

КУДИНОВ А. А.

ИССЛЕДОВАНИЕ ГАРМОНИЧЕСКОЙ СТРУКТУРЫ
ЗВУКОВЫХ ОБЪЕКТОВ

Москва 2001

ИССЛЕДОВАНИЕ ГАРМОНИЧЕСКОЙ СТРУКТУРЫ ЗВУКОВЫХ ОБЪЕКТОВ

ВВЕДЕНИЕ	2
ОПИСАНИЕ ИССЛЕДОВАНИЯ	3
Цели и задачи исследования	3
Объект исследования	4
Методика и последовательность исследования.....	4
Инструменты исследования.....	6
РЕЗУЛЬТАТЫ ИССЛЕДОВАНИЯ.....	10
КАК СЛЕДУЕТ ПОНИМАТЬ РЕЗУЛЬТАТЫ АНАЛИЗА?.....	10
КЛАССИФИКАЦИЯ МУЗЫКАЛЬНЫХ ИНСТРУМЕНТОВ.....	11
ГАРМОНИЧНОСТЬ МУЗЫКАЛЬНЫХ ЗВУКОВ	16
УЗНАВАНИЕ ТЕМБРА: ЧТО ВАЖНО И ЧТО НЕТ?	27
ЛИТЕРАТУРА	32

• Введение

Первоначальной целью исследования было изучение изменения спектральной структуры звуковых объектов (отдельных нот, фонем) на длительности их существования. Объектом исследования было изучение отклонения периода сигнала от среднего значения и изменения соотношений амплитуд и фаз гармонических составляющих. Исследование изначально имело целью изучение влияния нестабильности параметров сигнала на достоверность определения периода сигнала в задачах распознавания звуковых образов. Однако полученные результаты и их анализ позволяют расширить область их применения.

На сегодняшний день не существует определения понятия «тембр». Связь тембра с объективными параметрами сигнала остаётся изученной не до конца. Результаты данного исследования можно считать вкладом и в изучение тембра. Основанием для такого заявления является то, что полученные результаты позволяют отчасти ответить на вопрос, чем отличаются друг от друга звуковые колебания различных инструментов и чем похожи сигналы, синтезированные однотипными инструментами, как можно идентифицировать тембр.

Уже Гельмгольцу, основоположнику классической теории тембра, было очевидно, что усреднённый амплитудный спектр ни в коем случае не описывает тембра, реальный звуковой сигнал не является строго стационарным даже на стадии установившихся колебаний. Соотношение амплитуд, частот и фаз гармонических составляющих реальных звуков неустойчиво и постоянно изменяется. Более того, на сегодняшний день принято считать, что субъективное восприятие тембра звука в большей степени зависит от участков нестационарности сигнала: атак и спадов. В любом случае, очевидно, что определённого рода нестабильности (частотное и амплитудное вибрато, незначительная негармоничность) только способствуют благоприятному восприятию человеком звука. Аддитивный синтез, не учитывающий этого обстоятельства, больших успехов не добился: попытки синтезировать реальные тембры с помощью немодулированных однотональных сигналов даже не приблизились к своей цели.

Сегодня изучение тембра направлено именно на исследование изменений внутренней структуры звуковых объектов, как во временной, так и в частотной областях. «Для оценки тембра звучания важен не только момент его распознавания

(т.е. способность отличить один инструмент от другого), но и возможность оценить изменение тембра в процессе исполнения. Здесь важнейшую роль играет динамика изменения спектральной огибающей во времени на всех этапах звучания: атаки, стационарной части, спада.

Характер поведения каждого обертона во времени также несёт важнейшую информацию о тембре. ... Поведение различных обертонов во времени зависит от типа инструмента: в звучании рояля, органа, гитары и др. процесс изменения амплитуд обертонов имеет совершенно разный характер.

Опыт показывает, что аддитивный синтез, учитывающий специфику развёртывания отдельных обертонов во времени, позволяет получить значительно более «жизненное» звучание» ([2], стр. 56).

- **Описание исследования**

Цели и задачи исследования

В процессе исследования решим следующие задачи:

1. наблюдение процессов развёртывания гармонических составляющих звуковых объектов, т.е. процесса изменения их амплитуд и фаз на всей длительности объекта;
2. выявление общих закономерностей в развёртывании гармонических составляющих у разных музыкальных инструментов;
3. изучение влияния интенсивности возбуждения и способа извлечения звука на процесс развития гармонических составляющих;
4. исследование взаимного влияния гармонических составляющих звуковых объектов.

Решение этих задач необходимо для достижения цели исследования: построение адекватной модели звуковых объектов, пригодной для синтеза и идентификации тембра.

Кроме того, попытаемся установить связь гармонической структуры звукового объекта с тембром.

Под звуковым объектом будем понимать минимальный по длительности элементарный звуковой сигнал, воспринимаемый как самостоятельное единое целое (для каждого звукового объекта можно определить высоту тона и тембр). Музыкальным звуковым объектом является фрагмент сигнала, соответствующий отдельной ноте от момента извлечения до момента затухания. Речевым звуковым объектом может быть отдельная фонема или слог.

Объектом данного исследования являются реальные звуковые объекты — звуковые сигналы, произведённые реальными инструментами, соответствующие отдельным нотам. Т.е. исследуемые звуковые объекты не являются фрагментами исполнения какой либо мелодии и не являются результатом электронного синтеза.

Исследованию подлежат звуки различных музыкальных инструментов: инструменты симфонического оркестра (духовые, смычковые), фортепиано, гитара, ударные инструменты с определённой высотой тона. В свою очередь, звуки каждого инструмента отличаются по высоте тона, а для некоторых инструментов — ещё и по громкости и приёму исполнения (стаккато, пиццикато).

Методика и последовательность исследования

При анализе сигналов будем опираться на следующие предположения:

1. Все исследуемые сигналы являются фрагментами с одной высотой тона, т.е. соответствуют одной ноте, а не созвучию.
2. Все натуральные призвуки основного тона являются его гармониками, т.е. их частоты примерно кратны частоте основного тона.
3. Сигнал является квазипериодическим: длительность полных циклов колебаний имеет незначительные отклонения от некоего среднего значения. На стадиях установления и затухания колебаний (атаки и спада) эти отклонения не нормируются, а на установившейся стадии отклонение периода соответствует изменению высоты тона не более четверти тона.
4. Средний период сигнала равен периоду сигнала на установившейся стадии колебаний.

5. Сигнал можно неким способом разбить на периоды, т.е. на участки, имеющие примерно одинаковую длительность и имеющие топологически одинаковую форму.
6. Для каждого инструмента существуют общие закономерности в развитии гармоник звукового объекта независимо от высоты тона и интенсивности возбуждения.

Поскольку мы предполагаем, что все обертоны сигнала, поведение которых мы будем изучать, являются гармониками, исследование и названо «исследование гармонической структуры звуковых объектов». Структура любого объекта — это взаимосвязи составляющих его элементов. Мы будем исследовать поведение и взаимосвязь элементов звуковых объектов.

Исследование каждого звукового объекта разобьём на следующие этапы:

1. определение ориентировочной продолжительности периода сигнала;
2. разбиение всего звукового объекта на непересекающиеся фрагменты, соответствующие отдельным периодам;
3. для каждого периода выполним разложение в гармонический ряд Фурье на длительности этого периода (количество членов ряда обсудим ниже);
4. средние значения амплитуды и фазы гармоник сигнала на данном периоде примем равными амплитудам и фазам коэффициентов комплексной формы полученного ряда Фурье.

В итоге мы получим набор значений амплитуд и фаз гармоник на каждом периоде сигнала, зная при этом точное значение длительности каждого периода. Введём следующее понятие, которым нам будет легче оперировать:

назовём зависимость амплитуды (фазы) гармоники от времени *траекторией амплитуды (фазы)*.

Мы определяем лишь среднее значение амплитуд и фаз гармоник для каждого периода (функция, дискретная по времени), поэтому в нашем случае под траекторией амплитуды (фазы) гармоники будем понимать зависимость среднего значения амплитуды (фазы) на периоде от номера периода. По аналогии траекторией периода основного тона будем называть зависимость длительности периода сигнала от номера периода.

Вычислив траектории амплитуд и фаз гармоник и выполнив их графическое изображение, приступим к их анализу:

1. выявим особенности траекторий гармоник для каждого инструмента, высоты тона и способа извлечения звука (особенности убывания, флуктуаций).
2. выявим схожие черты траекторий для каждого инструмента независимо от высоты тона и способа извлечения, а также различия в траекториях амплитуд и фаз гармоник и разных инструментов;
3. выявим степень корреляции траекторий амплитуд гармоник как случайных функций времени;
4. попытаемся установить связь между способом извлечения звука на данном инструменте и особенностями развёртывания гармонических составляющих извлечённых звуков;
5. попытаемся установить связь между особенностями траекторий амплитуд и фаз гармоник и субъективным ощущением тембра.

На основе проведённого анализа опишем модель звукового объекта.

Инструменты исследования

Исследование проведено с помощью персонального компьютера. В качестве звукового материала взяты сэмплы — фрагменты звучания реальных музыкальных инструментов, используемые для т.н. волнового синтеза (Wavetable synthesis). Все исследуемые сэмплы удовлетворяют нашему определению звукового объекта. Для анализа они представлены в цифровом формате записи RIFF WAVE. Частота дискретизации для большинства фрагментов 44100 Гц, квантование — 16-битное.

Для решения поставленных задач необходимо одновременное использование нескольких прикладных программ, обработка данных анализа и их графическое представление — трудоёмкая рутинная работа, поэтому для удобства работы и сокращения количества рутинных операций было решено разработать программное обеспечение, которое объединило бы в себе все необходимые для решения наших задач функции. Разработанное ПО снабжено пользовательским интерфейсом и выполняет следующие операции: чтение файлов формата RIFF WAVE, определение периода фрагмента сигнала, разложение в комплексный ряд Фурье, формирование траекторий амплитуд и фаз гармоник, их графическое отображение и сохранение в

файл. Кроме того, сохраняется текстовый отчёт о параметрах исследуемого сигнала и результатах анализа.

Определение периода сигнала выполняется комбинированным методом:

1. вычисляется кратковременная автокорреляционная функция сигнала и определяется положение её максимума T_0 ;
2. вычисляется дискретное преобразование Фурье на длительности $2T_0$, вычисляется амплитудный спектр;
3. определяется положение максимумов полученного амплитудного спектра и находится наименьший общий делитель F' частот, соответствующих этим максимумам;
4. за период сигнала принимается значение $T=1/F'$.

