

Г л а в а II. ЗВУКОВЫЕ КОЛЕБАНИЯ

§ 18. Звуковые колебания. Колебания упругой пластинки, зажатой в тисках, имеют тем более высокую частоту, чем короче свободный (колеблющийся) кусок пластинки. Когда частота колебаний делается выше 16 Гц, мы начинаем слышать колебания пластинки. Выше (§ 4) мы убедились в том, что и звучащий камертон тоже колеблется. Вообще человеческое ухо слышит звук, когда на слуховой аппарат уха действуют механические колебания с частотой не ниже 16 Гц, но не выше 20 000 Гц (20 кГц). Колебания же с более низкими и более высокими частотами неслышимы *).

Таким образом, звук обуславливается механическими колебаниями в упругих средах и телах (твердых, жидких и газообразных), частоты которых лежат в диапазоне от 16 до 20 кГц и которые способны воспринимать человеческое ухо.

Соответственно этому механические колебания с указанными частотами называются *звуковыми* или *акустическими* (а к у с т и к а — у ч е н и е о з в у к е). Неслышимые механические колебания с частотами ниже звукового диапазона часто называют *инфразвуковыми*, а с частотами выше звукового диапазона, т. е. более 20 кГц — *ультразвуковыми*.

Если звучащее тело, например электрический звонок, поставить под колокол воздушного насоса, то по мере откачивания воздуха звук будет делаться все слабее и, наконец, совсем прекратится. Передача колебаний от звучащего тела осуществляется *через воздух*. Как именно происходит распространение колебаний в воздухе, мы рассмотрим позднее. Теперь же отметим только одно обстоятельство: при своих колебаниях звучащее тело попеременно то сжимает слой воздуха, прилегающий к поверхности тела,

*) Неслышимы сами по себе, т. е. если они не сопровождаются колебаниями иного происхождения и со слышимыми частотами. Скрип качелей не означает, что мы слышим их качания.

то, наоборот, создает разрежение в этом слое. Таким образом, распространение звука в воздухе начинается с колебаний плотности воздуха у поверхности колеблющегося тела.

Но колебания плотности воздуха можно создать и без колеблющегося тела. Если, например, быстро вращать диск с отверстиями, расположенными по окружности, и продуть через них струю воздуха (рис. 35), то позади отверстий струя будет прерывистой, получатся периодически следующие друг за другом уплотнения воздуха. Легко убедиться, что и в этом случае мы услышим звук.

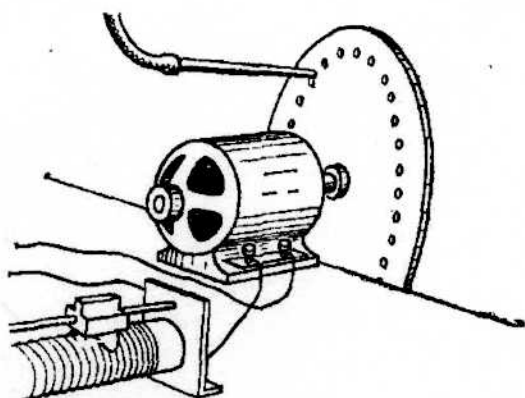


Рис. 35. Получение звука прерыванием струи воздуха

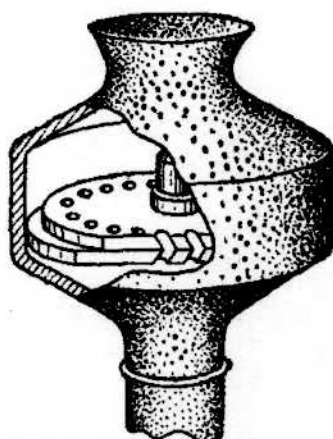


Рис. 36. Сирена

На прерывании воздушной струи основано устройство сирены. В этом источнике звука вращающийся диск располагается обычно над неподвижным диском с таким же числом отверстий, причем отверстия прорезаны наклонно (рис. 36). Этим достигается, во-первых, то, что подвижный диск приводится во вращение самой воздушной струей подобно колесу турбины, а во-вторых, одновременно прерывается столько струй, сколько отверстий в диске, благодаря чему звук значительно усиливается.

Сирена или даже простое устройство, изображенное на рис. 35, удобны в опытах тем, что позволяют легко определять период звуковых колебаний. Число прерываний воздушной струи в секунду равно, очевидно, произведению числа отверстий z на число оборотов n диска в 1 с, период же равен обратной величине:

$$T = \frac{1}{zn}.$$

Так как колебания воздуха, возникающие при работе сирены, не имеют характера гармонических, то число прерываний воздушной струи (zn) не является частотой колебания. Как уже упоминалось, периодиче-

ское негармоническое движение не может быть охарактеризовано одной частотой, а представляет собой набор гармонических колебаний с частотами, кратными основной частоте $\nu = 1/T$ (§ 17).

