[25],[26].

На основании обзора литературы и источников авторы статьи считают, что использование аналитических и численных методов в современной компьютерной математике для уточнения границ применимости математических моделей нелинейных волновых и колебательных процессов с учётом взаимодействия звука с органами слуха является приоритетным направлением совершенствования технологии аурализации в архитектурной акустике и психоакустике с использованием фундаментальных физических моделей и электро-механической аналогии.

Вспоминая историю науки, отметим, что в 1961 г. Дьёрдь фон Бекеши был удостоен Нобелевской премии по физиологии и медицине «За открытие физических механизмов восприятия раздражения улиткой». В своей приветственной речи исследователь из Каролинского института Карл Густаф Бернхард сказал: «Бекеши вооружил нас знанием физических процессов,

происходящих на всех ключевых участках передачи звука в ухе». Кроме того, добавил он, «открытия Бекеши внесли важнейший вклад в анализ взаимоотношений между механическими и электрическими явлениями в рецепторах, отвечающих за преобразование звука в нервные импульсы» [27].

Слуховая система (СС) человека является сенсорной системой, для которой стимулами являются акустические сигналы (АС) из окружающей воздушной среды. Улитка в СС является конечным местом периферического тракта согласования акустических импедансов окружающей воздушной среды и жидкостной среды СС, а также одновременно местом преобразования механической энергии АС в электромеханическую энергию потенциалов действия нейронной сети СС. Схема профиля волны на базилярной мембране представлена на рис. 16.

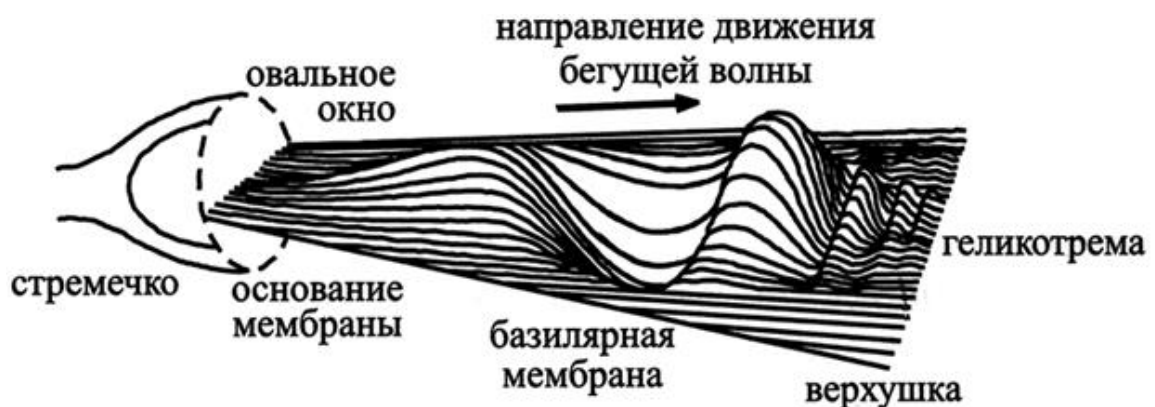


Рисунок 16. Бегущая волна на базилярной мембране.

В работе [27] проведено детальное исследование электрической модели внутреннего уха, состоящей из 140 параллельных звеньев-резонаторов, соответствующих волокнам мембраны, и среднего уха человека в виде двух связанных контуров. В прикладном пакете Simulink были найдены максимальные токи для каждого из 140 контуров (Рисунок 17). Полученные результаты приведены на рис. 18.

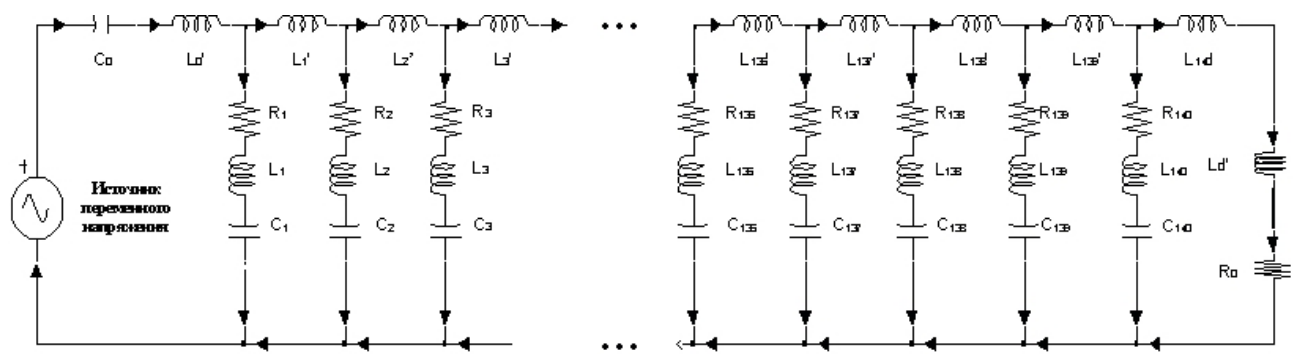


Рисунок 17. Эквивалентная электрическая схема улитки слуховой системы [27]

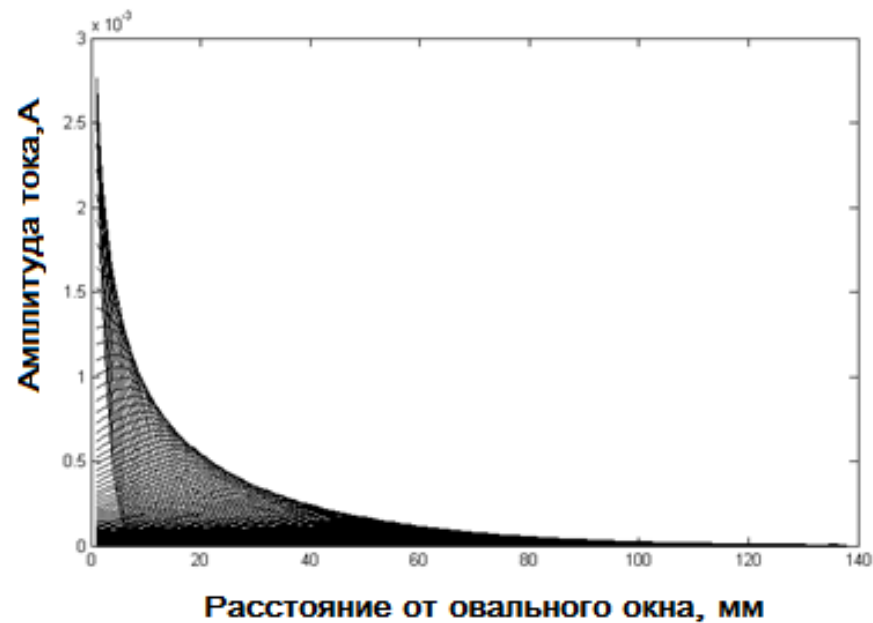


Рисунок 18. Зависимость амплитуды тока (колебательной скорости) от номера контура (расстояния от овального окна). [16]

На рис. 19 построена зависимость амплитуды тока ($\cdot 10^{-5}$ А) от частоты внешнего сигнала (Гц) и линия тренда в среде Excel на основании научной литературы [27]. Экспериментальные результаты несколько отличаются от расчётных значений. Это связано с тем, что в теоретических расчётах резонансных частот контуров не учитывается наличие соколеблющейся массы лимфы, т.е. нелинейные эффекты, характерные для слуховой системы [24]. Зависимость амплитуды тока от частоты внешнего сигнала приведена на рис. 19.

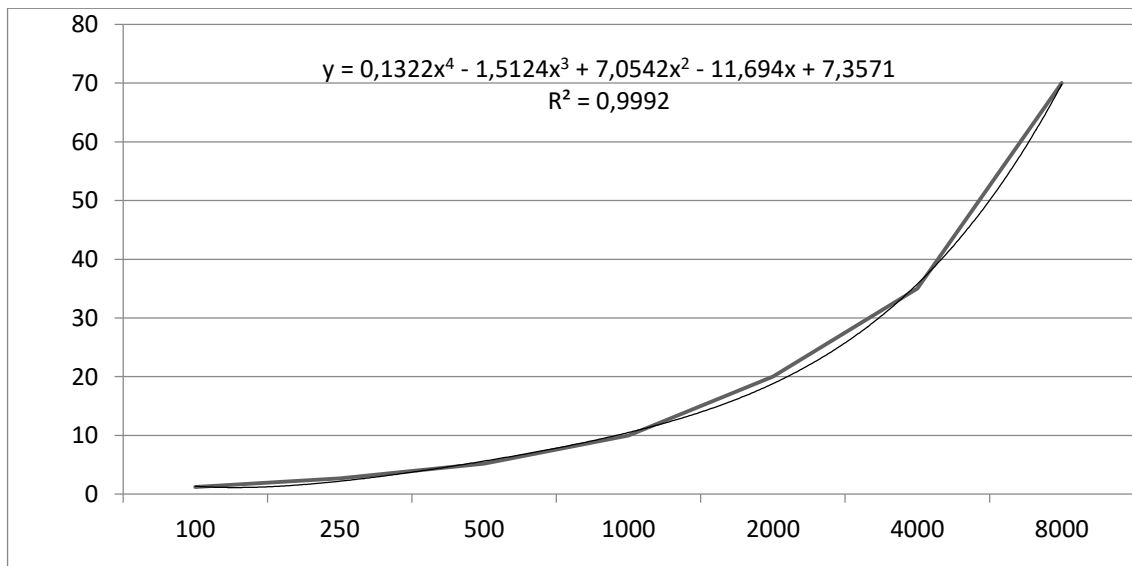


Рисунок 19. Зависимость амплитуды тока от частоты внешнего сигнала.