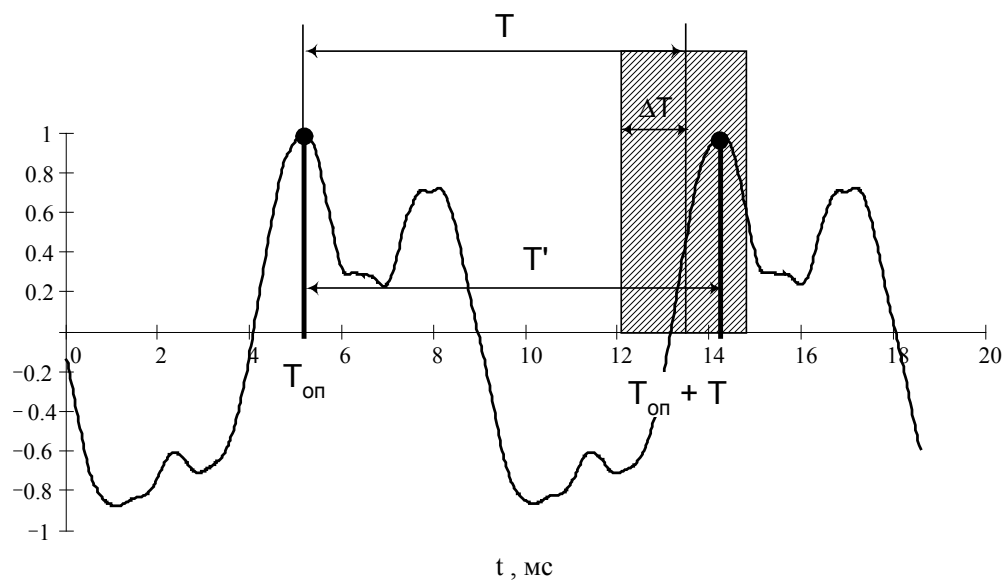


Рисунок 1. Разметка на периоды по максимумам

Следующей стадией является разметка сигнала на периоды. Разметка может производиться по выбору пользователя двумя способами: по нулям и по максимумам.

При разметке по максимумам за длительность периода сигнала условно принимается расстояние между двумя локальными максимумами сигнала, отстоящими друг от друга на расстояние $T \pm \tau$ (T – среднее значение периода, найденное описанным выше способом). Для разметки находится наибольший локальный максимум сигнала – опорный (его положение по времени $T_{оп}$), положение следующего максимума определяется поиском в интервале $[T_{оп} + T - \Delta t, T_{оп} + T + \Delta t]$ локального мак-

симума. Величину Δt устанавливает пользователь. Положение остальных максимумов находится аналогично: последовательно удаляясь от наибольшего максимума в обе стороны. Алгоритм разметки по максимумам поясняется рисунком 1. За длительность данного периода принимается величина T' .

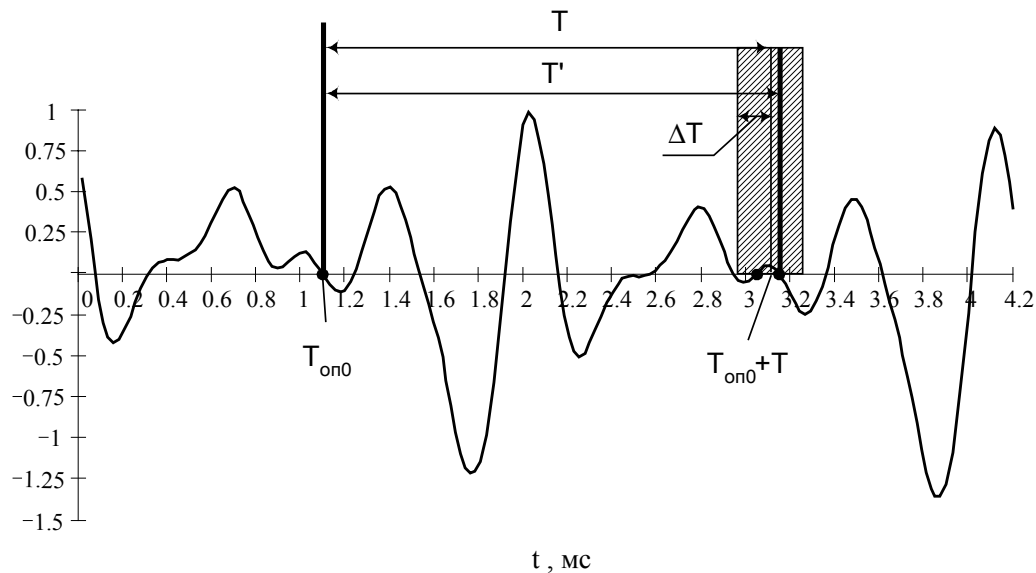


Рисунок 2. Разметка на периоды по нулям

При разметке по нулям за длительность периода условно принимается расстояние между двумя нулевыми значениями сигнала, находящимися на расстоянии $T \pm \tau$. Для разметки находится ближайшее к наибольшему локальному максимуму нулевое значение (или переход через ноль) — опорное (его положение по времени $T_{\text{оп0}}$). Положение следующего нулевого значения (перехода через ноль) определяется поиском в интервале $[T_{\text{оп0}} + T - \Delta t, T_{\text{оп0}} + T + \Delta t]$ такого значения сигнала, для которого выполняются два условия:

1. значение сигнала точно или приблизительно равно опорному значению;
2. совпадают знаки производной сигнала в данной и в опорной точках.

Такой сложный алгоритм необходим из-за того, что сигнал не обязательно примет нулевое значение в интервале $[T_{\text{оп}} + T - \Delta t, T_{\text{оп}} + T + \Delta t]$, поскольку форма сигнала меняется от периода к периоду из-за изменения соотношению фаз и амплитуд гармоник. Кроме того, возможно два и более перехода через ноль в интервале $[T_{\text{оп}} + T - \Delta t, T_{\text{оп}} + T + \Delta t]$, тогда мы должны выбрать ту точку, в которой совпадает знак производной со знаком производной в опорной точке. Алгоритм иллюстрируется рисунком 2.

После разметки сигнала на периоды мы точно знаем временные границы каждого периода, а значит, и длительность каждого периода, т.е. уже можем составить траекторию периода сигнала.

Позиции (номера) граничных отсчётов каждого периода хранятся в памяти, пользуясь ими, мы считываем из входного файла массив отсчётов, соответствующих одному полному периоду и выполняем дискретное преобразование Фурье **на длительности данного периода**. Взвешивание отсчётов (наложение временного окна) не производится. В этом нет необходимости, т.к. каждый период ограничен с обеих сторон примерно равными значениями. Количество членов ряда Фурье, т.е. принимаемых в расчёт гармоник может принимать по выбору пользователя значения от 1 до 20. По коэффициентам разложения вычисляются значения амплитуд и фаз гармоник на данном периоде. Усреднённые по всем периодам значения амплитуд и фаз гармоник составят *усреднённый спектр* звукового объекта.

Не составляет труда упорядочить определённым образом данные спектрального анализа для получения траекторий амплитуд и фаз гармоник. Они отображаются на экране и по желанию могут быть сохранены в файл.

Для измерения статистической зависимости траекторий амплитуд гармоник как функций времени вычисляется матрица коэффициентов корреляции совокупности случайных величин, составленных всеми траекториями. Элемент матрицы R_{ij} равен коэффициенту корреляции траекторий i -той и j -той траекторий. Коэффициент корреляции R_{ij} вычисляется следующим образом:

$$R_{ij} = \frac{\sum_{k=0}^{N-1} (A_k^{(i)} - a^{(i)}) \cdot (A_k^{(j)} - a^{(j)})}{\sigma_i \cdot \sigma_j}, \text{ где}$$

$A_k^{(i)}$ — k -тое значение траектории амплитуды i -той гармоники;

$a^{(i)}$ — среднее значение траектории амплитуды i -той гармоники;

σ_i — дисперсия траектории амплитуды i -той гармоники;

N — количество целых периодов, уложившихся на длительности данного звукового объекта.

В текстовом отчёте выводятся сведения о входном звуковом файле (частота дискретизации, число разрядов квантования, длительность) и сведения о звуковом объ-

екте (средняя длительность периода, соответствующая ей высота основного тона, матрица коэффициентов корреляции, таблица амплитуд и фаз усреднённого спектра звукового объекта).

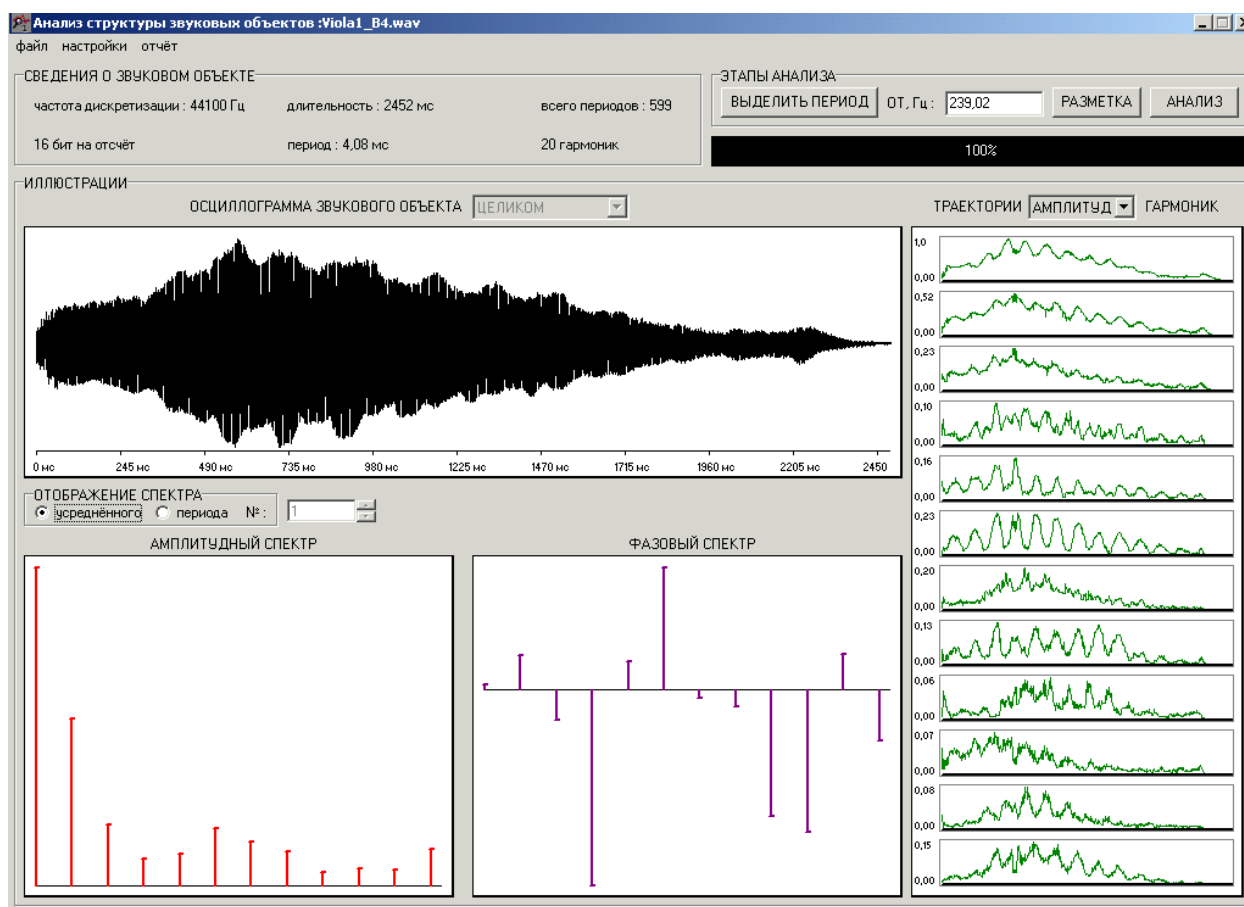


Рисунок 3 Рабочее окно программы для анализа структуры звуковых объектов

• Результаты исследования

Как следует понимать результаты анализа?