§ 19. Предмет акустики. Вопросы, которыми занимается акустика, очень разнообразны. Некоторые из них в конечном счете связаны со свойствами и особенностями нашего слуха. Предметом физиологической акустики является сам орган слуха, его устройство и действие. Архитектурная акустика изучает распространение звука в помещениях, влияние на звук размеров и формы помещений, свойств материалов, покрывающих стены и потолки, и т. д. При этом опять-таки имеется в виду слуховое восприятие звука. Под тем же углом зрения музыкальная акустика исследует музыкальные инструменты и условия наилучшего их звучания.

Физическая акустика занимается изучением самих звуковых колебаний, а за последние десятилетия охватила и колебания, лежащие за пределами слышимости (ультраакустика). Она широко пользуется при этом разнообразными методами превращения механических колебаний в электрические и обратно, так называемыми методами электроакустики.

Применительно к звуковым колебаниям в число задач физической акустики входит и выяснение физических явлений, обуславливающих те или иные качества звука, различаемые на слух.

Мы различаем, например, музыкальные звуки (пение, свист, звучание струн, звон) и шумы (всевозможные трески, стуки, гром, шипение, скрип). Очевидно, было бы совсем неверно сказать, что музыкальные звуки извлекаются из музыкальных инструментов, а шумы нет. Существуют шумовые музыкальные инструменты (барабаны, литавры, кастаньеты и др.), а с другой стороны, мы говорим о свисте пуль, вое ветра, гудении проводов, гудении самолета и т. д., улавливая во всех подобных звуках некоторую музыкальность. Чем же отличаются колебания, дающие ощущение музыкального звука, от шумовых колебаний?

Прежде чем ответить на этот и ряд подобных вопросов, рассмотрим подробнее музыкальные звуки. Мы начинаем с них потому, что они более простые, чем шумы. Это видно хотя бы из того, что комбинация многих музыкальных звуков может дать ощущение шума, но никакая комбинация шумов не может дать музыкальный звук.

§ 20. Музыкальный тон. Громкость и высота тона. С помощью зеркальной развертки мы убедились в том, что колебания камертона по своей форме очень близки к гармоническому колебанию (§§ 4, 5). Отклонение от периодичности, обусловленное затуханием, у камертона невелико, т. е. амплитуда спадает медленно, в течение очень большого времени.

Звук, который мы слышим тогда, когда источник его совершает гармоническое колебание, называется *музыкальным тоном* или, коротко, *тоном*.

Согласно сказанному звук камертона дает хорошее представление о тоне.

Во всяком музыкальном тоне мы можем различить на слух два качества: *громкость* и *высоту*.

Простейшие наблюдения убеждают нас в том, что *громкость тона какой-либо данной высоты определяется амплитудой колебаний*. Звук камертона после удара по нему постепенно затихает. Это происходит вместе с затуханием колебаний, т. е. со спаданием их амплитуды. Ударив камертон сильнее, т. е. сообщив колебаниям большую амплитуду, мы услышим более громкий звук, чем при слабом ударе. То же можно наблюдать и со струной и вообще со всяким источником звука.

С каким свойством колебаний связана высота тона?

Если мы возьмем несколько камертонов разного размера, то не представит труда расположить их на слух в порядке возрастания высоты звука. Тем самым они окажутся расположенными и по размеру: самый большой камертон

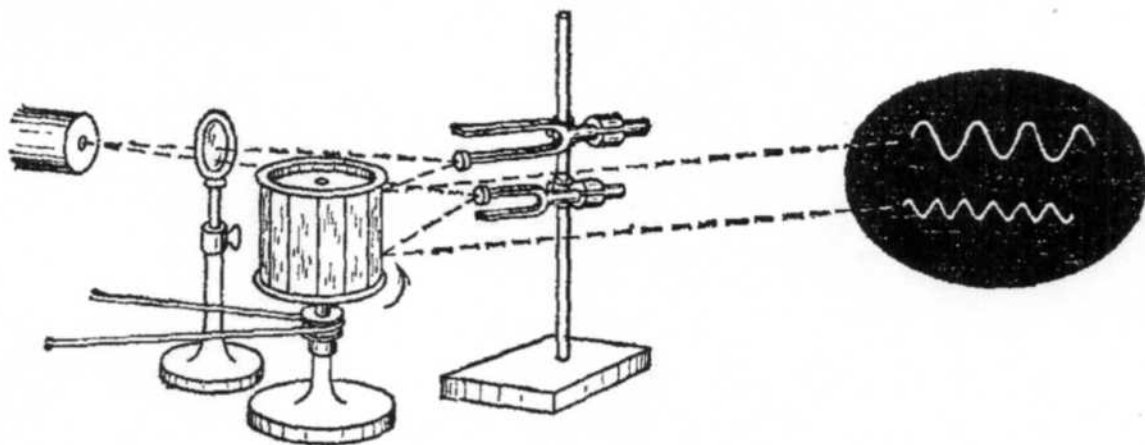


Рис. 37. Сравнение частот камертонов

дает наиболее низкий звук, самый маленький — наиболее высокий. С помощью зеркальной развертки нетрудно увидеть, что чем меньше камертон, тем больше частота его колебаний. Рис. 37 показывает, как это можно сделать.