Для исследования нелинейных колебаний базилярной мембраны и волновых процессов в улитке СС воспользуемся электромеханической аналогией в динамике нелинейной системы связанных осцилляторов Ферми-Паста-Улама (ФПУ), модели и закономерности свободных колебаний представлены в научной и методической литературе [28],[29],[30], [31].

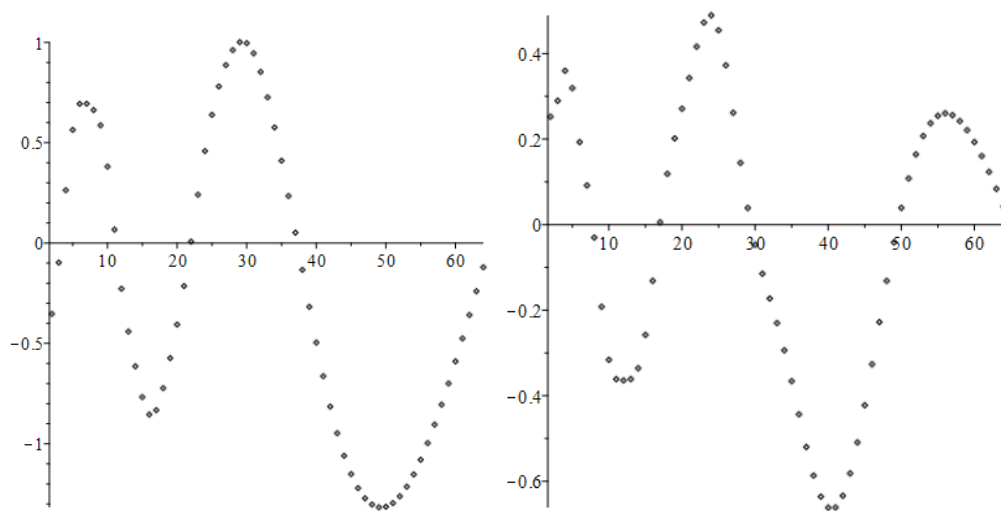


Рисунок 20. Вынужденные колебания нелинейной системы связанных осцилляторов ФПУ

На рис. 20 представлены графики вынужденных колебаний системы ФПУ, как нелинейной механической модели базилярной мембраны. В

соответствии со строением базилярной мембраны и электромеханической аналогией в расчётах зависимости массы и жёсткости осциллятора предполагаются экспоненциальными. На рис. 21 приведён график распределения энергии осцилляторов в однородной системе ФПУ в не резонансном случае, который согласуется с литературными данными [27].

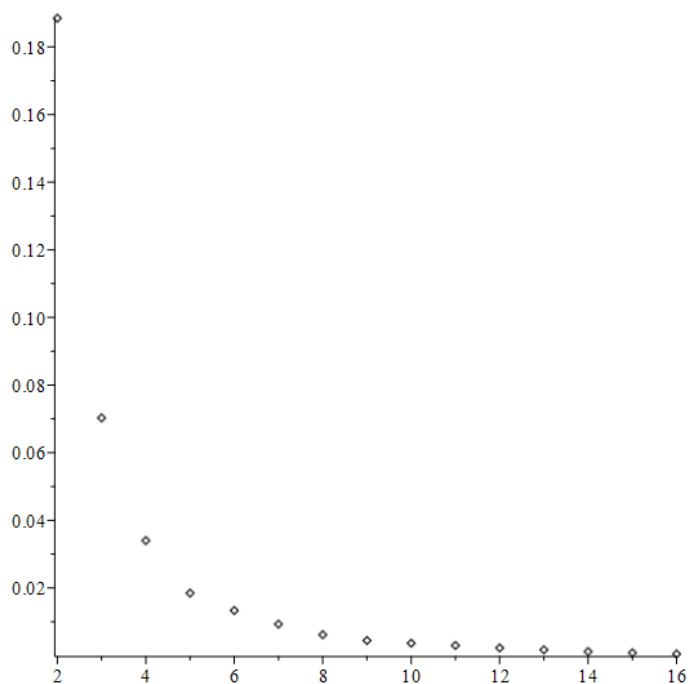


Рисунок 21. Распределения энергии в однородной системе ФПУ

В вопросах компьютерного моделирования не всегда возможно обойтись одной программой или программной средой: компьютерные средства должны быть приспособлены для внесения изменений с целью решения близких задач для набора моделей и учёта различных дополнительных факторов, контроля, анализа и визуализации промежуточных и конечных результатов. Все это подразумевает необходимость разработки и использования комплексов проблемно-ориентированных программ. Такие комплексы предназначены для решения близких по своей математической природе задач из одной предметной области и включают в себя библиотеку программных блоков, из которых составляются рабочие программы. Дальнейшие исследования будут

посвящены изучению резонансных явлений в предметной области и разработке комплекса программ компьютерного моделирования.

ГЛАВА 3. КОМБИНАЦИОННОЕ РАССЕЯНИЕ ЗВУКА В ПСИХОАКУСТИКЕ

3.1. Звукотембральные факторы акустического сигнала

Под *естественным тембром* звукового сигнала можно понимать тот характерный признак музыкального инструмента или человеческого голоса, который сформирован собственно акустической природой источника. С этой точки зрения, можно дать определение *тембра как субъективной качественной характеристики звука, позволяющей отличить данный звук от другого, такой же высоты и громкости.*

Тембр звука – это не только его окраска, степень благозвучности или неблагозвучности, но, что особенно важно, основа *распознаваемости*. Например, по тембру можно различить голоса людей, музыкальные инструменты, другие звуки различного происхождения. Поэтому сохранение тембральных характеристик первичного звукового сигнала – одна из важнейших задач, стоящих перед системами записи и воспроизведения звука.

В основе формирования тембра любого звука лежат различные факторы, которые в крупном плане можно разделить на две категории: это *спектральные критерии и временные.*

Спектральные факторы

К одному из важнейших спектральных факторов, формирующих тембр звука, относится количество *обертонов* и соотношение их амплитуд, имеющих в данном звуке.

Если говорить о музыкальных сигналах, то они, в основном, являются периодическими и, кроме основного тона, определяющего высоту звука, содержат и ряд дополнительных составляющих – обертонов – частоты

которых кратны частоте основного тона. Основываясь на этом, они называются гармониками.

Тембр музыкального инструмента, в зависимости от количества и амплитуд обертонов, может быть более или менее выразительным. Например, в звуках низкого регистра фортепиано или органа обертоны субъективно усиливаются из-за увеличения чувствительности слуха в сторону более высоких частот.

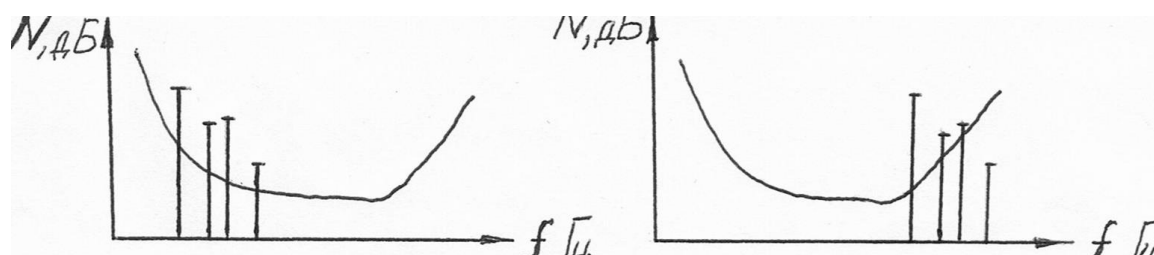


Рисунок 22. Формирование обертонов в различных частотных областях чувствительности слуха

Из рис. 22 видно, что звуковые сигналы, что обладают одинаковым спектральным составом, но расположены в разных высотных регистрах, будут субъективно восприниматься различными по тембру. В низкочастотном регистре большая часть обертонов попадает в область максимальной чувствительности слуха, но такой же по составу звук высокого регистра имеет лишь незначительное количество обертонов в пределах области слышимости слуха. Отсюда звуки нижнего регистра воспринимаются значительно более «красочными», чем звуки среднего и высокого регистров, где такого усиления обертонов не происходит.