Естественен вопрос об адекватности результатов анализа, иначе говоря, об их соответствии реальным процессам звуковых колебаний. Дискретное преобразование Фурье — это тригонометрическая интерполяция временного ряда. Рассмотрение реальных звуковых колебаний периодических или квазипериодических как суммы гармонических составляющих — лишь аппроксимация, имеющая свою погрешность. Тем не менее, именно периодичность звуковых колебаний и теоретические законы, описывающие эти колебания, позволяют применять при разложении в ряд гармонический базис (набор периодических функций \sin и \cos).

Описанный выше способ анализа гармонической структуры звуковых объектов — разбиение на периоды и преобразование Фурье каждого периода — при работе с цифровым сигналом имеет свои погрешности. Положение локальных максимумов или переходов через ноль не точно определяет изменение длительности периода. Кроме того, дискретизация по времени вносит погрешность в определение положения максимума или перехода через ноль. Это особенно существенно для высших гармоник, поскольку с уменьшением периода функции при неизменном интервале дискретизации увеличивается относительная погрешность определения положения её максимумов.

Результатом воздействий этих факторов является «зашумлённость» траекторий амплитуд и фаз гармоник. В траекториях фаз гармоник появляются скачки. «Негармоничность» звуковых колебаний, т.е. отклонение частот гармоник от значений, кратных основному тону, также вносит свою погрешность — линейный рост со временем фазы коэффициента ряда Фурье, аппроксимирующего соответствующую гармоническую составляющую. Фаза гармоник «развёрнута».

Главные комментарием к пониманию результатов анализа можно сформулировать так:

1. результаты анализа не являются фотографической копией реальности,
2. за рядом случайностей (флуктуаций и резких скачков) нужно уметь разглядеть закономерность, естественно, понимая причину появления этих «случайностей».

Классификация музыкальных инструментов

Прежде всего, полученные результаты позволяют предложить *альтернативную классификацию* музыкальных инструментов. В основе предлагаемой классификации лежит тип колебаний звукопорождающего тела. На следующем уровне классификация происходит по форме или материалу звукопорождающего тела. Будем различать два типа колебаний:

1. **Свободные колебания** — имеет место кратковременное поступление энергии в систему и затухание колебание, вызванное всевозможными потерями.

2. **Вынужденные колебания (Автоколебания)** — источник энергии «подкачивает» колебательную систему, компенсируя потери. Автоколебания — частный случай вынужденных колебаний. Автоколебательная система включает 4 элемента:

- a) источник энергии;
- b) клапан, регулирующий поступление энергии в колебательную систему;
- c) колебательная система;
- d) цепь обратной связи (между колебательной системы и клапаном).

Схема автоколебательной системы представлена на рисунке 2.

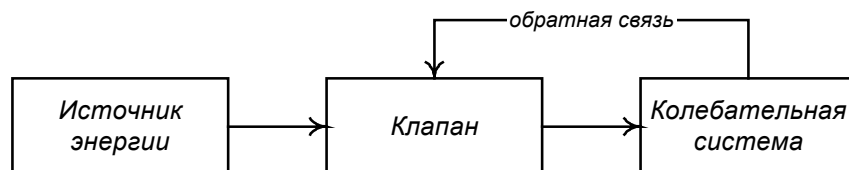


Рисунок 4 Автоколебательная система

Одна из особенностей автоколебаний в отличие от общего случая вынужденных колебаний состоит в том, что

поступление энергии в колебательную систему не идёт непрерывно, оно регулируется клапаном, в свою очередь управляемым колебательной системой.

По мнению автора, именно такая классификация наиболее удобна при решении задач узнавания тембра человеком, т.е. определения звучащего инструмента. Каждый человек, даже не имеющий музыкального образования и не знающий названий всех музыкальных инструментов, способен отделить колебания затухающие от вынужденных. Каждый человек определённо скажет, колеблется струна или металлическая пластинка.

Усилив эти утверждения, предполагается, что мозг, распознавая звучащий инструмент, опирается на возникающее представление о колеблющемся теле, происходящими с ним процессами и действиях исполнителя. У каждого из нас, когда мы слышим незнакомый или малознакомый звук в первую очередь возникают ассоциации вроде «чем-то ударили по чему-то», «кто-то дует», «дёрнули струну», «что-то разбилось», «что-то упало». Возможно, это и есть первая стадия распознавания источника звука. Большинство звуков возникает в результате взаимодействия как минимум двух тел, поэтому следующим этапом распознавания являются догадки о том, «что и куда упало», «чем и по чему ударили», «что дёрнули». Обычный человек уз-

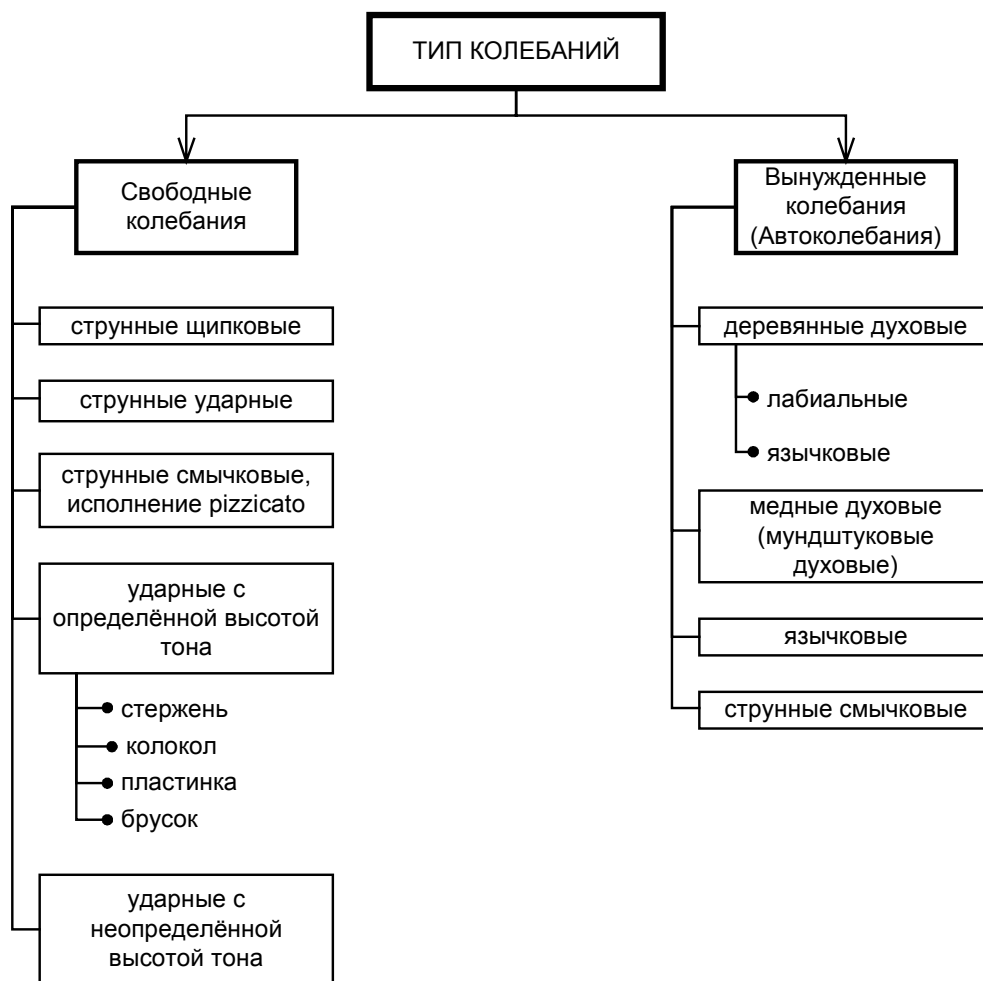


Рисунок 5 Классификация музыкальных инструментов по типу колебаний

наёт ограниченный набор инструментов и классов инструментов, но далеко не все отличат флейту от кларнета или гобоя. А деревянную флейту от металлической?

Возвращаясь к классификации типов колебаний, естественно, необходимо указать, какие инструменты к какому классу относятся.

Очевидно, к инструментам с затухающими колебаниями относятся все струнные щипковые и все струнные ударные инструмента. Общая часть колебательной системы, узнаваемая любым человеком, — струна (или система струн, как, например в фортепиано). Щипок или удар плектром, удар молоточка — кратковременный «впрыск» энергии в систему, после чего колебания затухают. Затухающими являются и колебания во всех ударных инструментах. Это и очевидно: звуки ударных носят импульсный шумовой характер. Различие в ударных инструментах заключается в материале и форме звукопорождающего тела: металлические или деревянные пластинки, кожаная мембрана или металлическая тарелка.

Более подробно следует остановиться на музыкальных инструментах, представляющих собой автоколебательные системы. Естественно, слышимых признаков, позволяющих классифицировать колебания именно как автоколебания, нет. Но вынужденный характер колебаний всегда очевиден: звучание продолжается ровно столько, сколько исполнитель ведёт смычком по струне, дует в мундштук духового инструмента, сжимает или раздвигает меха аккордеона. И ещё одна важная особенность, к которой мы вернёмся ниже, — звуковой образ более стабилен, параметры колебаний остаются практически неизменными на всей стадии существования звукового объекта.

К музыкальным инструментам с вынужденными колебаниями относятся все духовые инструменты, струнные смычковые, а также язычковые инструменты (гармония, аккордеон, баян). Что же особенного в этих инструментах? Случай язычковых инструментов наиболее сложен, его описание заняло бы слишком много места, поэтому перейдём к смычковым и духовым инструментам.

Струнные смычковые. Прежде всего, определим элементы автоколебательной системы: источник энергии, очевидно, — исполнитель, колебательная система — струна, роль клапана играет механизм сцепления струны и смычка, механизм обратной связи состоит в том, что упругость струны в определённом её положении расцепляет струну и смычок. При ведении смычком первоначально происходит сцепление. Совместное движение смычка и струны длится до тех пор, пока упругость струны, действующая в сторону, противоположную движению смычка, не заставит расцепиться смычок и струну. Некоторое время струна предоставлена сама себе, т.е. поступление энергии в колебательную систему не происходит. Далее та же упругость струны заставляет её двигаться в обратную сторону (при достижении максимального смещения — амплитуды колебаний струны). Струны также свободно движется до нового сцепления со смычком и начинается новый цикл колебаний. Определяющей в такой системе является струна, т.е. в установившемся режиме частота колебаний струны совпадает с её собственной частотой. Длительность переходного процесса определяется временем от касания смычка до того момента, когда интервал времени между сцеплениями смычка и струны станет равным периоду колебаний свободной струны.