Таким образом, *высота тона определяется частотой колебаний*. Чем выше частота и, следовательно, чем короче период колебаний, тем более высокий звук мы слышим.

§ 21. Тембр. К тем же заключениям, что и в предыдущем параграфе, можно прийти, пользуясь не камертонами, а упрощенной сиреной — вращающимся диском с отверстиями, через которые продувается струя воздуха (рис. 35). Повышая напор струи воздуха, мы усиливаем колебания плотности воздуха позади отверстий. При этом звук, сохраняя одну и ту же высоту, делается громче. Ускоряя вращение диска, мы уменьшаем период прерываний воздушной струи. Вместе с тем звук, не меняясь по громкости, повышается. Можно также сделать в диске два или более рядов отверстий с разным количеством отверстий в каждом ряду. Продувание воздуха через каждый из рядов дает тем более высокий звук, чем больше отверстий в этом ряду, т. е. чем короче период прерываний.

Но, взяв в качестве источника звука сирену, мы получаем хотя и периодическое, но уже негармоническое колебание: плотность воздуха в прерывистой струе меняется резкими толчками. Наряду с этим и звук сирены, хотя и является музыкальным, но совсем не похож на тон камертона. Можно подобрать высоту звука сирены такой же, как и у какого-либо из камертонов, т. е., как говорят, заставить сирену звучать в *унисон* с камертоном. Можно при этом и громкость звука сделать одинаковой. Тем не менее мы легко отличим звук камертона от звука сирены.

Таким образом, если колебание не является гармоническим, то на слух оно имеет еще одно качество, кроме высоты и громкости, а именно — *с п е ц и ф и ч е с к и й о т т е н о к*, называемый *тембром*. По различному тембру мы легко распознаем звук голоса, свист, звучание струны рояля, скрипичной струны, звук флейты, гармонии и т. д., хотя бы все эти звуки имели одну и ту же высоту и громкость. По тембру же мы можем узнать голоса разных людей.

С чем же связан тембр звука, с какой особенностью колебаний?

На рис. 38 показаны осциллограммы звуковых колебаний, создаваемых роялем и кларнетом, причем для одной и той же ноты, т. е. для звука одной и той же высоты, соответствующей периоду 0,01 с. Осциллограммы показывают, что период обоих колебаний одинаков, но они сильно отличаются друг от друга по *ф о р м е* и, следовательно, различаются, как мы знаем (§ 17), своим гармоническим составом.

Оба звука состоят из одних и тех же гармонических колебаний (тонов), но в каждом из них эти тоны — основной и его обертоны — представлены с разными амплитудами и фазами.

Вопрос заключается, таким образом, в том, что же именно создает ощущение того или иного тембра: амплитуды ли гармоник, или их фазы, или и то и другое вместе.