Ещё одним важным фактором, что формирует тембральные характеристики звука, является наличие *формантных групп* в спектре звукового сигнала. Формантные группы – это спектральные компоненты, обязанные своей природой наличию в конструкции музыкальных инструментов и в анатомии певцов тех или иных акустических резонаторов. Именно наличие формантных групп придаёт звуку «звучность», «яркость»,

«неповторимость». Различают одноформантные и многоформантные музыкальные инструменты и человеческие голоса. Многие эксперты-акустики считают, что именно формантные группы сообщают звучанию *полётность*.

Такая оценка в особенности справедлива по отношению к высокочастотным или, верхним формантам, расположенным в области максимальной чувствительности слуха и усиливающим восприятие источника, даже если он значительно удалён. Отсюда, скорее всего, и возник этот ассоциативный термин: звук «летит» на большое расстояние. Можно заметить, что при этом он может быть отлично различим даже на фоне сопровождающего его оркестра или другого инструмента с большей мощностью излучения.

Звучание в унисон – это одновременное воспроизведение несколькими музыкальными инструментами (или голосами) звуков одной частоты.

Очень интересен унисон группы однотипных инструментов и голосов. При одновременном их звучании невозможно полное тождество звуков: разные инструменты воспроизводят звуки разной высоты, так как имеют разброс по частоте настройки. Отсюда воспроизводится не одна частота, а узкая полоса дискретных частот. Также все инструменты обладают разными тембрами.

Звучание в унисон нельзя отнести к чисто спектральному фактору, формирующему тембр звука. Кроме расстройки по частоте, исполнение группой инструментов приводит к неодномоментности извлечения звука разными источниками. Так что звуки начинаются «не вместе», есть разброс во времени извлечения каждого из них, что также приводит к особенностям тембральной окраски. Звучание в унисон легко отличается от звучания единичного инструмента (или голоса), исполняющего ту же мелодию.

Временные факторы

К временным факторам относятся *длительность затухания и длительность атаки (нарастания) звука*. Значение временного фактора

особенно наглядно ощущается при сопоставлении тембров органа и фортепиано. При воспроизведении звуков органа происходит достаточно медленное нарастание энергии звукового сигнала, а с момента прекращения воздействия на клавишу инструмента энергия звукового сигнала весьма быстро затухает.

При извлечении звуков из клавиатуры фортепиано же всё происходит наоборот: у звуков фортепиано энергия быстро нарастает, но после прекращения воздействия на клавишу, звук затухает достаточно долго. Хотя спектры инструментов практически одинаковы, их легко можно отличить по тембру. Скорее всего, при формировании тембров инструментов в этом случае решающую роль сыграли временные факторы, а не спектральные.

Интересным является тот факт, что при воспроизведении фортепианной записи в обратном направлении создаётся полное впечатление звучания органа и наоборот.

Сравнительный вид атаки и затухания органа и фортепиано можно увидеть на Рисунке 23.[7]

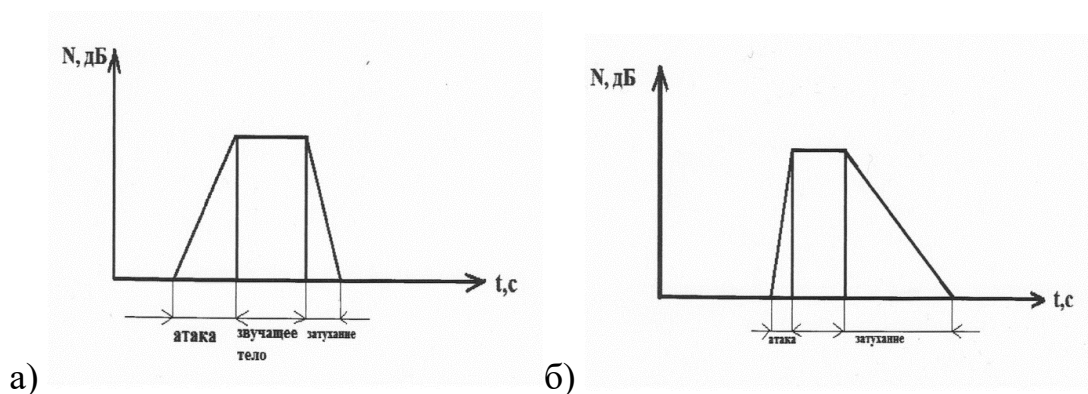


Рисунок 23. Сравнительные длительности атаки и затухания для органа (а) и фортепиано (б).

3.2. Субъективные гармоника в спектре звуковых колебаний. Музыкальное явление Тартини.

Если углубляться в историю, то можно заметить, что в 1714 году итальянский скрипач Джузеппе Тартини описал явление возникновения третьего дополнительного тона при проигрывании громко двух нот. При

изучении данного вопроса проводили эксперименты, отчего пришли к выводу, что дополнительный тон возникает внутри слуховой системы и является следствием её нелинейности, а явление получила название итальянского скрипача. Небезынтересным стоит отметить, что вся акустическая аппаратура нелинейная, но она проявляется при больших условия входного сигнала. [24]

Можно выделить три формы проявления нелинейности: появление слуховых гармоник, появление «субъективных комбинационных тонов», возникновение нелинейной компрессии.

Из-за воздействия на барабанную перепонку громкого синусоидального сигнала с частотой f_0 в процессе обработки возникают слуховые гармоники с частотами $2f_0$, $3f_0$ и т.д. Также подобное происходит, если используется два сигнала большого уровня с частотами f_1 и f_2 , т.е. появление вторичных комбинационных тонов. Стоит также отметить, что слуховой аппарат выполняет функции спектрального анализатора и нелинейного компрессора-усилителя.

Причины нелинейности слуховой системы человека связаны с особенностью строения внутреннего уха, а именно основной мембраны. Так как основная мембрана находится в улитке, а улитка наполнена жидкостью, при ударе стремечка по мембране овального окна возникает звуковой импульс, что возбуждает базилярную мембрану. Подробно данный процесс исследовал учёный Бекеш, где показал, что при высоких уровнях сигнала в жидкости возникают вихревые потоки (рис. 16). Таким образом, первая причина возникновения нелинейных искажений – гидродинамические процессы в жидкости улитки.

Рассматривая подробно строение основной мембраны, можно обратить внимание, что она состоит из внутренних и наружных волосковых клетках. Данные клетки преобразовывают механические смещения мембраны в электрический потенциал, вызывая поток электрических импульсов. Наружные волосные клетки при больших уровнях сигнала удлиняются,

придерживая смещение базилярной мембраны, таким образом, и играют основную роль в нелинейной компрессии. [7]

Интересно то, что музыкальное явление Тартини можно наблюдать в опыте с камертонами, при котором можно услышать дополнительный тон. Так, взяв два камертона (А440 и С523), их можно ударить друг об друга и поочерёдно поднести к уху, но не фиксировать внимание на какой-то конкретный. Проведя несколько попыток, можно услышать дополнительную ноту F, которая будет ниже А440. А чтобы убедиться, что это явление возникает именно в слуховой системе, а не в мозгу, можно проиграть данные ноты на рояле. Проигрывая на рояле, можно услышать приятное F-мажорное трезвучие, т.е. F, A, C, теперь же поместим один камертон у одного уха, а второй – у другого. Если бы это явление было психологическим, то мы бы услышали аккорд, но его не было.

Распишем, почему аккорда мы не услышали. Пусть $p(t)$ – звуковое давление снаружи барабанной перепонки (БП), т.е. её смещение, $q(t)$ может быть реакцией мембраны во внутреннем ухе, но здесь нельзя уверенно это утверждать, так как нужно понять, почему $q(t)$ слуховой системы не подчиняется принципу суперпозиции, то есть почему $q(t)$ содержит третью частоту f_3 ($\approx F329$), тогда как у нас частоты f_1 (А440) и f_2 (С523). Здесь объяснение кроется в нелинейности слуховой системы. Поэтому предположим, что реакция уха $q(t)$ есть нелинейная функция звукового давления $p(t)$:

$$q(t) = \alpha \cdot p(t) + \beta \cdot p^2(t) + \gamma \cdot p^3(t).$$

Пусть $p(t)$ – суперпозиция двух различных гармонических колебаний, образованных двумя камертонами, а для простоты амплитуды колебаний будут одинаковыми, а фазы равны нулю. Также в выбранной системе единицы амплитуды будут равны единицам, тогда:

$$p(t) = \cos\omega_1 t + \cos\omega_2 t.$$

Отсюда реакция на БП:

$$q(t) = \alpha(\cos\omega_1 t + \cos\omega_2 t) + \beta(\cos\omega_1 t + \cos\omega_2 t)^2 + \gamma(\cos\omega_1 t + \cos\omega_2 t)^3.$$

Реакция q линейна при условии, что β и γ равны нулю. Линейная реакция $q(t) = \alpha(\cos\omega_1 t + \cos\omega_2 t)$ является суперпозицией гармонических колебаний с частотами ω_1 и ω_2 . Только при таком условии нельзя услышать F . Член с коэффициентом β определяет квадратичную нелинейность, в следующий член – кубическую.