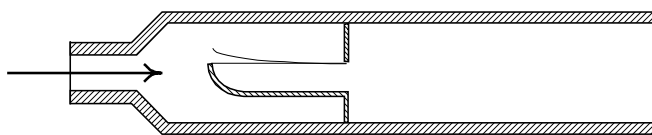


Рис. 1 Язычковый духовой инструмент

Духовые язычковые инструменты. Источник энергии — лёгкие исполнителя. Колебательная система — столб воздуха в «теле» инструмента. Роль клапана играет язычок. Механизм обратной связи состоит в следующем: от разности давлений по обеим сторонам язычка (со стороны рта исполнителя и со стороны колеблющегося столба воздуха) зависит пропускает язычок сжатый воздух из рта или не пропускает. Таким образом, сжатый воздух поступает в «тело» инструмента порциями, а не постоянно. Кстати, собственная частота язычка много меньше частоты колебаний столба воздуха: задающей системой является столб воздуха, т.е. частота колебаний определяется его длиной, а язычок специально делается мягким, чтобы он мог выполнять функции клапана. Импульсы сжатого воздуха, распространяясь по трубе, отражаются от её конца. Конец трубы открыт, поэтому импульс сжатия превращается в импульс разрежения, когда импульс разрежения дойдёт до клапана, то клапан не откроется, т.к. давление снаружи больше. Пройдя опять весь путь по трубе, отразившись от открытого конца и, импульс сжатия превращается уже в импульс разрежения, и когда он вновь достигнет клапана, язычок откроется, впуская новую партию сжатого воздуха.

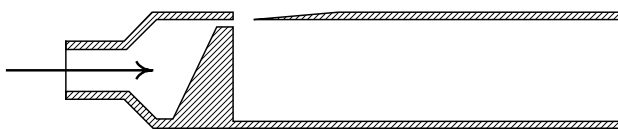


Рис. 2 Лабиальный духовой инструмент

Духовые лабиальные инструменты. Сжатый воздух поступает в камеру (см. рисунок 5), выходное отверстие которой имеет форму узкой щели.

Струю воздуха из этой щели попадает на клиновидно скошенную часть стенки трубы. Случай открытой трубы: импульс сжатия при отражении от конца трубы превращается в импульс разрежения, когда он приходит к щели из-за избыточного внешнего давления струю воздуха из щели отклоняется внутрь и создаёт повышенное давление, в результате новый импульс сжатия побежит по трубе. Период колебаний равен удвоенному времени пробега по трубе. Случай закрытой трубы: импульс сжатия, отразившись от закрытого конца, возвращается опять же в виде импульса сжатия и отклоняет струю из щели наружу, т.е. начало трубы открыто и импульс сжатия, отразившись от него, превращается в импульс разрежения; пробежав по трубе туда и обратно без изменения, он приходит к началу трубы в виде импуль-

са сжатия, струя из щели снова втягивается внутрь, и начинается новый цикл. Период колебаний равен учетверённому времени пробега импульса по трубе. Таким образом, основной тон трубы, закрытой с одного конца, вдвое ниже, чем у трубы той же длины, открытой с обоих концов.

Духовые мундштуковые инструменты. Роль клапана играют губы исполнителя. Процессы, происходящие в теле инструмента те же, что в духовых лабиальных инструментах. Разница состоит в форме импульсов возбуждения: в медных духовых импульсы короче, а значит и спектр их шире. Поэтому тембр медных духовых богаче, чем у деревянных духовых и при этом обладает своеобразием: медный духовой инструмент на слух всегда можно отличить от деревянного при прочих равных условиях.

Подробное описание колебательных процессов в музыкальных инструментах взято из [4]. Увы, книга издана в 1954 году и далеко не каждому доступна, в других изданиях, известных автору, в том числе посвящённых музыкальным инструментам, природа колебаний, например, в трубах раскрыта не так полно.

Гармоничность музыкальных звуков

Под гармоничностью будем понимать совпадение частот гармоник со значениями, кратными частоте основного тона. По сути, строгая гармоничность должна означать стабильность периода сложных колебаний (сумма периодических функций есть функция периодическая), негармоничность — напротив, отклонения и хаотические изменения периода. Мы обсудим гармоничность колебаний в музыкальных инструментах в свете всего вышесказанного относительно природы звукообразования, а также в свете полученных результатов исследования гармонической структуры колебаний.

По каким признакам можно судить о гармоничности сложного колебания? Мы имеем в распоряжении результаты исследования: траектории амплитуд и фаз гармоник, а также траекторию периода. Траектория периода характеризует колебание в целом, траектория же фаз — отдельные составляющие. Воспользуемся известным соотношением, связывающим мгновенную фазу и частоту модулированного гармонического колебания:

$$\frac{d\varphi(t)}{dt} = \omega(t) .$$

В частном случае: $\varphi(t) = 2\pi \cdot F \cdot t + \Delta\varphi(t) \Rightarrow \omega(t) = 2\pi \cdot F + \frac{d\Delta\varphi(t)}{dt}$

Траектория периода даёт нам зависимость $F(t)$, траектория фаз — $\Delta\varphi(t)$ для любой гармоники. Изначально мы предполагаем, что частота k -той гармоники примерно равна kF_0 (F_0 — частота основного тона). Поправку к частоте мы можем определить, вычислив производную $\frac{d\Delta\varphi(t)}{dt}$. Иными словами, анализируя соотношение фаз высших гармоник и основной гармоники, мы можем определить и соотношение их частот. Так, если имеет место линейное по времени увеличение фазы какой-либо гармоники относительно первой (на каждом периоде накапливается фиксированное опережение фазы первой гармоники), это означает, что частота данной гармоники (обозначим её номер через n) равна nF_0 плюс фиксированное $\frac{d\Delta\varphi(t)}{dt} = \Delta F$. Естественно, линейный рост разности фаз гармоник — идеальный случай, на деле зависимость сложнее, но пример важен для правильного понимания тенденций поведения фаз отдельных гармоник.

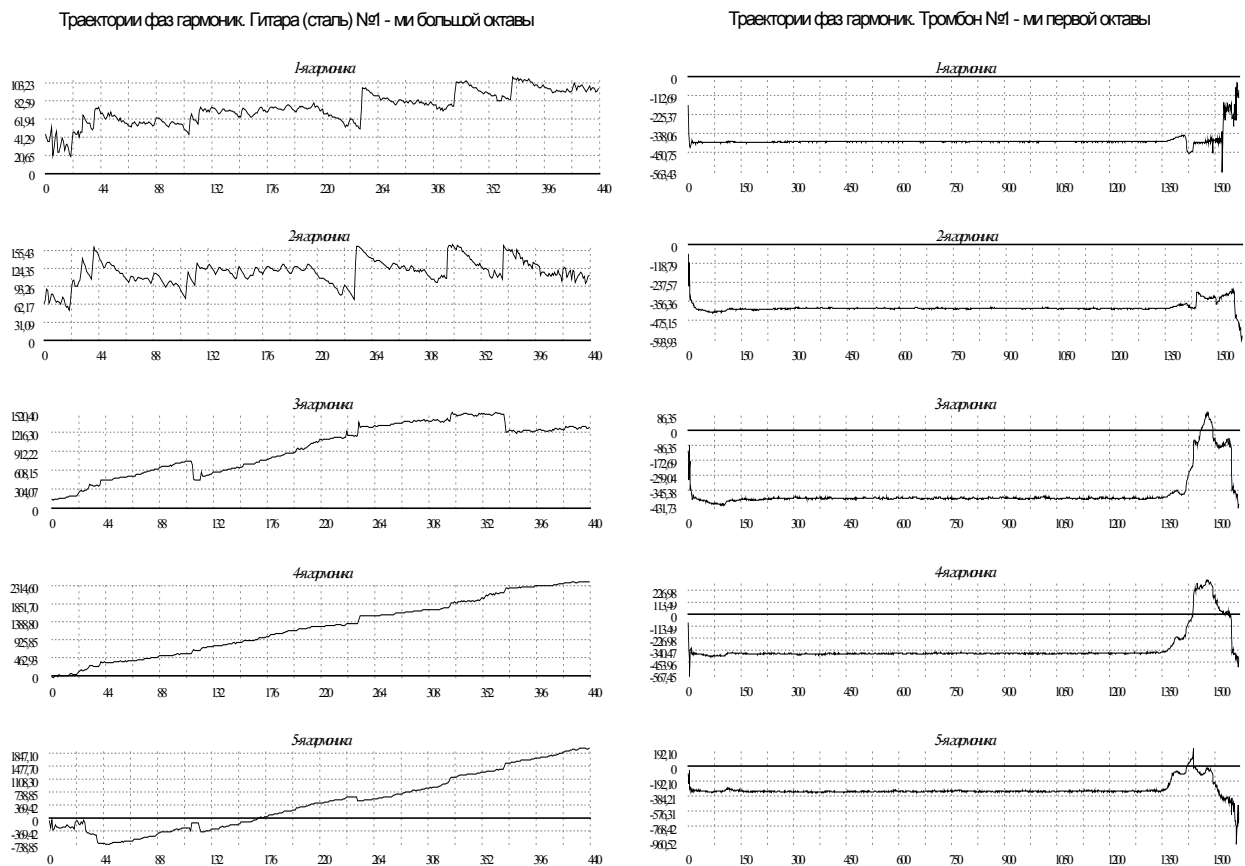


Рисунок 6 Траектории фаз гармоник колебаний гитары(слева) и тромбона(справа)

Результаты исследования показали, что колебания в духовых музыкальных инструментах более гармоничны, чем в струнных щипковых (гитара и мандолина) и струнных ударных (фортепиано). Наиболее гармоничными (в том смысле, в котором мы договорились понимать это слово) являются колебания в медных духовых (в проведённом исследовании — тромбон и труба). Есть основания усилить это утверждение и предположить, что вынужденные колебания в музыкальных инструментах более гармоничны, чем свободные затухающие колебания.

На рисунке 6 приведены траектории фаз первых пяти гармоник гитары и тромбона для колебания, соответствующего ми первой октавы. По оси абсцисс отложен номер периода (фактически, время), по оси ординат — фаза в градусах. На траекториях тромбона легко выделить установившуюся стадию и нестационарные стадии установления и затухания колебаний (конечный «горб» траекторий). Необходимо отметить, что траектории фаз могут и не отражать «фотографически» реального положения дел из-за неточности и погрешностей разбиения на периоды. В данном случае для нас важна тенденция изменений именно *соотношения фаз*, но не каждой фазы по отдельности.

Для колебаний гитары характерно следующее: траектория фазы второй гармоники практически совпадает с траекторией первой гармоники (лишь в данном конкретном случае), остальные гармоники (что характерно для всех высот тонов) опережают по фазе первую гармонику и это опережение со временем накапливается. Очевидно, это свидетельство того, что частоты высших гармоник отклоняются от значений, кратных частоте основного тона.

В колебаниях тромбона (как и в колебаниях трубы и, видимо, во всех медных) наблюдается принципиально иная картина: после установления колебаний соотношение фаз гармоник не изменяется, фазы гармоник практически постоянны на всей длительности стадии установившихся колебаний. Вывод из этого следующий: частоты гармоник с большой точностью кратны частоте основного тона, фазы колебаний стабильны (об амплитудах поговорим ниже).