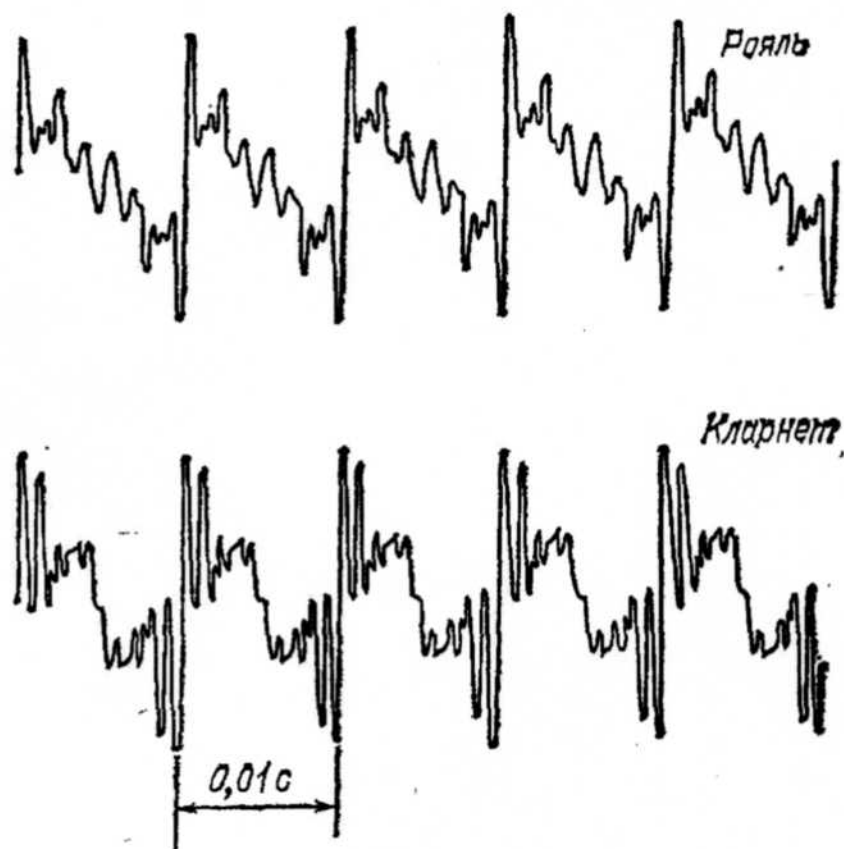


Рис. 38. Осциллограммы звуков рояля и кларнета

Исследование этого вопроса показало, что для нашего уха существенны только частоты и амплитуды тонов, входящих в состав звука, т. е. *тембр звука определяется его гармоническим спектром*. Сдвиги отдельных тонов по времени, другими словами, и изменения фаз тонов, никак не воспринимаются на слух, хотя и могут очень сильно менять форму результирующего колебания. Таким образом, один и тот же звук может восприниматься при очень различных формах колебания. Важно только, чтобы сохранялся спектр, т. е. частоты и амплитуды составляющих тонов.

На рис. 39 изображены спектры тех звуков, осциллограммы которых показаны на рис. 38. Так как высоты звуков одинаковы, то и частоты тонов — основного и обертонов — одни и те же. Однако амплитуды отдельных гармоник в каждом спектре сильно различаются. В звуке рояля замет-

ны гармоник до 18-й, причем 15-я и 16-я практически отсутствуют, в то время как у кларнета налицо гармоник лишь до 12-й и отсутствуют вторая и четвертая гармоник.

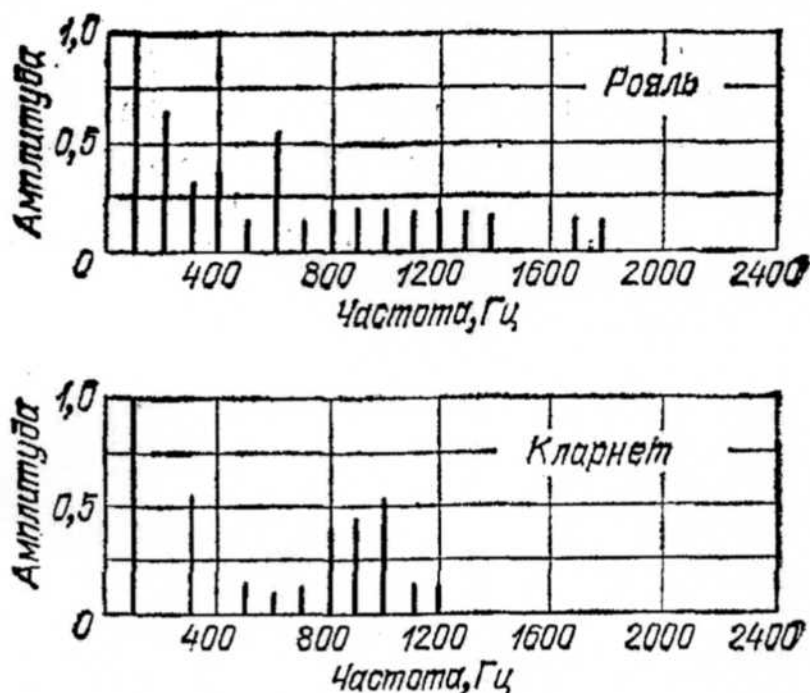


Рис. 39. Спектры звуков рояля и кларнета

§ 22. Акустический резонанс. Резонансные явления можно наблюдать на механических колебаниях любой частоты, в частности и на звуковых колебаниях. Пример звукового или акустического резонанса мы имеем в следующем опыте.

Поставим рядом два одинаковых камертона, обратив отверстия ящиков, на которых они укреплены, друг к другу (рис. 40). Ящики нужны потому, что они усиливают звук камертонов. Это происходит вследствие резонанса между камертоном и столбом воздуха, заключенного в ящике; по-

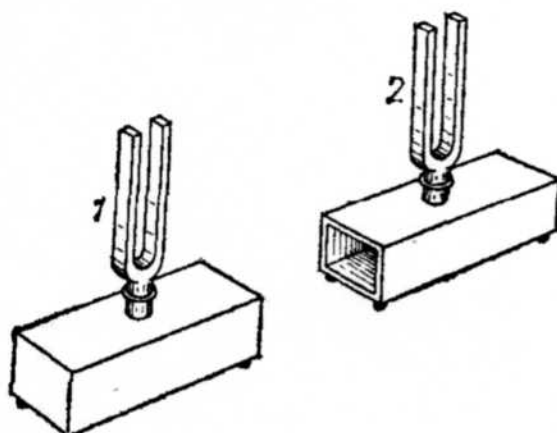


Рис. 40. Резонанс камертонов

этому ящики называются резонаторами или резонансными ящиками. Подробнее мы объясним действие этих ящиков ниже, при изучении распространения звуковых волн в воздухе. В опыте, который мы сейчас разберем, роль ящиков чисто вспомогательная.