Представим реакцию $q(t)$ в виде суперпозиции гармонических колебаний, используя несколько тригонометрических тождеств, что выведем сами. Пусть $f(x) \equiv \cos x$. Зная, что $\cos(x + y) + \cos(x - y) = 2\cos x \cos y$, т.е.

$$f(x)f(y) = 0,5 \cdot f(x + y) + 0,5 \cdot f(x - y),$$

используем данный результат для вывода равенства, что необходимо для анализа кубической нелинейности:

$$\begin{aligned} [f(x)f(y)]f(z) &= [0,5 \cdot f(x + y) + 0,5 \cdot f(x - y)]f(z) = \\ &= 0,5 \cdot f(x + y)f(z) + 0,5 \cdot f(x - y)f(z) = \\ &= \frac{1}{4}f(x + y + z) + \frac{1}{4}f(x + y - z) + \frac{1}{4}f(x - y + z) + \frac{1}{4}f(x - y - z). \end{aligned}$$

Таким образом, в квадратичный член реакции входят частоты $2\omega_1$, 0 , $\omega_1 + \omega_2$, $\omega_1 - \omega_2$, $2\omega_2$, которые можно назвать *комбинационными частотами (комбинационные тона)*.

Кубический нелинейный член реакции будет иметь следующий вид:

$$\begin{aligned} (\cos\omega_1 t + \cos\omega_2 t)^3 &= [f(\theta_1) + f(\theta_2)]^3 = f^3(\theta_1) + 3f^2(\theta_1)f(\theta_2) + \\ &+ 3f(\theta_1)f^2(\theta_2) + f^3(\theta_2). \end{aligned}$$

Если использовать равенство для $f(x)f(y)f(z)$, то можно увидеть, что

1. Член $f^3(\theta_1)$ является суперпозицией гармонических колебаний с частотами $3\omega_1$ и ω_1 ;
2. Член $f^2(\theta_1)f(\theta_2)$ определяется суперпозицией частот $2\omega_1 + \omega_2$, $2\omega_1 - \omega_2$ и ω_2 ;
3. Член $f(\theta_1)f^2(\theta_2)$ является суперпозицией частот $2\omega_2 + \omega_1$, $2\omega_2 - \omega_1$ и ω_1 ;
4. Член $f^3(\theta_2)$ является суперпозицией частот $3\omega_2$ и ω_2 .

Таким образом, кубический член реакцией является суперпозицией гармонических колебаний с частотами $3\omega_1$, ω_1 , $2\omega_1 \pm \omega_2$, $2\omega_2 + \omega_1$, $3\omega_2$ и ω_2 .

Возвращаясь к опыту, простые арифметические действия показали, что F не связано с квадратичным нелинейным членом, а определяется вкладом кубического нелинейного числа, а именно комбинационной частотой $2\omega_1 - \omega_2$: $f_1 = A400$, $f_2 = C523$, $2f_1 - f_2 = 800 - 523 = 357$ Гц.

Для равномерно темперированного строя частота ноты F равна 349 Гц, то есть, таким образом, $2f_1 - f_2$ достаточно близко к F.

По мнению учёных, кубическая нелинейность не связана с БП, так как отодвигая два камертона от уха, так что интенсивность, получаемая от камертона, уменьшается, а всё равно слышно ноту F. Если бы такое происходило из-за нелинейной реакции БП, то громкость ноты F падала бы значительно быстрее с расстоянием, чем громкость нот с частотами f_1 и f_2 . Также должен был бы присутствовать нелинейный вклад с частотой $2f_1 - f_2 = 1046 - 400 = 606$ Гц, примерно половина расстояния между D и D#, но данная нота не слышна. Это доказывает, что БП не влияет на нелинейный эффект. [32]

Демонстрационный эксперимент комбинационного рассеяния звука в музыкальном явлении Тартини можно проводить с помощью электронных камертонов с регулируемой громкостью и частотой, так как у обычных камертонов достаточно быстро затухают звуки. Воспользовавшись программой «Камертон», можно даже в домашних условиях проделать данный опыт самостоятельно и наглядно посмотреть и послушать результат опыта (рис. 24, рис. 25).[22][33]

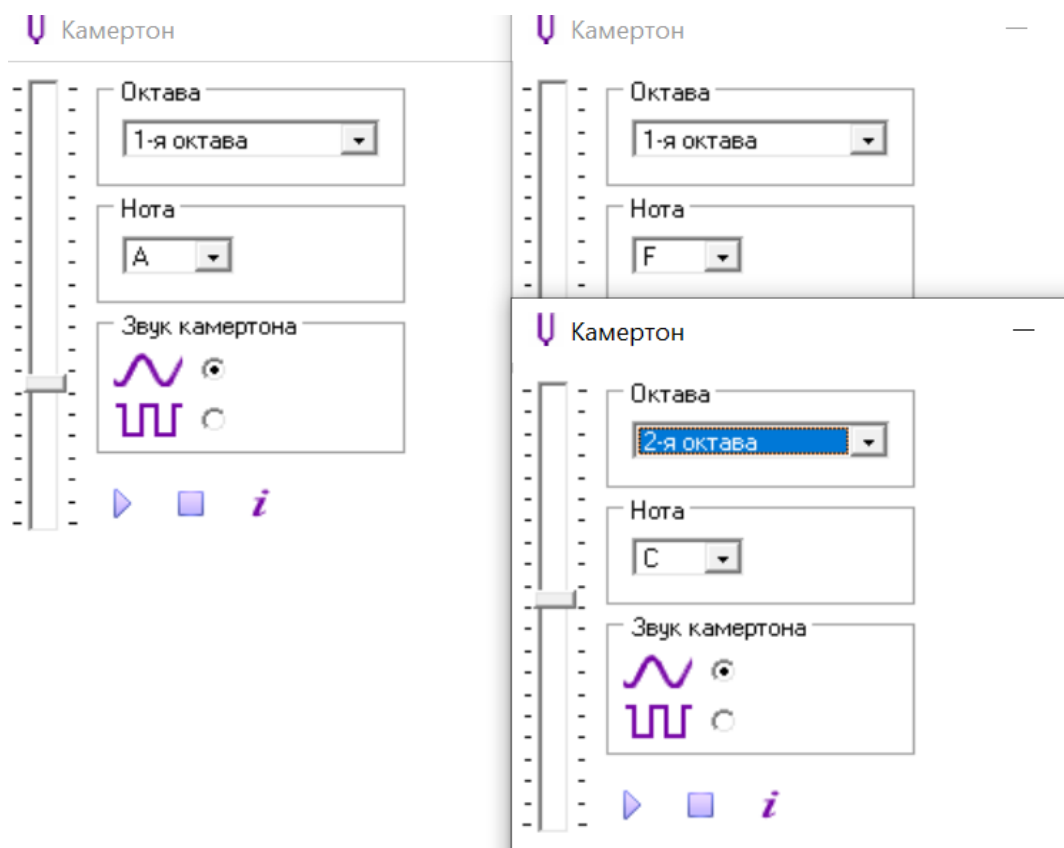


Рисунок 24. Электронные камертоны в демонстрации
комбинационного рассеяния звука

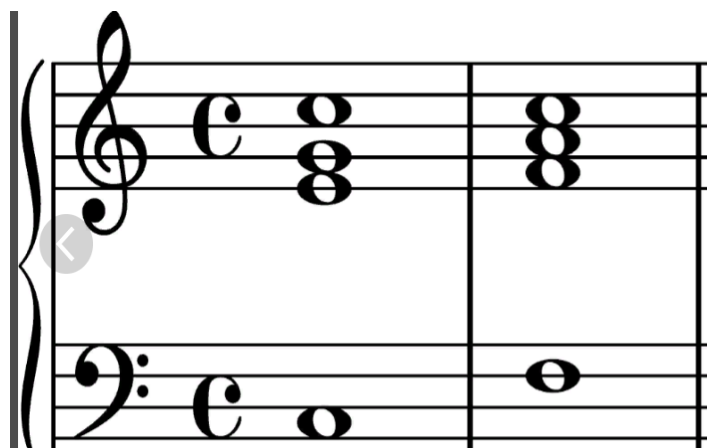


Рисунок 25. Мажорное трезвучие F-dur
в музыкальном явлении Тартини

ГЛАВА 4. ЭКОНОМИЧЕСКОЕ ОБОСНОВАНИЕ И ОЦЕНКА БЕЗОПАСНОСТИ ТРУДА И ЖИЗНЕДЕЯТЕЛЬНОСТИ В УСЛОВИЯХ ПРОЕКТА

4.1. Техничко-экономическое обоснование проекта

4.1.1 Постановка задачи

В данной выпускной квалификационной работе автор проанализированы модели нелинейных волновых процессов в психоакустике музыкальных звуков. Для получения характеристик моделей нелинейных волновых процессов автору потребовался компьютер с установленным пакетом прикладных программ Maple и Камертон.

