В. Порвенков

АКУСТИКА И НАСТРОЙКА МУЗЫКАЛЬНЫХ ИНСТРУМЕНТОВ

В. Порвенков

АКУСТИКА И НАСТРОЙКА МУЗЫКАЛЬНЫХ ИНСТРУМЕНТОВ



Москва «Музыка»
1990

ББК 85.31
П 59

Рецензент — С. А. Громов

Порвенков В. Г.

П 59 Акустика и настройка музыкальных инструментов: Методическое пособие по настройке. М.: Музыка, 1990, 192 с., нот., ил.

ISBN 5—7140—0217—2

В книге на доступном уровне излагаются основные теоретические и практические сведения по настройке музыкальных инструментов — клавишных, язычковых, смычковых, щипковых, а также духовых. Дается изложение основ музыкальной акустики и нотной грамоты, которые необходимы для точной и правильной настройки. Значительное внимание уделено практическим приемам настройки.

Предназначается настройщикам музыкальных инструментов, а также широкому кругу музыкантов.

П $\frac{4905000000-338}{26(01)-90}$ **77—90** **ББК 85.31**

ISBN 5—7140—0217—2 *© В. Г. Порвенков, 1990 г.*

I. ИСТОРИЧЕСКОЕ ВВЕДЕНИЕ В МУЗЫКАЛЬНУЮ АКУСТИКУ

С явлениями акустики сталкивается каждый. Вслушаемся в окружающий нас мир. Мы начинаем вдруг слышать звуки, на которые только что не обращали никакого внимания. Тикают часы, звучит где-то музыка, свистит ветер, щебечет вдали птичка. Трудно также назвать область техники, которая не сталкивалась бы с акустическими вопросами: изготовители музыкальных инструментов ищут способы улучшения акустических свойств своей продукции, строители заняты поисками уменьшения бытовых и производственных шумов, акустические методы исследования позволяют без разрушения детали установить ее качество, сложный стенд в считанные минуты даст полную справку о работе деталей в двигателе автомобиля и танка — и эти важные сведения будут получены только на основе анализа звуковых колебаний.

Звук — это распространяющиеся в упругих средах (газах, жидкостях и твердых телах) механические колебания. Учение о звуке, по классическому определению, и есть акустика. По аналогии, акустика музыкальных инструментов, или музыкальная акустика — учение о музыкальном звуке.

В природе существует множество процессов, сопровождающихся колебаниями, основные законы которых во всех случаях одинаковы. Чем же отличаются от остальных звуковые колебания, порождающие звуки музыки? Как и почему происходят колебания, способные отражать действительность в звуковых художественных образах, то есть быть музыкой? Ответы на эти вопросы дает музыкальная акустика.

Существует несколько определений этого предмета, помимо уже упоминавшегося. В соответствии с одним из них, музыкальная акустика — наука, изучающая природу музыкальных звуков и созвучий, а также музыкальные системы и строи. Но более полным, на наш взгляд, является такое определение: музыкальная акустика — наука об образовании, распространении и восприятии звуков музыки. Здесь в полной мере обозначен круг вопросов предмета, указаны его основные аспекты. Важное отличие этого определения от предыдущих состоит в том, что, согласно первому, в музыкальной акустике изучаются только музыкальные звуки, согласно второму — вообще звуки, которые могут быть как музыкальными, так и немузыкальными, то есть шумами. Известно, что композиторы широко используют в музыкаль-

ных произведениях различные шумовые эффекты, которые могут создаваться и музыкальными инструментами, поэтому исключать эти звуки, применяемые в музыке, было бы неправильно, тем более что почти в любом музыкальном звуке имеется примесь шума.

Первоначальное ознакомление с музыкальной акустикой целесообразно, на наш взгляд, осуществить в историческом развитии и проследить, как возникли, как развивались и пришли к современному состоянию наши знания этого предмета. После такого исторического экскурса изложим основные понятия современной музыкальной акустики в том виде, в каком они нужны любому, кто имеет дело с музыкальным инструментом и его настройкой. Различия во взглядах древних и современных ученых помогут лучше уяснить предмет.