Ударим один из камертонов и затем приглушим его пальцами. Мы услышим, как звучит второй камертон.

Возьмем два разных камертона, т. е. с различной высотой тона, и повторим опыт. Теперь каждый из камертонов уже не будет откликаться на звук другого камертона.

Нетрудно объяснить этот результат. Колебания одного камертона (1) действуют через воздух с некоторой силой на второй камертон (2), заставляя его совершать вынужденные колебания. Так как камертон 1 совершает гармоническое колебание, то и сила, действующая на камертон 2, будет меняться по закону гармонического колебания с частотой камертона 1. Если частота силы та же, что и собственная частота камертона 2, то имеет место резонанс — камертон 2 сильно раскачивается. Если же частота силы иная, то вынужденные колебания камертона 2 будут настолько слабыми, что мы их не услышим.

Так как камертоны обладают очень небольшим затуханием, то резонанс у них острый (§ 14). Поэтому уже небольшая разность между частотами камертонов приводит к тому, что один перестает откликаться на колебания другого. Достаточно, например, приклеить к ножкам одного из двух одинаковых камертонов кусочки пластилина или воска, и камертоны уже будут расстроены, резонанса не будет.

Мы видим, что все явления при вынужденных колебаниях происходят у камертонов так же, как и в опытах с вынужденными колебаниями груза на пружине (§ 12).

Если звук представляет собой *ноту* (периодическое колебание), но не является *тоном* (гармоническим колебанием), то это означает, как мы знаем, что он состоит из суммы тонов: наиболее низкого (основного) и обертонов. На такой звук камертон должен резонировать всякий раз, когда частота камертона совпадает с частотой какой-либо из гармоник звука. Опыт можно произвести с упрощенной сиреной и камертоном, поставив отверстие резонатора камертона против прерывистой воздушной струи. Если частота камертона равна 300 Гц, то, как легко убедиться, он будет откликаться на звук сирены не только при 300 прерываниях в секунду (резонанс на основной тон сирены), но и при 150 прерываниях — резонанс на первый обертон сирены, и при 100 прерываниях — резонанс на второй обертон, и т. д.

Нетрудно воспроизвести со звуковыми колебаниями опыт, аналогичный опыту с набором маятников (§ 16). Для этого нужно только иметь набор звуковых резонаторов — камертонов, струн, органных труб. Очевидно, струны рояля или пианино образуют как раз такой и притом очень обширный набор колебательных систем с разными собственными частотами. Если, открыв рояль и нажав педаль, громко пропеть над струнами какую-нибудь ноту, то мы услышим, как инструмент откликается звуком той же высоты и сходящего тембра. И здесь наш голос

создает через воздух периодическую силу, действующую на все струны. Однако откликаются только те из них, которые находятся в резонансе с гармоническими колебаниями — основным и обертонами, входящими в состав спетой нами ноты.

Таким образом, и опыты с акустическим резонансом могут служить прекрасными иллюстрациями справедливости теоремы Фурье.

§ 23. Запись и воспроизведение звука. Мы привыкли к тому, что в телефонной трубке, проигрывателе, магнитофоне, громкоговорителе звучит человеческий голос и играет музыка, т. е. к тому, что металлическая пластинка (мембрана) заменяет сложный голосовой аппарат человека и даже целый хор или оркестр. Но по сути дела мы имеем здесь акустическую имитацию. Как же она достигается?

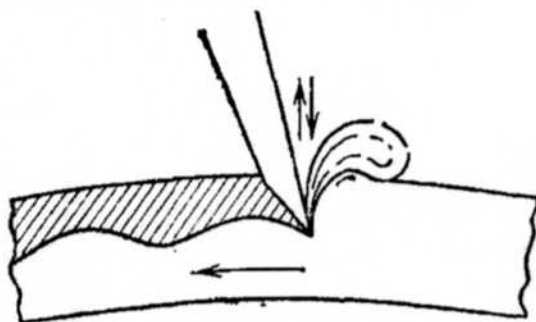


Рис. 41. Звуковая борозда, вычерчиваемая иглой фонографа

Современный проигрыватель появился в результате усовершенствования фонографа («звукозаписывателя»), созданного более ста лет назад американским изобретателем Томасом Алва Эдисоном (1847—1931). Устройство фонографа было чрезвычайно простым. Колебания воздуха, вызываемые источником звука, заставляли колебаться мембрану и прикрепленную к ней иглу. Игла при этом чертила на покрытом воском вращающемся цилиндре борозду переменной глубины. На рис. 41 показан сильно увеличенный разрез через иглу и борозду. Профиль дна этой борозды в сущности есть развертка или осциллограмма колебаний конца иглы. Поставив иглу на исходную точку борозды и вновь вращая покрытый воском цилиндр, мы получим следующее. Неровное дно борозды вызовет те же колебания иглы и мембраны, которые они совершали при записи звука (в фонографе при записи и воспроизведении звука использовалась одна и та же мембрана). От мембраны колебания передадутся воздуху, и мы услышим воспроизведенные звуки.