4.1.2 Общие рекомендации по выбору ПК

Выбор персонального компьютера для работы данной тематики может быть сопряжён с достаточно большими финансовыми вложениями, поскольку конфигурация ПК строится на базе качественных компонентов. Конфигурация ПК, что применяется в данной работе, может быть использована для обеспечения надёжности и высокой производительности.

4.1.3 Определение затрат на приобретение ПК и на создание анализа

Разработка программы для анализа моделей нелинейных волновых процессов в психоакустике музыкальных звуков происходила в три этапа. В первом этапе, автор подобрал оптимальный персональный компьютер, что позволит установить все нужные программы для получения нужных характеристик. Вторым этапом было приобретение лицензионной операционной системы Windows 10 и программы Maple, а программа Камертон была бесплатной. Завершающим этапом была установка ОС Windows 10 и программы Maple на ПК.

№	Наименование	Количество	Цена за ед. (₽)	Сумма (₽)
1	Ноутбук ASUS K501UX	1	58000,00	58000,00
2	Мышь Logitech Wireless Mouse	1	1465,00	1465,00

	M235			
Итого:				59465,00

Таблица 4.1.1. Состав рабочей станции

№	Наименование	Количество	Цена за ед. (₽)	Сумма (₽)
1	ОС Windows 10 Professional	1	14636,50	14636,50
2	Maplesoft Maple 2019	1	17490,62	17490,62
3	Камертон	1	0,00	0,00
Итого:				32127,12

Таблица 4.1.2. Программное обеспечение проекта

В итоге общая сумма затрат на приобретение программного обеспечения и лицензированных программ составила **91592,12** рубля при условии возмездного использования, но так как рабочая станция и программное обеспечение уже были приобретены, то в итоговую смету данная сумма не будет входить.

4.1.4 Расчёт затрат на амортизацию

Амортизационные отчисления определяются, исходя из суммарной стоимости задействованного во время работы оборудования, из утверждённых годовых норм амортизации и времени их использования. Расчёт ведётся по следующей формуле:

$$Z_a = \frac{C_{об} * H_a * T}{12},$$

где $C_{об}$ — общая стоимость оборудования, в рублях;

H_a — годовая норма амортизации;

T — продолжительность работ, в месяцах.

В процессе работы использовался ноутбук ASUS K501UX стоимостью в 58000,00 рублей.

Продолжительность работы составила 1 месяц.

Годовые нормы амортизации для компьютерной техники принимаются равными 0,33 (срок использования до 3 лет).

Вычисление затрат на амортизацию за 1 месяц работы приведены в таблице 4.1.3.

Составляющие	Обозначение	Значение
Стоимость оборудования, руб.	$C_{об}$	58000,00
Годовая норма амортизации	$H_{ам}$	0,33
Продолжительность работ, мес.	T	1
Затраты на амортизацию, руб.	Z_a	1595,00

Таблица 4.1.3. Затраты на амортизацию

Таким образом, из таблицы следует, что затраты на амортизацию составили примерно 1600 рублей.

4.1.5 Расходы на заработную плату

В ходе выполнения работы было задействовано три сотрудника: научный руководитель, с почасовой ставкой 625 (Шестьсот двадцать пять) рублей 00 копеек за 12 часов, консультант по экономической части с почасовой ставкой 500 (Пятьсот) рублей 00 копеек за час и дипломант с почасовой ставкой 350 (Триста пятьдесят) рублей 00 копеек за 640 часов.

Исполнители	Отработанные часы за месяц	Почасовая ставка (₽)	Оплата за один день (₽) с учётом НДФЛ (13%)	Оплата за этап (₽) с учётом НДФЛ (13%)
Научный руководитель	12	625,00	5000,00	7500,00
Консультант по экономической части	1	500,00	500,00	500,00
Дипломант	640	300,00	2800,00	192 000,00
Итого:				200 000,00

Таблица 4.1.4 Расходы на заработную плату

4.1.6 Начисление страховых взносов

Согласно законодательству Российской Федерации и статье № 212-ФЗ от 02.07.2013 года Налогового кодекса работодателем начисляются и оплачиваются страховые взносы на основную и дополнительную заработную плату сотрудников, представляющую собой фонд оплаты труда (ФОТ). Сумма отчислений на все виды страховых взносов составляет 30,2 % от общей суммы заработной платы.

Общая формула расчёта страховых взносов:

$$\text{Страховые взносы} = 0,302 \cdot (\text{Основная заработная плата} + \text{Дополнительная заработная плата})$$

Расчёт страховых взносов

№	Наименование	Размер взноса	Расчёт
1	Взносы в Пенсионный Фонд на обязательное пенсионное страхование	22%	$200\,000,00 \cdot 0,22 = 44\,000,00$
2	Взносы в Фонд медицинского страхования на обязательное медицинское страхование	5,1%	$200\,000 \cdot 0,051 = 10\,200,00$
3	Взносы в Фонд Социального страхования на обязательное социальное страхование в связи с временной нетрудоспособностью и материнством	2,9%	$200\,000 \cdot 0,029 = 5800,00$
4	Взносы в Фонд Социального страхования на обязательное социальное страхование от несчастного случая и профессиональных	0,2%	$200\,000,00 \cdot 0,002 = 400,00$

	заболеваний		
Итого выплат:			60 400,00

Таблица 4.1.5. Расчёт страховых взносов на заработную плату научного руководителя.

Командировочные расходы

Командировочные расходы при выполнении данной работы не запланированы.

4.1.7 Прочие прямые расходы, связанные с выполнением задачи

В данном пункте приняты затраты: расходы, связанные с машинным временем, расходы на электроэнергию и расходы на интернет. Для решения поставленной задачи использовался один ноутбук, мощность которого 0,09 кВт, одноставочный тариф за электроэнергию составлял 4,82 руб. за кВт/час, срок работы составил 40 дней по 8 рабочих часов.

Так же для поиска статей по данной теме использовался интернет, абонентская плата которого составила 500 рублей за полтора месяц.

Расчёт прочих прямых расходов

Стоимость потребляемой энергии:

$$C_{\text{т}} = W \cdot K_{\text{ч}} \cdot C_{\text{у}},$$

где W – мощность ноутбука, $K_{\text{ч}}$ – количество часов работы ноутбука в течение работы, $C_{\text{у}}$ – цена 1кВт электроэнергии в рублях.

$$W = 0,09 \text{ кВт}, K_{\text{ч}} = 320 \text{ ч}, C_{\text{у}} = 4,82 \text{ Р},$$

$$C_{\text{т}} = 0,09 \cdot 320 \cdot 4,82 = 138,82 \text{ Р}$$

Общие затраты по этой статье составили: $138,82 + 500 = 638,82$ рубля.

4.1.8 Итоговая смета расходов

№	Наименование расходов	Сумма (Р)
1	Затраты на амортизацию	1595,00
2	Расходы на заработную плату	200 000,00
3	Страховые взносы	60 400,00
4	Прочие прямые расходы	638,82
Итого:		262 633,82

Таблица 4.1.6. Итоговая смета

Таким образом, при привлечении ресурсов для решения задач проекта на возмездной основе полная себестоимость составляет **263** тыс. руб.

4.1.9 Выводы

В ходе выполнения технико-экономического обоснования к выпускной квалификационной работе, были подсчитаны все затраты, необходимые для успешной реализации программы и выполнения поставленных задач.

Значительная часть расходов составили затраты на сотрудников проекта, примерно 23% на страховые взносы и небольшая часть на прочие прямые расходы и амортизацию.

4.2. Безопасность жизнедеятельности и экология

Когда человек работает за компьютером, то подвергается воздействию множества факторов внешней среды. Среди них числятся зрительная нагрузка, напряжение в мышцах кистей рук, нервная, эмоциональная, а также умственная нагрузка.

Особое положение в обеспечении комфортной и безопасной работы имеет расположение и конструкция элементов рабочего места, что необходимы для поддержания оптимальной рабочей позы человека-оператора. При взаимодействии с ПК работник подвергается воздействию неблагоприятных и вредных производственных факторов: электромагнитных полей (в областях радиочастот ВЧ и УВЧ), слабого и инфракрасного рентгеновских излучений, производственного шума и вибраций, статического электричества и некоторым другим факторам.

К опасным факторам, влияющим на производительность труда и здоровье человека, относятся:

1. Воздействие вредных излучений от монитора;
2. Недостаточная освещённость рабочей зоны;
3. Повышенный уровень шума, на производстве;
4. Наличие электрического напряжения, на производстве;
5. Несоответствие правилам организации рабочего места.

4.2.1 Основные требования к мониторам и ПК

На рабочем месте для мониторов были разработаны специальные требования и стандарты. Их технические характеристики должны соответствовать стандарту ГОСТ 27954-88. Мониторы для ПК обязательно подвергаются сертификационным испытаниям, тестирующие их по некоторым параметрам, а именно:

1. Параметры безопасности – механическая, электрическая и пожарная безопасность (ГОСТ Р 50377 – 92).