Истоки акустики можно проследить до древнейших времен [1, 2, 3, 4].

Точно установить, когда первобытный человек впервые обратил внимание на то, что звуки природы могут быть приятными на слух, уже невозможно, но то, что это наблюдение было основой для создания музыкального искусства, можно утверждать с определенностью. Иначе человек не начал бы изобретать музыкальные инструменты. И можно также утверждать, что создавал он свои музыкальные инструменты за много тысяч лет до того, как стал интересоваться и изучать природу музыкальных звуков. Древние музыкальные инструменты намного старше, чем первые дошедшие до нас сведения об акустике.

По-видимому, наиболее древние музыкальные инструменты — духовые.

Различные свистульки и дудки из рогов животных и раковин находят в раскопках палеолита — древнекаменного века. Время возникновения древней флейты и трубы-раковины приблизительно 80 000 — 13 000 лет до н. э., флейты с игровыми отверстиями дудки — 5000 — 2000 лет до н. э.

Моложе струнные инструменты, например, арфа, известная по рисункам, найденным при археологических раскопках Древнего Египта. Рисунки арф, высеченные на камнях, датируются пятым тысячелетием до нашей эры.

Познания древних в акустике, если судить по дошедшим сведениям, были умозрительными и в немалой степени имели мистический характер. Китайский философ Фохи, живший три тысячи лет до нашей эры, размышлял о связи высоты звуков с элементами природы: землей, водой, воздухом, огнем и ветром. Какую связь удалось установить китайскому философу — история об этом умалчивает.

Акустика так или иначе должна была возникнуть на основе естественного интереса к музыке и к музыкальным инструментам. Точно так же, как приятные для слуха звуки природы побудили человека создавать музыкальные инструменты, так и приятные звуки инструментов вызвали стремление разгадать тайну музыкальных звуков. Таким образом, появление акустики связано с приятными для слуха звуками.

Зарождающаяся человеческая мысль старалась проникнуть в зву-

ковые явления окружающей природы. Уже на заре развития мышления человека появились фундаментальные идеи в области звуковых явлений. Древние греки были знакомы со многими элементами музыкальной теории, соответствующими современным представлениям. Например, им были известны диатонический и хроматический музыкальный строй.

В глубокой древности было замечено, что при ударе двух тел возникает звук. Известно, что примерно в X—VI веках до н. э. древнегреческие философы уже были убеждены в том, что источник звука необходимо искать в движении частиц, из которых состоят соударяемые тела, что звук далее распространяется в результате каких-то неопределенных движений воздуха и это последнее дает ощущение слышания. Мы видим, что эти представления совсем близки к истине и не хватает им только ясности и глубины проникновения в сущность явлений. Ясность постепенно вносили теоретики в течение последующих веков. VI век до н. э. оставляет заметное влияние на развитие музыкальной акустики, и наибольшим успехом классической древности в этой области стало открытие связи высоты тона и длины звучащего тела (струны, трубы). Открытие это связано с именем Пифагора (около 500 г. до н. э.), основавшего свою школу в Южной Италии (Кротон). На Пифагора сильное впечатление произвело наблюдение за звучанием длинных и коротких струн. Он обнаружил, что струна издает тон на целую октаву выше тона, издаваемого струной, которая вдвое длиннее. На глаз было заметно, что длинная струна вибрирует реже, чем натянутая с той же силой короткая струна. На этом основании позднейшие исследователи рассматривают опыты со струнами как доказательство того, что Пифагор осознавал идею зависимости звука от частоты вибрации.

Систематизация физических знаний о природе заложена трудами Аристотеля. Его труды — обширная энциклопедия знаний, итог работ не только самого Аристотеля, жившего в 384—322 гг. до н. э., но и плоды трудов многих поколений до него, суммирование человеческих знаний во многих областях науки и искусства. Система знаний Аристотеля почти две тысячи лет была фундаментом науки. Для музыкальной акустики особый интерес представляет Аристотелево учение о движении и музыке. Правильны мысли о распространении звука в воздухе. Если во времена Пифагора знали, что звук каким-то образом связан с действием воздуха, то Аристотель делает в этой области шаг вперед и уже утверждает, что звук создается благодаря волнам сжатия. Воспитатель Александра Македонского пытался основать физику музыкального звука на наблюдении и эксперименте, но Аристотелевой физике все же не хватало глубины обобщений.