В дальнейшем запись звука в виде борозды переменной глубины была заменена поперечной записью, т. е. в виде борозды с поперечными извилинами. На современных пластинках звуковая борозда (дорожка) имеет форму спирали, по которой при вращении пластинки движется игла, обычно от края пластинки к ее центру. Извилины этой

дорожки легко рассмотреть в сильное увеличительное стекло (рис. 42).

Не останавливаясь на технических усовершенствованиях (подборе материала для пластинок, технологии их изготовления, способах записывания звука и т. п.), обратим внимание на основную задачу всякого воспроизведения звука.

При записи и воспроизведении звука мы имеем ряд превращений колебаний воздуха в иные колебания и затем ряд

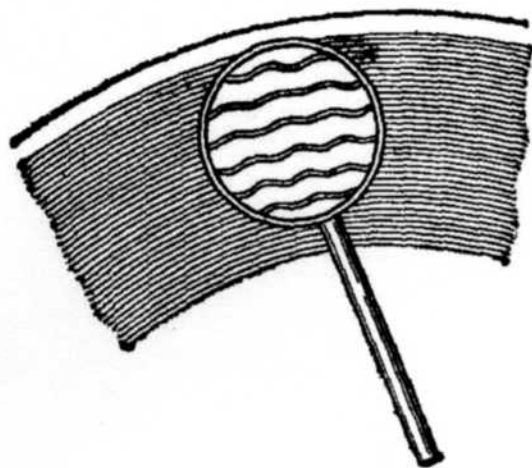


Рис. 42. Звуковая дорожка на современной пластинке

обратных превращений. Запись на пластинку состоит в превращении колебаний воздуха в колебания мембраны и иглы, а игла создает извилины на пластинке. Запись звука на киноленту или на намагничивающуюся ленту (магнитофон) содержит еще больше превращений.

Задача заключается в том, чтобы при всех этих превращениях как можно меньше исказить спектр

колебаний, т. е. сохранить тембр первичного звука. Сильные искажения спектра колебаний изменяют звучание музыкальных инструментов и голоса (делают их «не похожими на самих себя»), могут сделать речь неразборчивой, и т. п.

Для звукового восприятия само по себе неважно, что именно заставляет воздух колебаться — мембрана или, например, несколько десятков инструментов большого оркестра. Важно только то, чтобы в обоих случаях до нашего уха доходили колебания с одним и тем же спектром.

§ 24. Анализ и синтез звука. При помощи наборов акустических резонаторов можно установить, какие тоны входят в состав данного звука и с какими амплитудами они присутствуют в данном звуке. Такое установление гармонического спектра сложного звука называется его *гармоническим анализом*. Раньше такой анализ действительно производился с помощью наборов резонаторов, в частности резонаторов Гельмгольца, представляющих собой полые шары разного размера, снабженные отростком, вставляющимся в ухо, и имеющие отверстие с противоположной стороны (рис. 43). Действие такого резонатора, как и действие ре-

зонансного ящика камертона, мы объясним ниже (§ 51). Для анализа звука существенно то, что всякий раз, когда в анализируемом звуке содержится тон с частотой резонатора, последний начинает громко звучать в этом тоне.

Такие способы анализа, однако, очень неточны и кропотливы. В настоящее время они вытеснены значительно более совершенными, точными и быстрыми электроакустическими способами. Суть их сводится к тому, что акустическое колебание сначала преобразуется в электрическое колебание с сохранением той же формы, а следовательно, имеющее такой же спектр (§ 17); затем уже это электрическое колебание анализируется электрическими методами.

Укажем один существенный результат гармонического анализа, касающийся звуков нашей речи. По тембру мы можем узнать голос человека. Но чем различаются звуковые колебания, когда один и тот же человек поет на одной и той же ноте различные гласные: *а, и, о, у, э*? Другими словами, чем различаются в этих случаях периодические колебания воздуха, вызываемые голосовым аппаратом при разных положениях губ и языка и изменениях формы полостей рта и горла? Очевидно, в спектрах гласных должны быть какие-то особенности, характерные для каждого гласного звука, сверх тех особенностей, которые создают тембр голоса данного человека. Гармонический анализ гласных подтверждает это предположение, а именно, гласные звуки характеризуются наличием в их спектрах областей обертонов с большой амплитудой, причем эти области лежат для каждой гласной всегда на одних и тех же частотах, независимо от высоты пропетого гласного звука. Эти области сильных обертонов называются *формантами*. Каждая гласная имеет две характерные для нее форманты. На рис. 44 показано положение формант гласных *у, о, а, э, и*.