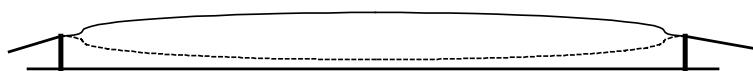


Рисунок 7 Струна гитары (схематично)

Давайте попытаемся объяснить такую разницу происходящих процессов. Одну из

причин негармоничности колебаний струны (реальной: из реальных материалов, с

обмоткой, в случае, например, гитары) автор склонен видеть в краевых эффектах. Обратимся к рисунку 7. На нём утрированно изображена струна гитары, лежащая на верхнем и нижнем порожках. Граничные условия в местах соприкосновения с порожками требуют, чтобы струна в этих точках была параллельна грифу. Выражаясь проще, при колебаниях струна не может иметь крутого излома на краю порожка, имеется плавный переход от части струны, расположенной параллельно грифу к изгибающейся части. В случае струны с обмоткой канитель также препятствует изгибу струны. В струнах без обмотки, а тем более в нейлоновых струнах подобный эффект менее значителен. Амплитуда колебаний фрагментов струны спадает от середины к краям, в результате, краевые участки струны практически не участвуют в колебаниях. Очевидно, что соотношение длин участков, участвующих и не участвующих в колебаниях определяется, в частности, амплитудой возбуждения. Т.е. «слабая» гармоника имеет меньшую полезную длину для колебаний. Амплитуда гармоник с частотой убывает, соответственно убывает и длина волны колебания, а меньшей длине волны соответствует большая частота. Т.е. с повышением номера гармоники закономерно увеличивается отклонение её частоты от значения, кратного основному тону.

Есть и ещё одно соображение, связанное с негармоничностью колебаний струны. Частота её колебаний прямо пропорциональна натяжению и обратно пропорциональна длине. В процессе колебаний струна удлиняется, что приводит к увеличению натяжения: сила упругости стремится вернуть струну в состояние равновесия. Для колебаний первой гармоники это не столь существенно — натяжение изменяется синхронно с колебаниями струны. Но колебания остальных гармоник происходят на той же самой струне. Колебания, например, пятой гармоники за один цикл колебаний первой гармоники совершают 5 своих циклов. Т.е. колебания высших гармоник происходят при натяжении, по крайней мере, отличном от натяжения для первой гармоники (сложно точно говорить о распределении натяжения по струне). В любом случае, это ещё один фактор, изменяющий частоту гармоник, т.е. отклоняющий их от значений, кратных основному тону.

С другой стороны, в колебаниях струнных смычковых, эффект негармоничности, согласно полученным автором данных, проявляется меньше. Поэтому, есть ос-

нования считать, что основным фактором, определяющим гармоничность колебания, является характер колебаний — вынужденный или свободный.

Разница, в частности, в том, что в случае свободных колебаний начальными условиями для каждого последующего цикла колебаний являются условия завершения предыдущего цикла, в случае же вынужденных колебаний (а точнее — автоколебаний) начальные условия каждого полного цикла колебаний практически неизменны в установившемся режиме. Как мы уже говорили, определяющим узлом в автоколебательной системе является колебательная система, т.е. стабильность, в частности, частоты колебаний определяется, прежде всего, стабильностью её параметров. Очевидно, что параметры тех же духовых инструментов (например, геометрические размеры) можно считать идеально стабильными на длительности огромного числа периодов колебаний. В случае же свободных колебаний колебательная система предоставлена сама себе и, будучи выведенной из равновесия, случайным образом стремится вернуться в это состояние.

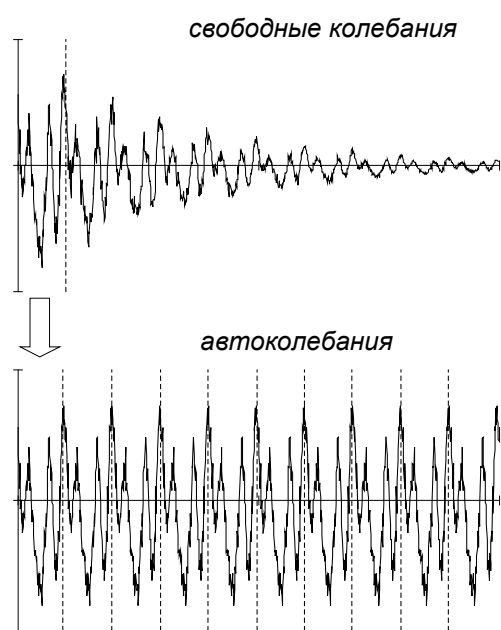


Рисунок 8 Сравнение свободных колебаний и автоколебаний

первый, начальный цикл свободных колебаний, остальная часть «откусывается», т.к. в систему поступает новая порция энергии, и все процессы повторяются по одному и тому же сценарию (см. рис. 8).

Таким образом, очевидны факторы, определяющие стабильность автоколебаний: это, во-первых, стабильность параметров колебательной системы и, во-вторых,

Колебательные системы музыкальных инструментов со свободными колебаниями обладают много меньшими потерями, чем инструменты с автоколебаниями. И это естественно: это необходимо для увеличения длительности (кроме ударных, в которых, напротив, нужен короткий «взрывной» импульс) звучания. Если рассмотреть одну и ту же колебательную систему в режимах свободных и вынужденных колебаний, то, выражаясь попросту, получится, что в случае автоколебаний мы всё время повторяем

стабильность источника энергии (в случае духовых музыкальных инструментов – стабильность давления воздуха, создаваемого исполнителем).

Сделаем и ещё один важный вывод: соотношение размахов отдельных циклов колебаний в случае автоколебаний зависит от соотношения размахов импульсов возбуждения, провоцирующих данные циклы колебаний, в случае свободных колебаний размах каждого цикла колебания зависит и от потерь в системе и от распределения фаз и амплитуд гармоник, т.е. зависимость более сложная.

Стабильность автоколебаний отражается не только на траекториях фаз, но и на траекториях амплитуд. Вспомним, что одной из характеристик звукового объекта, использованной в исследовании была матрица коэффициентов корреляции траекторий амплитуд. Первоначально предполагалось, что такая матрица, по сути, индивидуальная для каждого колебания, может быть использована при опознавании звукового источника (например, для идентификации человека по голосу). Однако для нас этот параметр важен с другой точки зрения. Коэффициент корреляции выражает степень статистической связи случайных величин. В случае, если коэффициент корреляции равен нулю, мы имеем дело с двумя независимыми величинами, попросту говоря, «живущими» каждая своей жизнью. В случае если коэффициент корреляции равен 1, имеет место *функциональная* зависимость, т.е. две случайные величины связаны неслучайной закономерностью.

Теперь осмыслим реальные значения коэффициентов корреляций траекторий амплитуд для различных инструментов, полученные в исследовании. Для гитары и фортепиано значения коэффициентов корреляции распределены между 0 и 0,5, имеют место и отрицательные значения. Для деревянных духовых коэффициенты корреляции равны $0,5 \div 0,8$. У медных духовых – $0,75 \div 0,99$. Т.е. опытные данные подтверждают все наши предыдущие размышления: свободным колебаниям свойственна более слабая взаимосвязь отдельных гармонических составляющих, а для наиболее стабильных автоколебаний свойственна почти функциональная зависимость между амплитудами гармоник (коэффициент корреляции 0,99). Однако, к подобным выводам можно прийти и без помощи приведённых чисел, просто взглянув на амплитуды гармоник некоторых инструментов (рис. 9 а-д). Заодно оцените схожесть траекторий амплитуд струнных (гитары, мандолины и фортепиано) и медных духовых (трубы и тромбона).

Траектории амплитуд гармоник. Гитара (нейлон) №1 - ля большой октавы (гармоники с 1-й по 10-ю)

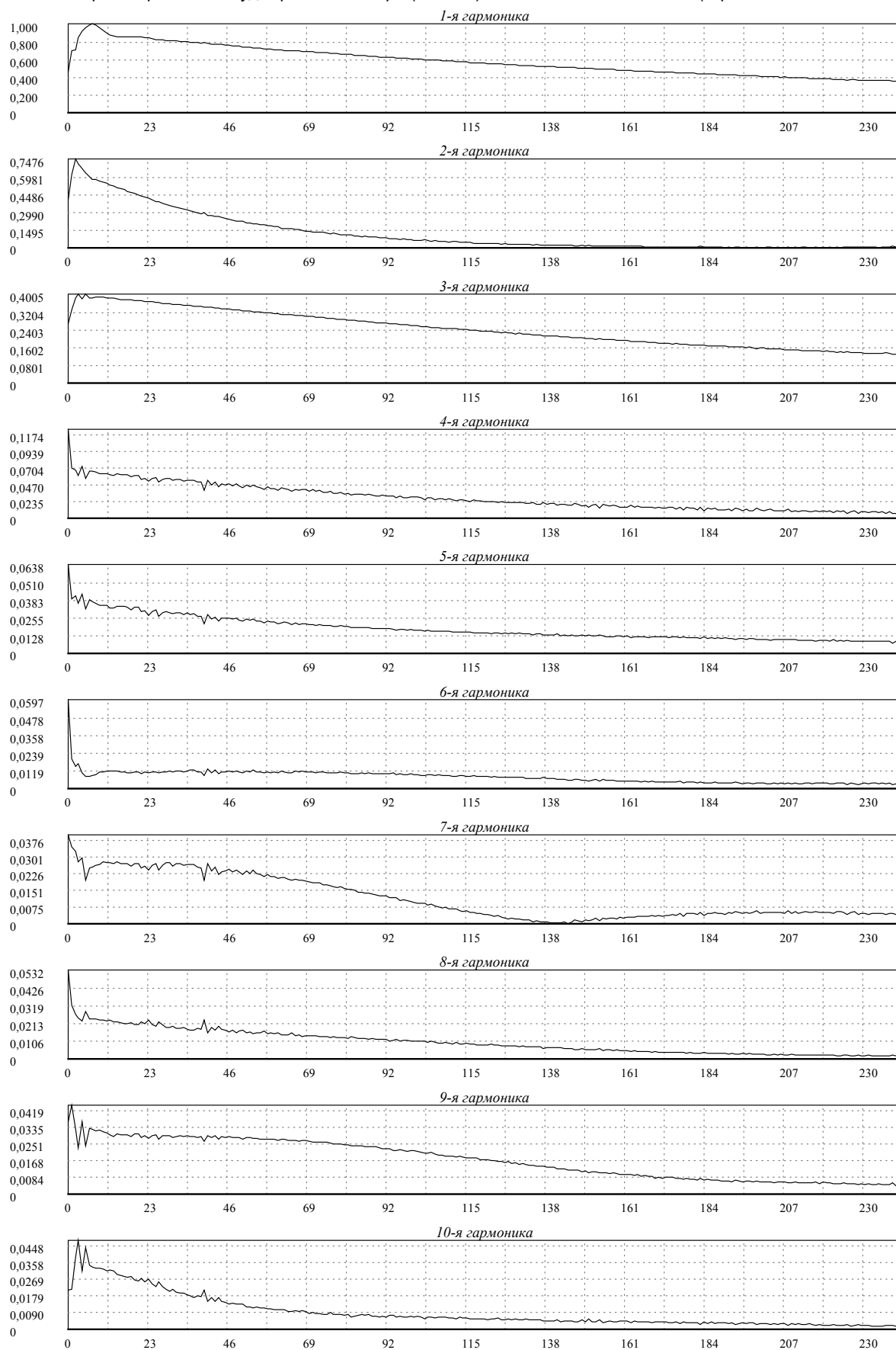


Рис. 9а

Траектории амплитуд гармоник. Мандолина №1 - ля первой октавы (гармоники с 1-й по 10-ю)