Примечательная веха — изобретение монохорда, который впервые упоминается у великого геометра Евклида, грека по национальности, расцвет творчества которого относится к 300-м годам до н. э. Возможно, этот крупнейший физик древности и не был изобретателем монохорда, а прообраз последнего был известен уже Пифагору. Но такова уж судьба древних изобретений, что многие из них не имеют достоверно установленных авторов. Считают, что во

времена Евклида были известны в общих чертах законы распространения и отражения звука.

Попытка создания волновой теории звука по аналогии с закономерностями распространения волн на поверхности воды была предпринята в I веке до н. э. знаменитым архитектором из Рима Марком Витрувиусом. Замечательно в его теории то, что она рассматривала воздух не движущимся вместе с волной — аналогично тому, как щепка на воде поднимается и опускается при прохождении волны от брошенного где-то рядом камня: волны от камня расходятся, а щепка за ними не следует. Казалось бы, простое наблюдение, но подобная аналогия применительно к волнам в воздухе никак не укладывалась в головах современников Витрувиуса. Они отрицали точку зрения Витрувиуса, которой, кстати, придерживался сам Аристотель на том основании, что если воздух остается на месте, не движется вместе со звуковой волной, то как же тогда объяснить распространение звука в пространстве? Даже шестнадцать-семнадцать столетий спустя в этом вопросе у физиков была путаница.

Но проследуем дальше. Марк Фабий Квинтилиан (30—96 г. н. э.) доказал наличие резонанса струны, использовав для этой цели соломинку. Удивительная широта интересов древних! Квинтилиан сделал открытие одного из фундаментальных явлений в музыкальной акустике, не будучи физиком,— он, как известно, был оратором!

Северинус Бетиус (480—525 г. н. э.) написал пять книг по музыке, в которых обстоятельно изложил музыкально-теоретические учения того времени. Наряду с «Проблемами» Аристотеля эти книги являются одним из основных источников сведений по музыкальной акустике древних. Приведем некоторые выдержки из книг Бетиуса, которые замечательны тем, что взгляды, изложенные в них, близки к современным воззрениям: «Если бы все вещи находились в состоянии покоя, то ни один звук не коснулся бы нашего слуха. Так было бы и при прослушивании любого движения, при котором вещи не могли бы производить между собой удара. Таким образом, для возникновения звука необходим удар. Возникновению удара, однако, по необходимости должно предшествовать движение.

Итак, если должен возникнуть звук, то должно быть налицо и движение. Каждое движение содержит в себе как момент скорости, так и момент медленности.

Если движение при ударе медленное, то возбуждается более низкий тон, ибо подобно тому как медленное движение ближе к состоянию покоя, так и низкий тон ближе к молчанию. Быстрое движение приводит к высокому звучанию. Кроме того, низкий тон, повышаясь, достигает середины, а высокий тон достигает ее, понижаясь. Вся совокупность частей соединяется в известной пропорции. Пропорции же познаются, главным образом, в числах. В зависимости от многократных или подразделенных пропорций слышатся либо созвучные, либо несозвучные тоны. Созвучные тоны — это такие тоны, которые, взятые одновременно, создают приятное и слитное звучание. Несозвучные тоны — это такие тоны, которые, взятые одновременно, не создают приятного и слитного звучания».

В данном отрывке видны, по крайней мере, четыре основополагающих понятия музыкальной акустики. Первое — для того, чтобы возник звук, должно быть движение; второе — чем быстрее движение при ударе, тем выше тон, и наоборот; третье — каждое звучание — тон — состоит из отдельных частей, то есть, по существу, речь идет о сложном характере звука; и четвертое — тоны бывают созвучные и несозвучные, создающие приятное, слитное звучание или неприятное, неслитное звучание. Последнее положение — так как оно дано в цитате из книг Бетиуса, совпадает почти дословно с определением консонанса и диссонанса, принятым в современных книгах по музыкальной акустике.