Очевидно, если искусственным путем воспроизвести спектр того или иного звука, в частности спектр гласной, то наше ухо получит впечатление этого звука, хотя бы его «естественный источник» отсутствовал. Особенно легко удастся осуществлять такой синтез звуков (и синтез гласных) с помощью электроакустических устройств. Электрические музыкальные инструменты позволяют очень просто изменять спектр звука, т. е. менять его тембр.

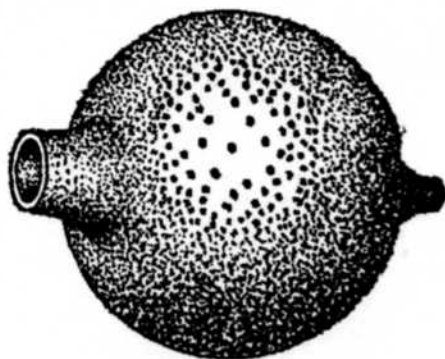


Рис. 43. Резонатор Гельмгольца

Простое переключение делает звук похожим на звуки то флейты, то скрипки, то человеческого голоса или же совсем своеобразным, не похожим на звук ни одного из обычных инструментов.

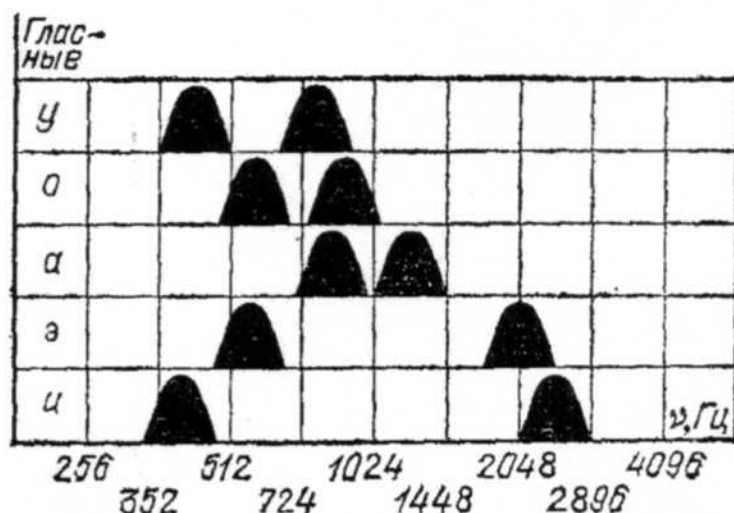


Рис. 44. Положение формант гласных звуков на шкале частот

§ 25. Шумы. При многократном проигрывании пластинки игла проигрывателя портит звуковую дорожку, края ее крошатся, форма искажается и т. п. Результатом является ш и п е н и е такой заигранной пластинки. Наличие трещин в пластинке дает щ е л ч к и при ее проигрывании. Таким образом, всякие неправильности звуковой дорожки, вызывающие мелкие и крупные скачки иглы, создают ш у м. Этот пример позволяет подметить основные черты, отличающие друг от друга музыкальные и шумовые колебания, хотя, конечно, резко разграничить их нельзя.

Музыкальный звук (ноту) мы слышим тогда, когда колебание периодическое. Например, такого рода звук издает струна рояля. Если одновременно ударить несколько клавиш, т. е. заставить звучать несколько нот, то ощущение музыкального звука сохранится, но отчетливо выступит различие *конsonирующих* и *диссонирующих* нот. *Консонансом* называется приятное для слуха созвучие, а *диссонансом* — неприятное, «режущее слух». Оказывается, что конsonируют те ноты, периоды которых находятся в отношениях небольших целых чисел. Например, консонанс получается при отношении периодов 2 : 3 (это созвучие называется в теории музыки *квинтой*), при 3 : 4 (*кварта*), 4 : 5 (*большая терция*) и т. д. Если же периоды относятся как большие числа, например 19 : 23, то получается диссонанс — музыкальный, но неприятный звук. Еще дальше мы уйдем от периодичности колебаний, если одновременно ударим по многим клавишам, положив для

этого на клавиатуру линейку. Звук получится уже шумоподобным.

Для шумов характерна сильная неперериодичность формы колебаний: либо это — длительное колебание, но очень неправильное, сложное по форме (шипение, скрип), либо же отдельные выбросы (щелчки, стуки). С этой точки зрения к шумам следует отнести и звуки, выражаемые согласными (шипящие, губные и т. д.). На рис. 45 показаны примеры осциллограмм и спектров шумовых колебаний.