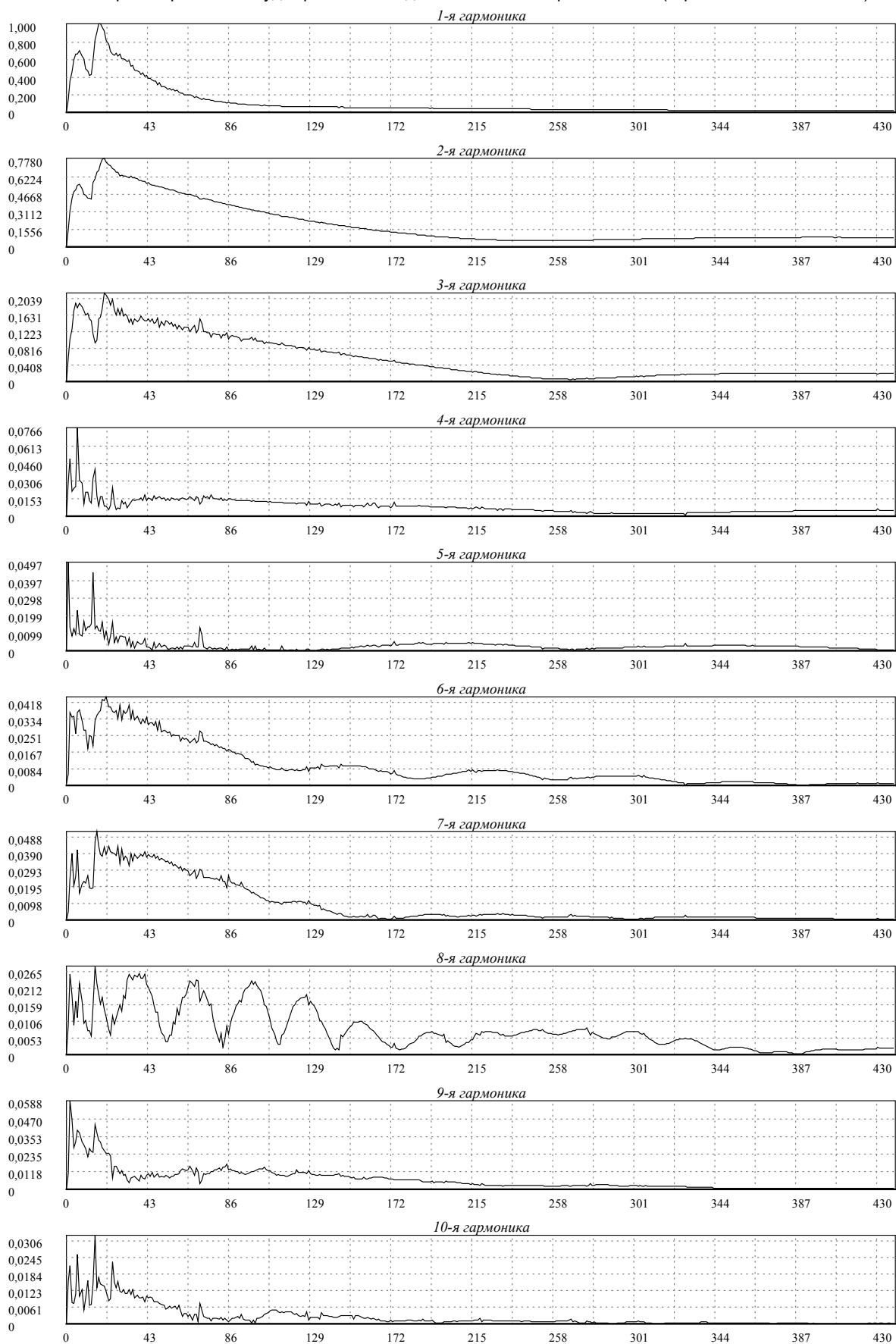


Рис. 9б

Траектории амплитуд гармоник. Фортепиано №1 - ля большой октавы (гармоники с 1-й по 10-ю)