2. Санитарно-гигиенические требования – уровень звуковых шумов (ГОСТ 26329 – 84 или ГОСТ 2718 – 88), ультрафиолетовое, рентгеновское излучения, а также показатели уровня качества изображения (ГОСТ 27954 – 88).

Работа с АК подвергает пользователя воздействию электромагнитных излучений, что способны вызывать неблагоприятные эффекты при воздействии на живые организмы (Таблица 4.2.1). Поля с частотой порядка 60 Гц могут вызывать изменения в клетках живых организмов (возможно нарушение синтеза ДНК). Вследствие воздействия электронного пучка на слой люминофора поверхность экрана приобретает электростатический заряд. Сильное электростатическое поле опасно для человеческого организма. На расстоянии 50 см влияние электростатического поля уменьшается до безопасного для человека уровня. Применение специальных защитных фильтров и плёнок позволяет свести его к нулю.

Конструкция монитора должна обеспечивать возможность фронтального наблюдения экрана путём поворота корпуса в горизонтальной плоскости вокруг вертикальной оси в пределах $\pm 30^\circ$ и в вертикальной плоскости вокруг горизонтальной оси в пределах $\pm 30^\circ$ с фиксацией в заданном положении. Корпус монитора должен быть окрашен в неконтрастные, мягкие тона с диффузным рассеиванием света. Необходима возможность регулирования яркости и контрастности.

Наименование параметра	Допустимые
Напряжённость электрической составляющей электромагнитного поля на расстоянии 50 см от поверхности видеомонитора	10В/м
Напряжённость магнитной составляющей электромагнитного поля на расстоянии 50 см от поверхности видеомонитора	0,3А/м
Напряжённость электростатического поля не должна превышать: для взрослых пользователей для детей дошкольных учреждений и учащихся средних специальных и высших учебных заведений	20кВ/м 15кВ/м

Таблица 4.2.1. Допустимые значения параметров неионизирующих электромагнитных излучений (в соответствии с СанПиН 2.2.2.542-96).

4.2.2 Требования к освещению на рабочих местах

При правильном настроенном освещении улучшаются условия для зрительного фактора работы, уменьшается утомляемость, увеличивается производительность труда и это благотворно влияет на рабочую среду, оказывая положительное психологическое воздействие на человека. Также повышается безопасность труда и снижает травматизм. При недостатке освещённости происходит напряжение зрительных органов, ослабляется внимание, наступает преждевременная утомлённость. Слишком яркое освещение может вызывать ослепление, раздражение и другие последствия. Неверное направление света на рабочем месте способствует созданию резкие теней и бликов, способных вызывать замешательство у работника. Следствием невыполнения норм по освещённости могут стать как несчастные случаи, так и профзаболевания.

Согласно СНиП 23-05-95 помещения, в которых предполагается работа с компьютером, обязательно должны иметь и искусственное, и естественное освещение. При выполнении зрительных работ высокой точности общая освещённость должна составлять 300лк, а комбинированная – 750лк;

аналогичные требования при выполнении работ средней точности – 200 и 400лк соответственно. Искусственное освещение в помещениях для эксплуатации ПК должно выполняться системой общего равномерного освещения (люстры, потолочные светильники), при необходимости к общему освещению дополнительно можно устанавливать светильники местного освещения – настольные лампы.

Люминесцентные лампы более предпочтительны в роли искусственного источника света. Они имеют освещённость в 4-5 раз выше, чем лампы накаливания, и могут обладать тёплым свечением. Также они обеспечивают более точную цветопередачу, свет от них по своему составу близок к естественному. В отличие от ламп накаливания, люминесцентные являются не тепловым, а «холодным» источником света, отчего не наблюдается дополнительный нагрев помещения, также за счёт большей поверхности данного типа ламп происходит равномерное распределение света в помещении. Люминесцентные лампы должны быть защищены экранирующими решётками, что называются рассеивателями, для предотвращения пагубного действия ламп на глаза пользователя ПК и возникновения бликов на поверхности экранов мониторов. Использовать оба вида ламп в одном помещении запрещено. Ежегодно должны проводиться санитарные предприятия по очистке ламп, а также смена нерабочих единиц

4.2.3 Шум и вибрация в производственном помещении

Шум и вибрация отрицательно сказываются на условиях труда, оказывая сильно влияние на здоровье человека. Под воздействием шума снижается концентрация внимания, нарушаются физиологические функции, появляется усталость в связи с повышенными энергетическими затратами и нервно-психическим напряжением, ухудшается речевая коммутация. Люди, что работают при условии длительного шумового воздействия, испытывают раздражительность, головные боли, головокружение, снижение памяти, повышенную утомляемость, боли в ушах и т. д. Такие нарушения в работе

ряда органов и систем организма человека могут вызвать негативные изменения в эмоциональном состоянии человека, вплоть до стрессовых ситуаций. Всё это снижает работоспособность человека и производительность, качество и безопасность его труда. Длительное воздействие интенсивного шума (выше 80 дБ) на слух человека приводит к его частичной или полной потере.

В Таблице 4.2.2 указаны предельные уровни звука в зависимости от категории тяжести и напряжённости труда, являющиеся безопасными в отношении сохранения здоровья и работоспособности.

Категория напряжённости труда	Категория тяжести труда			
	I. Лёгкая	II. Средняя	III. Тяжёлая	IV. Очень тяжёлая
I. Мало напряжённый	80	80	75	75
II. Умеренно напряжённый	70	70	65	65
III. Напряжённый	60	60	-	-
IV. Очень напряжённый	50	50	-	-

Таблица 4.2.2. Предельные уровни звука на рабочих местах, дБ.

Для снижения уровня шума стены и потолок помещений, где установлены компьютеры, могут быть облицованы звукопоглощающими материалами, а уровень вибрации в помещениях вычислительных центров может быть снижен путём установки на оборудование специальных виброизоляторов.

4.2.4 Параметры микроклимата

Микроклимат может изменяться в широких пределах, однако человеческое тело поддерживает постоянство температуры благодаря терморегуляции. Для нормирования микроклимата создаются оптимальные условия, при которых улучшается обмен тепла с окружающей средой.

Компьютерная техника относится к источникам выделения тепла. Она может привести к увеличению температуры и понижению относительной влажности воздуха в помещении. Поэтому там, где установлены компьютеры, должны учитываться определенные нормы микроклиматических параметров. Для создания комфортных условий в санитарных нормах приводятся требования к параметрам микроклимата. Они различаются для разных времён года и зависят от типа труда, предполагающего использование данного помещения, а также от параметров самого помещения.

По существующим нормам, объем помещений для рабочих лиц, взаимодействующих с вычислительной техникой, не может быть меньше, чем $19,5\text{м}^3$ для одного человека, с учётом максимального числа одновременно работающих в смену. В таблице 4.2.3 указаны нормы для подачи свежего воздуха в помещения с вычислительной техникой.

Период года	Параметр микроклимата	Величин
Холодный	Температура воздуха в помещении	22...24°C
	Относительная влажность	40...60%
	Скорость движения воздуха	до 0,1м/с
Тёплый	Температура воздуха в помещении	23...25°C
	Относительная влажность	40...60%
	Скорость движения воздуха	0,1...0,2м/с

Таблица 4.2.3. Параметры микроклимата для помещений с вычислительной техникой.

Условия для работы и обеспечения комфортного микроклимата могут быть достигнуты с помощью организационных методов, например, правильная организация работ с учётом времени года и суток, чередование труда и отдыха; а также с помощью технических средств, например, вентилирование помещений, кондиционирование воздуха, применение системы отопления.

4.2.5 Требования к режиму труда и отдыха

Для смягчения возможных негативных последствий на производстве необходимо ввести рациональный режим труда и отдыха, что позволит увеличить производительность работников и положительно влияет на их физическое и ментальное состояние.

В таблице 4.2.4 представлены сведения о регламентированных перерывах, которые необходимо делать при работе на компьютере, в зависимости от продолжительности рабочей смены, видов и категорий трудовой деятельности с ВДТ (видеодисплейный терминал) и ПК (в соответствии с СанПиН 2.2.2 542-96 «Гигиенические требования к видеодисплейным терминалам, персональным электронно-вычислительным машинам и организации работ»).

Категория работы с ВДТ или ПЭВМ	Уровень нагрузки за рабочую смену при видах работы с ВДТ			Суммарное время регламентированных	
	Группа А, количеств	Группа Б, количеств о знаков	Группа В, часов	При 8-часовой смене	При 12-часовой смене
I	до 20000	до 15000	до 2,0	30	70
II	до 40000	до 30000	до 4,0	50	90
III	до 60000	до 40000	до 6,0	70	120

Таблица 4.2.4. Время регламентированных перерывов при работе на ПК.

При несоответствии фактических условий труда требованиям Санитарных правил и норм время регламентированных перерывов следует увеличить на 30%.