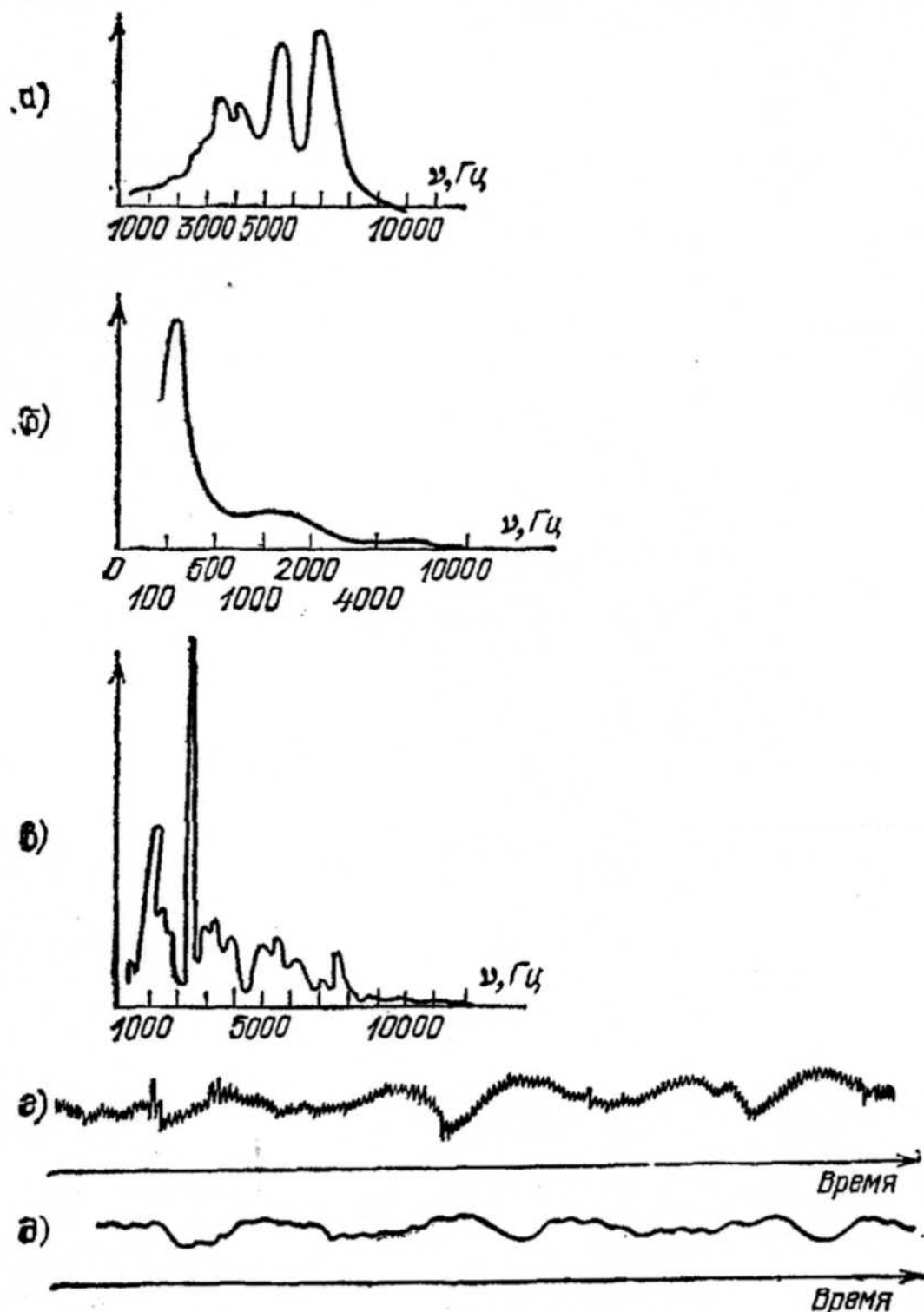


Рис. 45. Спектр шума согласной «с» (а), бунзеновской горелки (б), пылесоса (в) и осциллограмма шума выхлопа мотора без глушителя (г) и с глушителем (д)

Во всех случаях шумовые колебания состоят из огромного количества гармонических колебаний с разными частотами. К этому мы и приближались по мере того, как увеличивали число одновременно ударяемых клавиш рояля.

Таким образом, у гармонического колебания спектр состоит из одной-единственной частоты. У периодического колебания спектр состоит из набора частот — основной и кратных ей. У консонирующих созвучий мы имеем спектр, состоящий из нескольких таких наборов частот, причем основные частоты относятся как небольшие целые числа. У диссонирующих созвучий основные частоты уже не находятся в таких простых отношениях. Чем больше в спектре разных частот, тем ближе мы подходим к шуму. Типичные шумы имеют спектры, в которых присутствует чрезвычайно много частот.