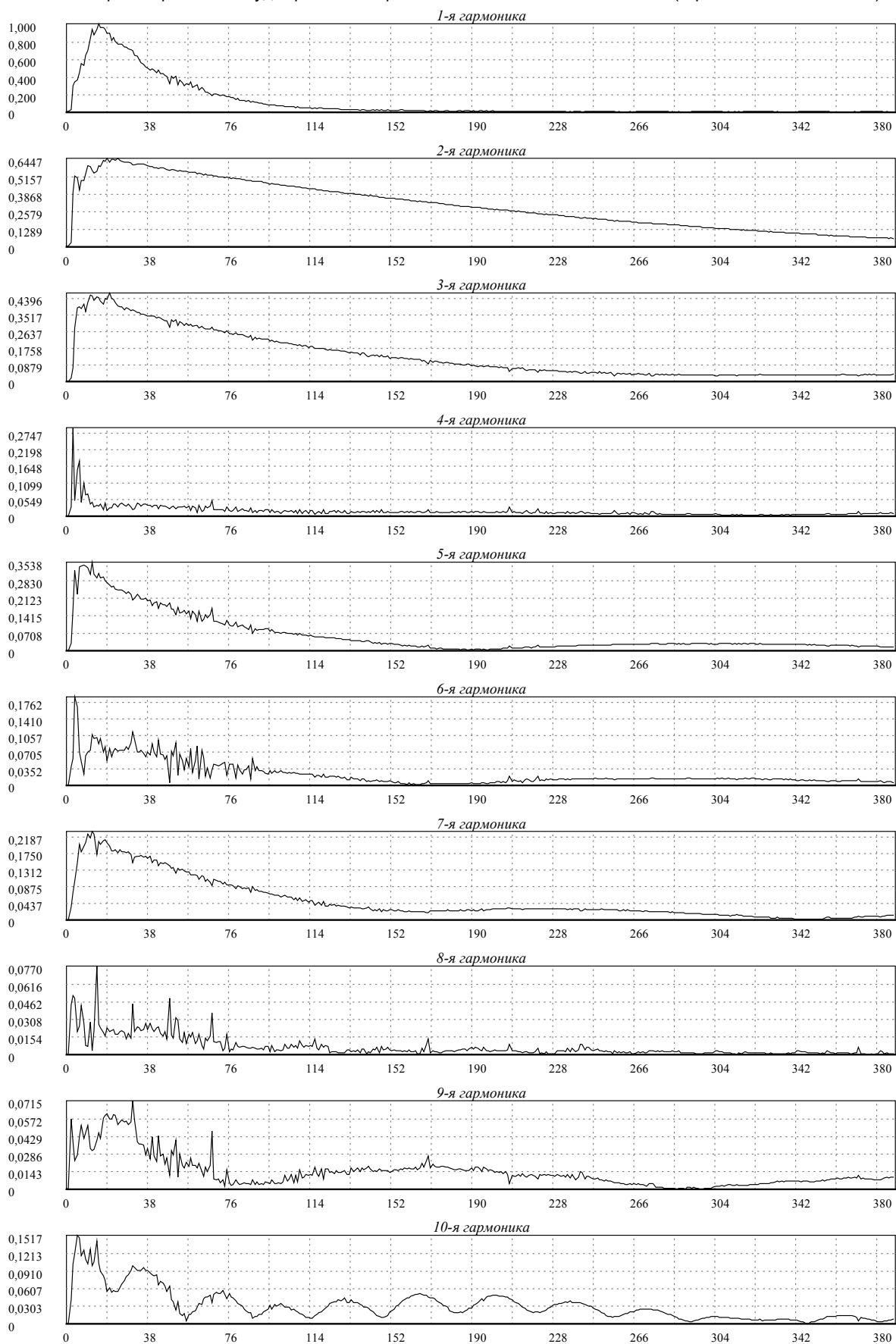


Рис. 9б

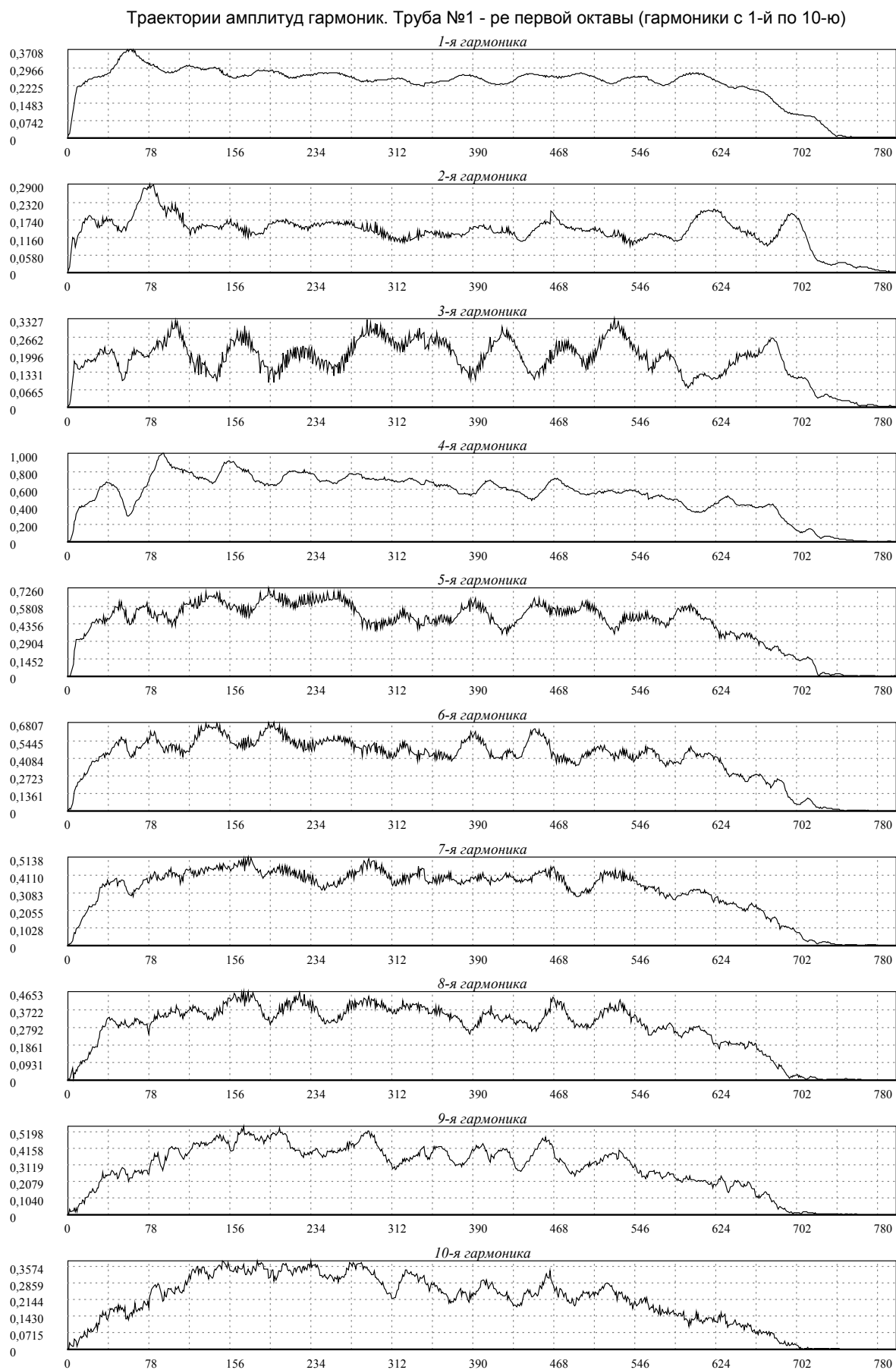


Рис. 9г

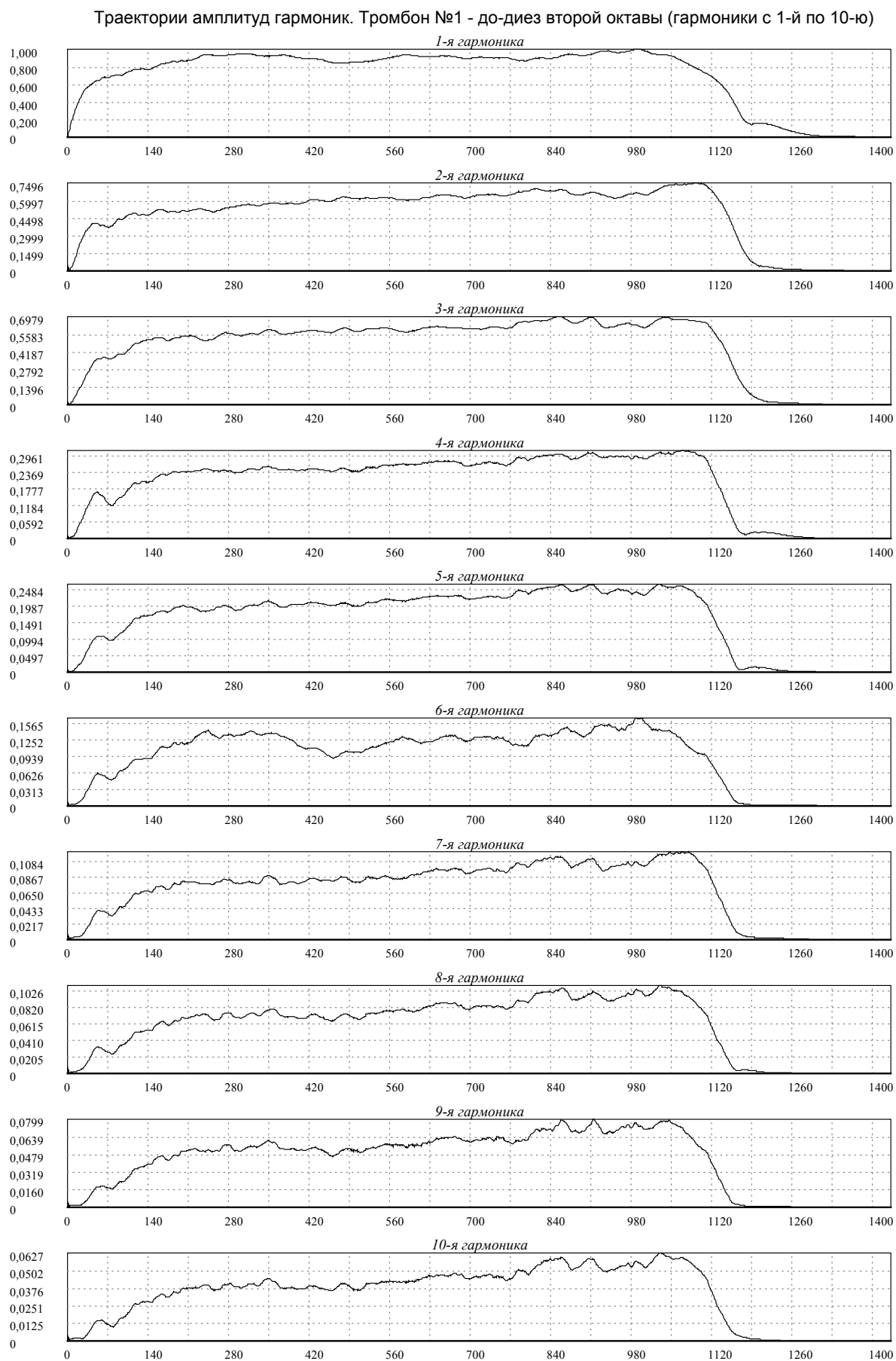


Рисунок 9 д

1. *Усреднённый амплитудный спектр колебания.* Прежде всего, поймём, как формируется амплитудный спектр звукового объекта, от чего зависит его вид. Рассмотрим случай инструмента со свободными колебаниями. Импульс возбуждения (например, щипок, удар молоточка) воздействует на колебательную систему (струну, пластинку, мембрану), механические колебания которой должны преобразоваться в акустические колебания. Иногда для этого нужен «резонатор» — например, корпус гитары. Формализуем наши рассуждения, запишем выражение для комплексного спектра результирующего звукового давления:

$$S(j\omega) = S_{\text{возб}}(j\omega) \cdot H_{\text{КС}}(j\omega) \cdot H_{\text{рез}}(j\omega) \quad (1), \text{ где}$$

$S(j\omega)$ — комплексный спектр звукового давления;

$S_{\text{возб}}(j\omega)$ — комплексный спектр функции возбуждения;

$H_{\text{КС}}(j\omega)$ — частотная характеристика колебательной системы;

$H_{\text{рез}}(j\omega)$ — частотная характеристика резонатора.

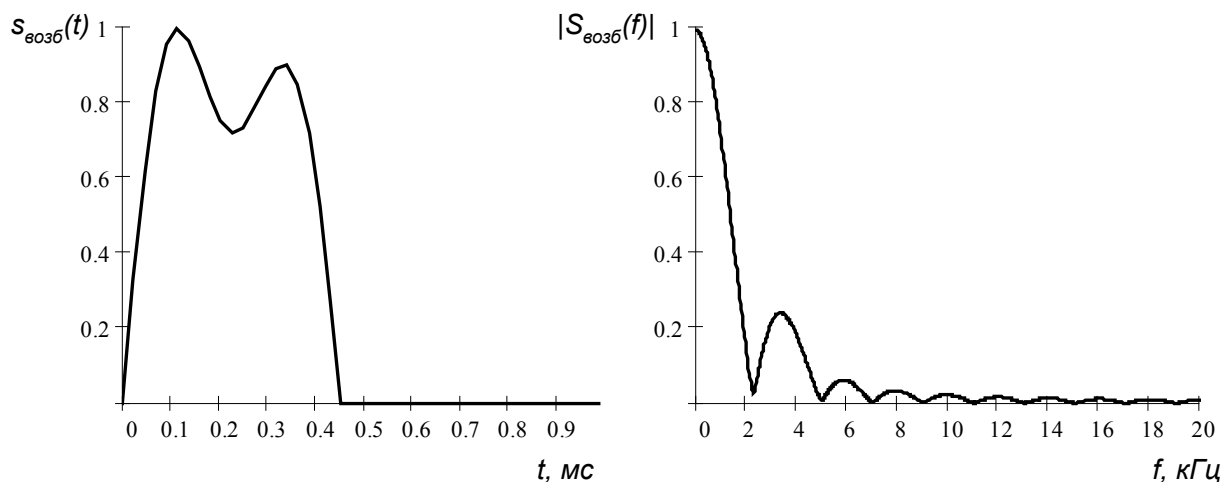


Рисунок 10 Импульс возбуждения и его амплитудный спектр

На примере некоего абстрактного инструмента представим, как поэтапно формируется амплитудный спектр звукового колебания. Для этого обратимся к рисункам 10, 11 и 12. Импульс возбуждения — непериодическая функция, спектр её сплошной. Колебательная система, как правило, имеет бесчисленное множество резонансных частот, её АЧХ имеет пики вблизи этих частот. Острота пиков определяется добротностью системы, но в любом случае важно понимать, что пики эти имеют отличную от нуля ширину: колебательная система возбуждается и на частотах,

близких к резонансным. АЧХ резонатора — это, как правило, медленно меняющаяся с частотой функция с несколькими локальными максимумами, определяющими формантные частоты звуковых колебаний.

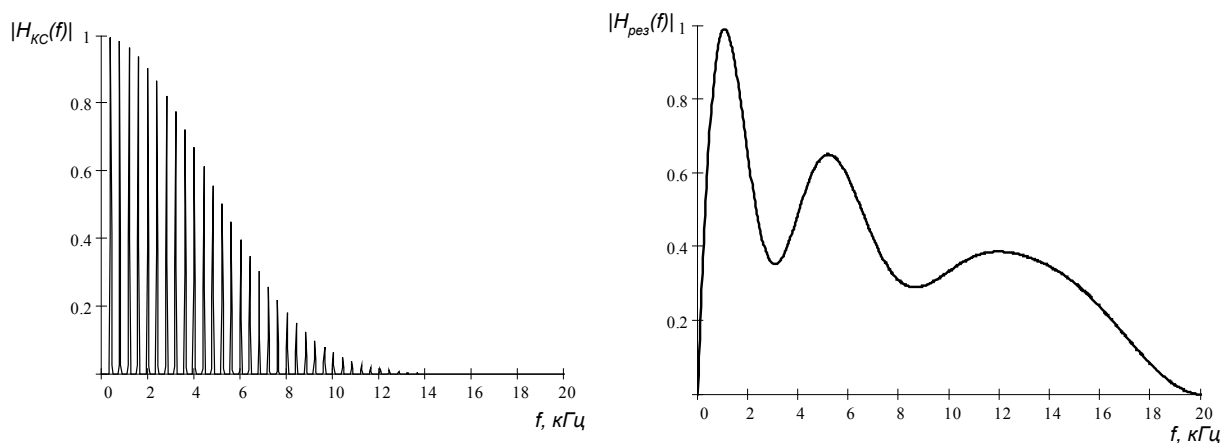


Рисунок 11 АЧХ колебательной системы и резонатора

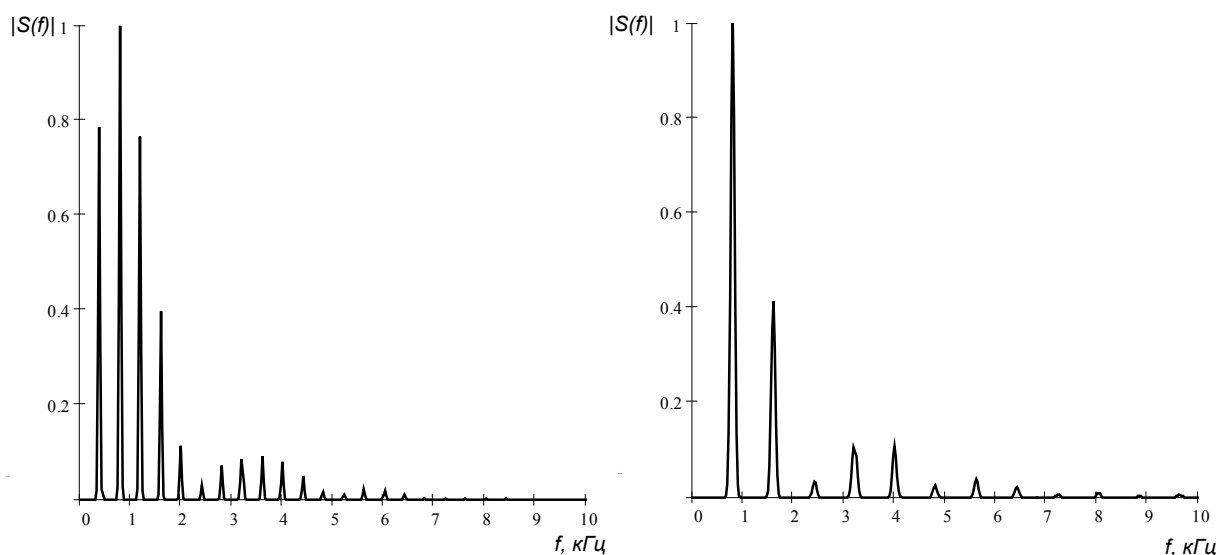


Рисунок 12 Амплитудный спектр звукового колебания

Какие из перечисленных множителей в формуле (1) постоянны и какие меняются? Очевидно, постоянными остаются параметры резонатора. Слабо меняющейся можно считать форму импульса возбуждения — меняется его размах. А вот параметры колебательной системы меняются. Большинство музыкальных инструментов способно воспроизводить звуковой ряд (в отличие от камертона). В некоторых случаях это достигается использованием набора колебательных систем, настроенных на разные частоты. Очевидно, что при неизменных АЧХ резонатора и импульсе возбуждения, возбуждая разные колебательные системы, получим колебания с совершен-

но различными амплитудными спектрами, при этом звучать они будут похоже. На рисунке 12 изображены спектры колебаний двух колебательных систем, чьи собственные частоты отличаются вдвое, резонатор и импульс возбуждения один и тот же.