Перешагнем далее сразу через тысячу лет, поскольку история музыкальной акустики за этот период не была богата яркими открытиями, во всяком случае удивительные и интересные события происходят в XVI столетии. Начиная с конца XVI века в центре внимания исследователей стояла проблема установления связи между высотой тона и числом колебаний тела. Сейчас уже невозможно установить точно, сколько ученых занималось этой проблемой и каким путем пришло к ее решению. Известно, что в 1585 году итальянец Джованни Бенедетта опубликовал в Турине трактат о музыкальных интервалах, в котором он утверждает, что в одних и тех же интервалах, с одинаковым отношением высот звуков будут равны и отношения частот колебательного движения тел, производящих эти звуки. Некоторые свои расчеты к доказательству связи между высотой звука и частотой колебаний публикует в 1618 году француз Исаак Бикман.

Но открытие этой связи обычно приписывают двум другим ученым: французскому монаху Марену Мерсенну (1588—1648) и великому Галилео Галилею (1564—1642). Мерсенн более глубоко, чем Бенедетта и Бикман, исследовал колебания струн, и проведенные им экспериментальные исследования позволили ему сделать вывод, что при равнозначных условиях частота колебания струн обратно пропорциональна длине струны и прямо пропорциональна квадратному корню из площади поперечного сечения струны. Очевидно, в это время родился опыт по установлению связи высоты колебаний с частотой при помощи зубчатого колеса, которое при своем вращении задевало за кусок картона; при этом частота и высота звука увеличивались, если выбиралось колесо с бóльшим числом зубьев (при одинаковой скорости вращения колес). Этот опыт нередко ставится и в наши дни.

Хотя Галилей, по-видимому, и не был первооткрывателем связи высоты тона и частоты колебаний, как, впрочем, утверждают некоторые литературные источники, он все же внес существенный вклад в прояснение этой проблемы. Галилей блестяще выразил многие фундаментальные идеи музыкальной акустики, что дает повод считать его одним из основателей современной акустики.

В своих знаменитых «Беседах и математических доказательствах, касающихся двух новых отраслей науки, относящихся к механике и местному движению» — главном труде Галилея, вышедшем в Лейдене в 1638 году и содержащем в систематическом виде изложение

всего сделанного им в механике, Галилей рассуждает о вибрации тел.

Начиная с рассмотрения движения маятника, автор переходит затем к рассмотрению разнообразных акустических явлений. Маятник не является источником звуковых колебаний ни для какого музыкального инструмента, но на его примере открыто много законов акустики. Галилей нашел, что периоды колебаний маятников равной длины одинаковы, даже если один маятник — свинцовый, а другой — пробковый шары, что частота колебаний маятника зависит от длины подвеса и что период колебания маятника не зависит от амплитуды колебания, какой бы большой она ни была. И великие ошибаются. Последнее утверждение Галилея — неправильно: при больших амплитудах колебаний маятника и большинства других источников вибраций период колебаний изменяется, хотя и незначительно. Даже такой эталон частоты, как камертон, как было установлено много лет после Галилея, при больших амплитудах в начале колебания имеет несколько бо́льшую частоту по сравнению с частотой в конце колебаний, когда амплитуды малы (хотя на слух мы этого и не замечаем). Далее Галилей описывает два интересных опыта, которые позволили ему установить физический смысл связи высоты звука колеблющейся струны и ее частоты. Он высказывает суждение, что смысл этой связи определяется числом колебаний в единицу времени. В первом опыте стеклянный бокал был укреплен на дне вместительного сосуда с водой. Если бокал потирали по краю пальцем, то он начинал издавать звук, а по поверхности воды в большом сосуде пробегали волны. Галилей иногда замечал, что бокал мог издавать звук на октаву выше и, что важно, рябь на воде в этом случае становилась более частой, а длина волны вдвое меньшей.