4.2.6 Требование к организации рабочих мест

Работа человека с ПК сопряжена со значительными зрительными и нервно-психологическими нагрузками, что повышает требования к организации труда пользователей ПК.

Предъявляются следующие требования к рабочему месту:

высота стола с клавиатурой должна составлять 62–88 см над уровнем стола; а высота экрана (над полом) – 90–128 см;

положение спинки кресла оператора должно обеспечивать наклон тела назад от 97–121°;

расстояние от экрана до края стола – 40–115 см;

наклон экрана – от –15 до +20° по отношению к нормальному его положению.

Существенное значение для производительной и качественной работы на компьютере имеют размеры знаков, плотность их размещения, контраст и соотношение яркостей символов и фона экрана. Если расстояние от глаз оператора до экрана дисплея составляет 60–80 см, то высота знака должна быть не менее 3 мм, оптимальное соотношение ширины и высоты знака составляет 3:4, а расстояние между знаками – 15–20% их высоты. Соотношение яркости фона экрана и символов – от 1:2–1:5 до 1:10–1:15.

Конструкция рабочей мебели должна обеспечивать возможность индивидуальной регулировки, соответственно росту работающего, и создавать удобную позу. Конструкция рабочего стола должна обеспечивать оптимальное размещение на рабочей поверхности используемого оборудования с учётом его количественных и конструктивных особенностей, а также характера выполняемой работы.

Модульными размерами рабочей поверхности стола, на основании которых должны рассчитываться конструктивные размеры, следует считать: ширину – 800, 1000, 1200 и 1400 мм, глубину – 800 и 1000 мм при нерегулируемой его высоте, равной 725 мм. Под столешницей рабочего стола должно быть свободное пространство для ног с размерами по высоте не менее 600 мм, по ширине – 500 мм, по глубине – 650 мм.

Конструкция рабочего стула должна обеспечивать поддержание рациональной рабочей позы при работе, что позволит изменять позу для снижения статического напряжения мышц шейно-плечевой области и спины для предупреждения развития утомления. Рабочее кресло должно иметь

подлокотники. Ширина и глубина поверхности сиденья должна составлять не менее 400 мм. Высота опорной поверхности спинки должна быть не менее 300 мм, ширина – не менее 380 мм. Радиус её кривизны в горизонтальной плоскости – 400 мм. Угол наклона спинки должен изменяться в пределах 90° – 110° к плоскости сиденья.

Материал покрытия рабочего кресла должен обеспечивать возможность лёгкой очистки от загрязнений. Поверхности сиденья и спинки должны быть полумягкими, с нескользящим, не электризующимся и воздухопроницаемым покрытием.

4.2.7 Противопожарная защита

Пожарная безопасность обеспечивается системой предотвращения пожара и системой пожарной защиты. Во всех служебных помещениях обязательно должен быть «План эвакуации людей при пожаре», регламентирующий действия персонала в случае возникновения очага возгорания и указывающий места расположения пожарной техники.

Пожары в вычислительных центрах (ВЦ) представляют особую опасность, так как сопряжены с большими материальными потерями. Характерная особенность ВЦ – небольшие площади помещений. Пожар может возникнуть при взаимодействии горючих веществ, окислителя и источников зажигания, а в помещениях ВЦ присутствуют все три основных фактора, необходимые для возникновения пожара.

Горючими компонентами на ВЦ являются: строительные материалы для акустической и эстетической отделки помещений, перегородки, двери, полы, перфокарты и перфоленты, изоляция кабелей и др. Источниками зажигания в ВЦ могут быть электрические схемы от ЭВМ, приборы, применяемые для технического обслуживания, устройства электропитания, кондиционирования воздуха, где в результате различных нарушений образуются перегретые элементы, электрические искры и дуги, способные вызвать загорания горючих материалов.

Одна из наиболее важных задач пожарной защиты – защита строительных помещений от разрушений и обеспечение их достаточной прочности в условиях воздействия высоких температур при пожаре. Учитывая высокую стоимость электронного оборудования ВЦ, а также категорию его пожарной опасности, здания для ВЦ и части здания другого назначения, в которых предусмотрено размещение ЭВМ, должны быть первой и второй степени огнестойкости. Для изготовления строительных конструкций используются, как правило, кирпич, железобетон, стекло, металл и другие негорючие материалы. Применение дерева должно быть ограничено, а в случае использования необходимо пропитывать его огнезащитными составами.

Для обеспечения пожарной безопасности на рабочем месте запрещается иметь огнеопасные вещества

При возникновении пожароопасной ситуации или пожара персонал должен немедленно принять необходимые меры для его ликвидации, одновременно оповестить о пожаре администрацию.

Помещения с электрооборудованием должны быть оснащены огнетушителями типа ОУ-2 или ОУБ-3.

ЗАКЛЮЧЕНИЕ

В выпускной квалификационной работе был проведён анализ научной и методической литературы по теме исследования и на этом основании определена методологию научного исследования в разработке нелинейной динамической модели волновых процессов в базилярной мембране слуховой системы человека.

Итогом работы являются научные результаты исследований нелинейных динамических моделей волновых процессов в психоакустике музыкальных звуков и резонансы энергии вынужденных колебаний длинной наноразмерной системы Ферми-Паста-Улама в динамической модели базилярной мембраны, а также получена зависимость от частоты периодической внешней силы. Также был получен амплитудный спектр колебания струны, прямоугольной и круглой мембраны в случае возбуждения прямоугольным импульсом и проведён спектральный анализ комбинационного рассеяния, а также экспериментальная проверка нелинейных свойств слуха при наличии субъективных гармоник музыкального звука.

Также полученные результаты могут использоваться в научной работе при изучении методов математического и компьютерного моделирования, для иллюстраций и демонстрационных примеров в общем курсе физики, а также при изучении дисциплин «Теоретические основы акустики» и «Нелинейные колебания и волны» для направления подготовки бакалавров 11.03.01 - Радиотехника.

Достоверность и апробация научных результатов

Достоверность полученных результатов подтверждается компьютерным моделированием, согласованностью с результатами научных и методических работ, представленных в списке литературы, корректным применением математического аппарата, обсуждениями на научных конференциях и публикациями в научных сборниках статей.

Результаты, полученные в рамках выпускной квалификационной работы представлены в докладах научных конференций:

1. Нелинейные свойства слуха и их проявления. // V Международная научно-практическая конференция «Инновационные технологии в медиаобразовании» 29 – 30 октября 2020 г. , СПбГИКиТ.
2. Анализ психоакустического восприятия звуковых волн органами слуха. // VI Всероссийская молодёжная научно-практическая конференция «Наука. Творчество. Инновации» 10 – 11 декабря 2020 г., СПбГИКиТ.
3. Исследование нелинейных волновых процессов в психоакустике музыкальных звуков. // Международная научно-практический форум студентов, аспирантов и молодых учёных «Неделя науки и творчества 2021» 17 – 21 мая 2021 г., СПбГИКиТ.

По материалам выпускной квалификационной работы опубликована статья:

1. Лопаскина Е.А. Модели нелинейных волновых процессов в психоакустике». Сборник материалов IV международной научно-практической конференции «Инновационные технологии в медиаобразовании», 8-9 октября 2019 г., СПбГИКиТ, 2020. (Научный руководитель: проф. А.И.Ходанович), ISBN 978-5-94760-401-6.

СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ

1. Ходанович А.И., Щитов И.Н., Чернявский М.А. Методические и программные средства компьютерного моделирования в теории колебаний. Актуальные вопросы развития индустрии кино и телевидения в современной России. Сборник научных трудов. Вып.2.- СПбГИКиТ, 2018.- С 43-48.
2. Арсенин В.Я. Методы математической физики и специальные функции: Учебное пособие для студентов высших технических учебных заведений. - М.: Наука, 1984.- 383 с.
3. Бегун Е.Н., Щитов И.Н. Прикладные математические методы в радиотехнике. Учебное пособие. - СПбГИКиТ, 2020.- 173 с.
4. Гаврилов В.С., Денисова Н.А., Калинин А.В. Функции Бесселя в задачах тематической физики: Учебно–методическое пособие. - Нижний Новгород: Издательство Нижегородского госуниверситета, 2014.- 40 с.
5. Дьяконов В. П. Maple 10/11/12/13/14 в математических расчетах. -
6. М.: ДМК Пресс, 2011. - 800 с.
7. Тихонов А.Н., Самарский А.А. Уравнения математической физики. Учебник для физико-матем. специальностей. М.: Изд-во Моск. ун-та: Наука, 2004.- 798 с.
8. Теоретические основы акустики: учебное пособие / Ходанович А.И., Смирнова Н.А., Кисиль Н.И., Шашкина А.С., Кондыбаева И.Ш. – СПб.: СПбГИКиТ, 2018. – 203 с.
9. Лихачев А. Г. Памяти профессора Георга Бекеша, Вестн, ото-ринолар., № 5, 115, 1973.
10. Гельфанд Стенли А. Слух. Введение в психологическую и физиологическую акустику. – М.: Медицина, 1984
11. Алдошина И.А. Притс Р. Музыкальная акустика. Учебник для ВУЗов. – СПб.: Изд. «Композитор», СПб, 2009
12. Хроника. Г. Бекеша- лауреат нобелевской премии. Акустический журнал №2, том IX, 1963. – С 249.