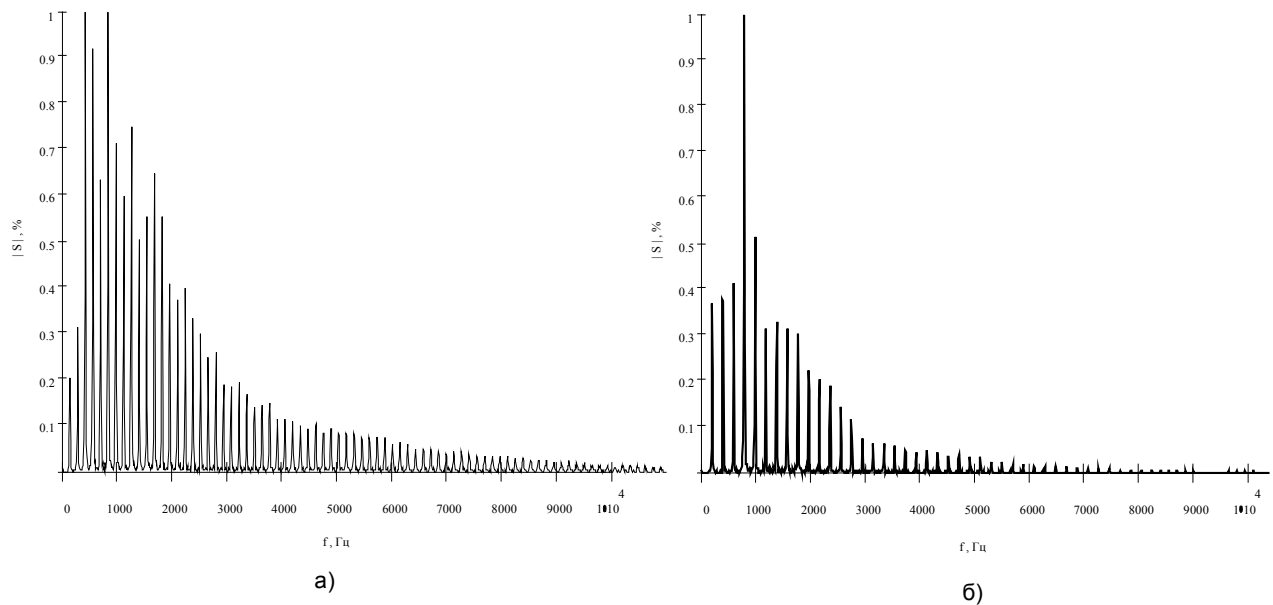


Рисунок 13 Усреднённые амплитудные спектры звуков тромбона (а — до-диез малой октавы, б — соль малой октавы)

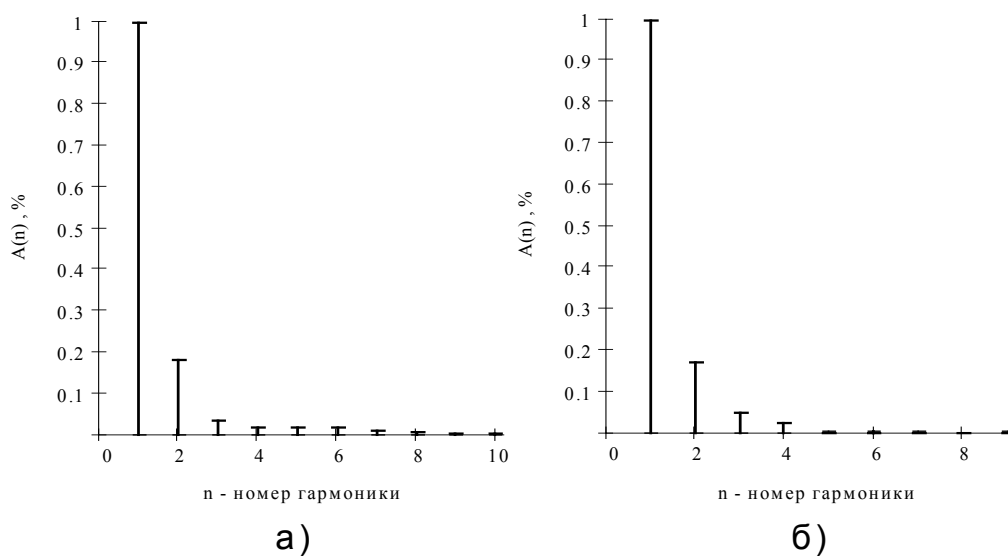


Рисунок 14 Соотношение амплитуд гармоник: а — фортепиано (ля второй октавы), б — кларнет (ми третьей октавы)

Таким образом, и это подтверждается экспериментальными данными, при рассмотрении амплитудных спектров звуков одного и того же инструмента, сохраняются формантные области (рис. 13) и характер затухания гармоник, соотношение же амплитуд гармоник для узнавания тембра неинформативно. Более того, звуки со-

вершенно разных инструментов могут иметь одинаковое соотношение амплитуд гармоник (рис.14).

Неоспорим следующий факт: мы узнаём инструмент независимо от высоты тона, манеры исполнения, приёмов игры — мы узнаём колебательную систему, т.е. звукопорождающее тело (струна, столб воздуха). Обобщённый образ звучания знакомых нам колебательных систем хранится у нас в памяти.

2. *Траектории амплитуд гармоник* («динамика развёртывания отдельных гармонических составляющих»). Важны не только для узнавания тембра, но и для определения высоты тона, разделения звуков созвучий. Для струнных инструментов, как мы выяснили, свойственна малая взаимосвязь отдельных гармоник. Возможно, поэтому именно для струнных инструментов характерно «раздвоение» ощущения высоты тона, духовым это не свойственно.

Кроме того, свойства колебательных систем определяют характерные признаки траекторий амплитуд гармоник: например, для струнных инструментов характерны биения, т.е. периодическое угасание и возбуждение гармоник (см. рис. 9 а-в). С другой стороны, как мы выяснили, в инструментах с вынужденными колебаниями соотношение амплитуд гармоник мало изменяется на установившейся стадии колебаний, все гармоники ведут себя одинаково, и изменении их амплитуд в основном определяется интенсивностью возбуждения. Иными словами, в траекториях амплитуд гармоник может быть не заложено информации о тембре.

3. *Переходные процессы* (атаки). Складывается общая убеждённость в том, что наличие «атаки», по сути, является «необходимым и достаточным условием опознания тембра». Достаточным — да, но необходимым ли?

Процесс установления колебаний всегда сопровождается возбуждением колебательной системы на наибольшем количестве резонансных частот, т.е. самый богатый спектр — у атаки, далее тембр только беднеет, но всегда ли исключение «атаки» делает невозможным узнавание инструмента? Для инструментов со свободными колебаниями — да, высшие гармоники быстро затухают, тембр быстро беднеет, кроме того, наше ухо привыкло к тому, что звучание струны, например, гитары сопровождается резким «всплеском» и быстрым затуханием, флейта так не звучит. Возьмите фрагмент звучания тромбона и «отрежьте» атаку — тромбон останется тромбоном.

4. *Негармонические призвуки.* Речь идёт о сопровождающих колебания шумах: стук клапанов в духовых, звук выдуваемого воздуха, звук, возникающий при движении пальцев по гитарным струнам с обмоткой. Безусловно, все эти призвуки помогают опознать тембр, но от них, как правило, стремятся избавиться и при записи и при концертном исполнении, так что слышим мы их редко и они мало знакомы.

Основной идеей данного исследования, уже высказанной при обсуждении классификации музыкальных инструментов, является то, что при узнавании тембра мы пытаемся понять, каков предмет, издающий звук (размер, форма) и какие действия с этим предметом производят. Из перечисленных выше четырёх признаков ни один не может быть назван необходимым основанием для опознавания тембра. Автору представляется, что узнавание тембра происходит при сопоставлении слышимого звука и предполагаемого способа возбуждения (как мы уже говорили, человек всегда отличает свободные колебания от вынужденных). Так поступают, если хотят определить частотную характеристику устройства: подают на вход заранее известный сигнал (например, единичный импульс) и регистрируют выходной сигнал. Частотная характеристика устройства равна отношению спектра выходного сигнала к спектру входного. В терминах формулы (1) можем записать:

$$H_{КС}(j\omega) \cdot H_{рез}(j\omega) = \frac{S(j\omega)}{S_{возб}(j\omega)} \quad \text{— это и есть формализация сопоставления слы-$$

шимого звука и способа возбуждения (левая часть равенства характеризует собственно музыкальный инструмент). Возможно, в мозгу происходят подобные операции, возможно, из уже известных человеку моделей колебательных систем он выбирает наиболее подходящее звено между $S(j\omega)$ и $S_{возб}(j\omega)$.

С опытом у человека накапливаются модели поведения различных физических тел, т.е. характерные издаваемые ими звуки: скрип, звон, свист, колебания струны. Мы не знаем, в каком виде подобная информация хранится в человеческом мозге, поэтому пытаться создавать системы автоматического распознавания тембра, опираясь на те или иные параметры звуковых сигналов, или спорить о важности тех или иных параметров для узнавания тембра человеком видимо, рановато. Человек использует свой опыт, у машины опыта нет и чему её учить (т.е. какую в неё информацию закладывать) непонятно...

• Литература

[1]. **Алдошина И.** Основы психоакустики часть 14. Тембр часть 1. Звукорежиссёр №2, 2001.

[2]. **Алдошина И.** Основы психоакустики часть 14. Тембр часть 2. Звукорежиссёр №3, 2001.

[3]. **Алдошина И.** Основы психоакустики часть 14. Тембр часть 3. Звукорежиссёр №4, 2001.

[4]. **Харкевич А. А.** Автоколебания. — М.: Государственное издательство технико-теоретической литературы, 1954.