Во втором опыте звук издавала медная пластинка, которую Галилей чистил от ржавчины железным резцом. Скобление сопровождалось звонким звуком, и на пластинке можно было заметить ряд параллельных тонких черточек от резца, расположенных на одном расстоянии друг от друга. И точно так же, как и в опыте со звучащим бокалом, при повышении высоты звука, что достигалось увеличением скорости скобления резцом, расстояние между параллельными рисками на пластинке уменьшалось.

Далее Галилей описывает сделанное им в опытах наблюдение, что звук пластинки мог заставить звучать струны его спинета. Этот эффект вызывается явлением, которое мы сейчас называем резонансом. Становится очевидным, что Галилей ясно понимал роль распространяющихся в воздухе колебаний одного источника, вызывающих соколебания другого источника (в данном конкретном случае — равнотонной струны спинета). Наблюдательный Галилей заметил также, что если струны, резонирующие на звук медных пластинок, возбуждаемых железным резцом, составляют между собой квинту, то средние расстояния между рисками на пластинках относятся как 2 к 3. Такими опытами он мог установить отношения частот в музыкальных интервалах. Галилей пытался выяснить, почему музыкальные интервалы с простыми отношениями: 1:1, 1:2, 2:3 и некоторые

другие — кажутся на слух приятными (консонансами, скажем мы теперь), а музыкальные интервалы с отношениями больших целых чисел, например 15:16,— неприятными (то есть диссонансами).

Таким образом, Галилей в «Беседах», называемых им самим своим шедевром, рассматривает все основные фундаментальные вопросы, стоявшие в центре внимания в области музыкальной акустики в XVII веке: получение звука с помощью колебаний, связь высоты тона и частоты колебаний, распространение звука в воздухе, явление резонанса, музыкальные интервалы, колебания струны (экспериментальное изучение) и зависимость частоты струны от ее геометрических и физических параметров.

Начиная с XVII века развивается и теоретическая, математическая база музыкальной акустики. Для описания колебаний всевозможных встречающихся в музыкальных инструментах источников необходим был математический аппарат. А для последнего нужен был основополагающий закон, который раскрывал бы зависимость между деформацией твердого тела и силой, создающей эту деформацию Эту проблему решил в 1660 году и представил научному миру в 1675 году в виде анаграммы ceiiinosssttuv Роберт Гук. Знаменитый закон Гука, который по-латыни из букв анаграммы выражается так: «ut tensio sic vis» (каково напряжение, такова и деформация), является основанием для учения о звуке и для теории упругости, которая, собственно, лежит в основе теории колебательного движения тел. Одного этого закона было бы достаточно, чтобы Гук вошел в историю. Его можно по праву считать изобретателем идеи акустической диагностики различных механизмов, в том числе и музыкальных инструментов, по тем звукам, которые они издают, диагностики состояния человеческого организма по шумам внутренних органов.

Попытки объяснения распространения звуковых волн в воздухе по аналогии с распространением ряби или волн на воде были сделаны еще в I веке до н. э. Попытка же создать математическую теорию волнового движения была впервые сделана Исааком Ньютоном (1642—1727) в его труде «Математические начала натуральной философии» (1687), показавшем, насколько мощным средством исследования физических процессов может быть математика.

Теория волнового движения разработана в восьмом разделе второй книги «Начал». Ньютон утверждает, что распространение звука есть не что иное, как толчки воздуха, возникающие в результате воздействия вибрирующего тела на непосредственно примыкающие к нему участки окружающей среды (воздуха). Эти толчки или импульсы передаются соседним участкам среды и т. д. Интересными являются предположения Ньютона о характере движения отдельных частиц среды (предположения, которые он не мог проверить экспериментально): при прохождении импульса частички среды начинают двигаться в простом гармоническом движении, иначе говоря, по законам колебания маятника; если такое движение справедливо для одной частицы среды, то оно должно быть справедливо и для любой другой. Ньютон теоретически рассчитывает скорость движения зву-

ковой волны и приходит к выводу, что скорость звука равна квадратному корню из отношения величины атмосферного давления к плотности воздуха. Это первое теоретическое определение скорости звука было не совсем точным, и в дальнейшем потребовалась его корректировка. Ньютон дал также первый расчет длины волны звука и рассчитал длину волны звука, издаваемого открытой трубой: длина звуковой волны равна удвоенной длине открытой трубы.