- 13.Ходанович А.И. Классические парадоксы вычислительной физики в современной науке и образовании. Научный журнал "Современные наукоемкие технологии" № 2 (часть 3) 2016, стр. 585-588.
- 14.Ходанович А.И., Кисиль Н.И. Современные информационные технологии в технических проектах СПбГИКиТ. Инновационные технологии в медиаобразовании: материалы II Международной научно-практической конференции, 29, 30 мая 2017 г. / редкол. : А. И. Ходанович (отв. ред.) [и др.]. – СПб. : СПбГИКиТ, 2018. – С 242-250.
- 15.Ходанович А.И., Скворцов Н.Н., Штейн Б.М., Шашкина А.С. Физика. Учебник. /Под ред. проф. А.И.Ходановича.- СПб.: СПбГИКиТ, 2019.- 289 с.
- 16.Ходанович А.И., Сорокина И.В. Колебательные и волновые процессы в нелинейной дискретной динамической системе. Физика в школе и вузе: международный сборник научных статей. Выпуск 22 /Российский государственный педагогический университет им. А.И. Герцена. – СПб., 2020.- С 81-88.
- 17.Ходанович А.И., Лопаскина Е.А. Модели нелинейных волновых процессов в психоакустике. Инновационные технологии в медиаобразовании: материалы IV Международной научно-практической конференции (Санкт-Петербург, 8, 9, октября 2019 г.) / редакционная коллегия: А. И. Ходанович (ответственный редактор) и др. – Санкт-Петербург : СПбГИКиТ, 2020. – С 118-121.
- 18.Ходанович А.И. Феноменологический подход в математическом моделировании механических колебаний. Научно-практический журнал РАО «Учебная физика» № 6.- Удмуртия, Глазов: Изд-во ГГПИ им. В.Г. Короленко, 2004.
- 19.Ходанович А.И. История методов изучения колебаний струны в учебном физическом эксперименте. Тезисы доклада и аннотация статьи в программе и материалах XI Всероссийской научно-практической конференции «Учебный физический эксперимент: Актуальные проблемы,

современные решения. - Удмуртия, Глазов: Изд-во ГГПИ им. В.Г. Короленко, 2006. (в соавт.)

20.Ходанович А.И., Сорокина И.В., Соколов Д.А. Математическое и компьютерное моделирование в учебных исследованиях. Монография. Изд-во LAP LAMBERT Academic Publishing, Saarbrücken, Deutschland/Германия, 2012.- 125 с.

21.Ходанович А.И., Сорокина И.В., Соколов Д.А. Спектральный анализ нелинейных колебаний в многомерном фазовом пространстве. Физика в системе современного образования. Материалы XIII Международной научной конференции. Т.1- СПб: Изд-во РГПУ им. А.И.Герцена, 2015.- С 199-201.

22.Ходанович А.И. Математика и физика в системе фундаментального образования. Инновационные технологии в медиаобразовании: материалы III Всероссийской науч.-практ. конференции 27, 28 марта 2015.- СПб.: СПбГИКиТ, 2015.- С 6-12.

23.Ходанович А.И., Горбунова И.Б. Компьютерные науки и музыкально-компьютерные технологии в системе современного музыкального образования: музыкальное программирование. Международный научный журнал «Мир науки, культуры, образования», № 5(60), 2016.- С 118-121.

24.Алдошина И.А. Аурализация- виртуальный звуковой мир. Журнал «Звукорежиссер», 2000, №7.

25.Алдошина И.А. Подборка статей по психоакустике с сайта <http://www.625-net.ru> (дата обращения 10.01.2021 г.).

26.Рустамов А.Р. Звуковой образ пространства в структуре художественного языка звукорежиссуры. Автореферат диссертации на соискание ученой степени кандидата искусствоведения. - СПб., 2013. Научная электронная библиотека диссертаций и авторефератов; URL:www.dissercat.com (дата обращения 13.01.2021).

27.Болотнов Д.В., Запрягаев С.А. Распознавание звуковых образов на основе анализа отклика системы осцилляторов. Вестник ВГУ, серия:

- Системный анализ и информационные технологии, 2012, № 1.- С 168-173.
www.vestnik.vsu.ru
- 28.Найда С.А. Электрические модели среднего и внутреннего уха человека. // Электроника и связь, 2012, № 3.- С 40-48.
- 29.Кисиль Н.И., Ходанович А.И. Современные информационные технологии в технических проектах СПбГИКиТ. – Инновационные технологии в медиаобразовании: материалы II Международной научно-практической конференции, 29, 30 мая 2017 г. / редкол.: А. И. Ходанович (отв. ред.) [и др.]. - СПб. : СПбГИКиТ, 2018. – С 242-250.
- 30.Ходанович А.И. Математическое моделирование на компьютере. Сборник задач и упражнений. – СПб.: Изд-во СПбГУКиТ, 2009. – 118 с.
- 31.Ходанович А.И., Сорокина И.В., Скоморохов Д.С. Вероятностно-статистические методы и модели в учебном компьютерном эксперименте. Международный научный журнал «Мир науки, культуры, образования», № 1(62), 2017. – С 210-214
- 32.Ходанович А.И. Классические парадоксы вычислительной физики в современной науке и образовании. Научный журнал "Современные наукоемкие технологии" № 2 (часть 3) 2016.- С 585-588.
- 33.Крауфорд Ф. Волны. Берклевский курс физики. Т.3. – 1974. - 52 – 54 с.
- 34.Ходанович А.И., Горбунова И.Б. Функционально-логические аспекты изучения музыкального творчества и аудиовизуальный синтез в системе современного образования. Международный научный журнал «Мир науки, культуры, образования», № 5(60), 2016.- С 121-124.
- 35.Кондратьева М.Н., Баландина Е.В. Экономика и организация производства: [Учебное пособие] – 2013. – 45 с.
- 36.Санпин 512-78, 2000 г.
- 37.Санпин 2.2.2.542-96, 1996 г.
- 38.ГОСТ 30457-97 Акустика. Определение уровней звуковой мощности источников шума на основе интенсивности звука. Измерение в

дискретных точках. Технический метод. - Введ. 01.01.1999. - Госстандарт России: Изд-во стандартов, - 1999. - 16 с.

39.Алдошина И. А. Электродинамические громкоговорители. - М. - Радио и связь, 1989, - 272 с.: ил.

40.Бейли Д. Волоконная оптика теория и практика / Дэвид Бейли, Эдвин Райт. КУДИЦ-ПРЕСС, 2008 г. - 320 с.

41.Гари Дэвис, Ральф Джонс. Звук: теория, устройства, практические рекомендации // Цифровое видео. -2002. -№1. -10 с.

42.Иванов М. Т. Теоретические основы радиотехники // М. Т. Иванов, А. Б. Сергиенко, В. Н. Ушаков; Под ред. В. Н. Ушакова / Учеб. Пособие. - М.: Высшая школа, -2002. -306 с.

43.Кондратьев К. В. Выбор DSP - процессора для вычисления сигнала, способствующего возникновению акустической обратной связи / К. В. Кондратьев, В. Н. Сергеевич. Робототехника как образовательная технология: материалы II Международной научно-практической конференции: - Железногорск: филиал СФУ, 2010, - С 99-101.

44.Марченко, Н.М. Назначение и структура приложения Simulink пакета MATLAB: метод. указания к лабораторной работе № 1 по дисциплине «Моделирование электромеханических систем» для студентов направления 140400 «Электроэнергетика и электротехника» профиля «Электропривод и автоматика» [Электронный ресурс] / Н.М. Марченко; Дальневосточный федеральный университет, Инженерная школа. - Электрон. дан. -Владивосток: Издательский дом Дальневост. федерал. ун-та, 2013. - 34 с.

45.Матюха В. Информационно-измерительные и управляющие системы. - М.: 2012. № 3. С. 19-22.

46.Семенов Э. В. Электроакустические устройства: Учебное пособие. / Томск: Томский межвузовский центр дистанционного образования. 2003. 145 с.

47. Степанов А.В. Электрические шумы. Описание задачи спецпрактикума М: 2003. - 27 с.
48. Фомишкин В. В. Технические средства для передачи звуковых сигналов акустически в аналоговой форме по телефонным каналам связи / Фомишкин В. В. / Спецтехника и связь. - М.: 2011. № 6. С. 49-59.
49. Халяпин Д. Б., Рюмин А.А, Использование динамических спектрограмм для оценки качества зашумления речевого сигнала Журнал "Information Security/ Информационная безопасность. №4, 2005. С 15-17.
50. Харкевич А. А. Спектры и анализ - 4-е изд. - Москва : URSS : ЛКИ, 2007.