И хотя Ньютон уже в своих теоретических расчетах рассматривал воздух как проводник звуковых волн, лишь незадолго до этого было получено экспериментальное доказательство тому, что без воздуха невозможно распространение звуковых колебаний.

Наиболее тщательные опыты в этом направлении были осуществлены проницательным ученым своего времени Робертом Бойлем (1627—1691), ассистентом у которого в свое время работал Гук. С помощью пневматической машины, которая откачивала воздух из стеклянного сосуда с находившимся в нем звонком, Бойль установил закон уменьшения интенсивности звука при разрежении воздуха (1660). Его эксперименты продемонстрировали очень важную связь между источником звука и средой.

Наконец, еще одной проблемой занимались в XVII веке — экспериментальным определением скорости звука. Основным методом, которым пользовались исследователи, был метод, предложенный еще Галилеем, заключающийся в измерении интервала времени между моментом светового восприятия взрыва и моментом прихода звука взрыва к наблюдателю. Мерсенн определял это время по числу ударов пульса, и скорость звука, им определенная, была завышена — 450 м/сек.

Пьер Гассенди (1592—1655), работая в Париже, определил в 1635 году скорость звука в воздухе для ружейного выстрела и для выстрела пушки, которые отличались между собой высотой: резкий, высокий звук у ружья и глухой, низкий — у пушки. Так был установлен важный факт независимости скорости звука от его высоты и опровергнута точка зрения Аристотеля, утверждавшего, что высокие тона распространяются быстрее низких. Чтобы не возвращаться больше к этой проблеме, укажем, что в 1738 году Парижской академией наук были выполнены наиболее точные измерения скорости звука — 332 м/сек при 0°С. Они отличаются от измерений, полученных уже в наше время, меньше чем на 1% (331, 45 $\pm$ 0,05 м/сек). История знает не так много примеров, когда бы измерения физических величин выдержали испытание временем в течение двух столетий.

В 1740 году итальянец Бианцони показал, что скорость звука возрастает с повышением температуры (факт, имеющий отношение к тому, что некоторые музыкальные инструменты изменяют свой строй с изменением температуры окружающей среды).

В истории музыкальной акустики, пожалуй, наиболее выдающееся положение занимают струны. И в самом деле, струны как источник колебаний используются в большой группе музыкальных инструментов. На примере колебаний струн были открыты многие законы акус-

тики, так как колебания струн относительно легко наблюдать и исследовать. Сравнительно простая картина физического процесса в колеблющейся струне облегчает рассмотрение неясных вопросов, связанных с природой музыкальных тонов.

Выше уже было сказано об основных законах колебаний струн, полученных экспериментальным путем Мерсенном в 1636 году. Эти законы прекрасно иллюстрируются струнными музыкальными инструментами. Различные тона, например на гитаре или скрипке, получаются путем укорачивания колеблющейся части струны, а при настройке струн этих инструментов их точную высоту получают изменением натяжения при одной и той же длине струн.

В то время, когда Ньютон выпустил второе издание своих «Начал», в 1700—1707 годах Парижская академия наук опубликовала труды Жозефа Савера (1653—1716), в которых рассматриваются различные источники звука музыкальных инструментов. Так, значительное внимание уделено Савером рассмотрению законов колебания струн. Основные результаты исследований Савера заключаются в следующем:

1. Струна, натянутая между двумя опорами, может колебаться по частям. При этом отдельные точки струны отклоняются от своего положения равновесия очень сильно, и эти точки Савер назвал пучностями; другие совсем не движутся — их Савер назвал узлами. Эти названия так до сих пор и существуют в науке.

2. Колебания отдельных частей струны соответствуют более высоким частотам по сравнению с частотой, при которой струна колеблется целиком, без неподвижных точек — узлов.

3. Более высокие частоты струны находятся в кратном отношении к частоте простого колебания. Приоритет в терминологии здесь также принадлежит Саверу — частоты, соответствующие колебаниям отдельных частей струны, были названы им высшими гармоническими тонами, а самый низкий звук, соответствующий простому колебанию целой струны, был назван основным тоном. Вся эта терминология, введенная в 1700 году, так и сохранилась без изменения до наших дней.

4. Колеблющаяся струна может производить звуки, соответствующие нескольким гармоническим тонам, взятым одновременно. Последний важный факт уже близко подходит к разгадке свойств музыкального звука.

Савер не ограничивался одними экспериментальными исследованиями и попытался теоретически, правда на основе каких-то сомнительных предположений, рассчитать частоту колебания струны. Однако точное динамическое решение задачи о колеблющейся струне первым получил английский математик Брук Тейлор (1685—1731), больше известный как автор теоремы о бесконечных рядах. Тейлор рассчитал частоту тона струны (основного тона) в зависимости от ее длины, веса, натяжения и ускорения силы тяжести. Этими расчетами Тейлор положил начало математической физике, являющейся теоретической основой музыкальной акустики. Частота основного колебания струны по расчетам Тейлора хорошо согласовывалась с

эмпирическими формулами, выведенными для струны еще Мерсенном и Галилеем. Тейлор рассмотрел только один частный случай колебания струны, то есть колебание основного тона,— математический аппарат того времени был еще очень слаб. Но он проложил первый путь, и задача, решенная им, сразу же привлекла внимание самых выдающихся математиков XVIII века.

Трудами француза Жана Д'Аламбера (1717—1783), швейцарцев Даниила Бернулли (1700—1782) и Леонарда Эйлера (1707—1783), прожившего большую часть своей жизни в России, и итальянца Лагранжа (1736—1813) была теоретически решена проблема колеблющейся струны и получено дифференциальное уравнение ее движения в той форме, которая используется в математике наших дней.

Если придерживаться строгой хронологии событий, то первым математиком, решившим физическую сторону проблемы движения струны с теоретической точки зрения, был Эйлер. Начало работ Эйлера по теории колебания струны относится к 1739 году, когда в своем труде «Опыт новой теории музыки» он установил, что скорость распространения волны по струне не зависит от длины волны возбуждаемого звука. Эйлер вообще внес наиболее существенный вклад в теорию стоячих колебаний струн.

Д'Аламбера обычно называют первым, кто получил (1747) дифференциальное уравнение колеблющейся струны в той форме, в которой его обычно записывают теперь. Д'Аламбер нашел общее решение этого знаменитого волнового уравнения в виде волн, бегущих в разных направлениях по струне. Д. Бернулли в «Ученых записках» Берлинской академии наук опубликовал теоретическое объяснение гармоник струны. Он показал, что возможно одновременное колебание многих независимых частей струны, дающих множество простых гармонических колебаний. Перемещение же отдельных точек струны есть алгебраическая сумма перемещений, соответствующих простым гармоническим составляющим. Здесь Бернулли выдвигает и обосновывает принцип одновременного сосуществования малых колебаний, не влияющих друг на друга,— так называемый принцип «суперпозиции». Надо сказать, что этот плодотворный принцип не сразу нашел признание даже у выдающихся математиков. Свой путь решения задачи о колебании струны предложил в 1759 году Лагранж в солидной статье, адресованной Туринской академии. Лагранж представил струну состоящей из конечного числа частиц с одинаковой массой, находящихся на одинаковых друг от друга расстояниях и связанных общей нитью. Лагранж находит сначала колебания этих нескольких участков струны и затем получает решение при произвольно большом числе участков.

Множество противоречивых теорий колебаний струн выдвигалось математиками XVIII века, множество мнений сталкивалось при обсуждении этих вопросов, и, к сожалению, споры таких выдающихся математиков, как Бернулли, Д'Аламбер, Эйлер и Лагранж, относительно природы решений дифференциальных уравнений для струн выливались на страницах научных журналов иногда в резкие выпады

друг на друга, в грубую клевету. Каждый из них защищал свою точку зрения и не всегда беспристрастно рассматривал теорию противника. Но как бы то ни было, в результате ожесточенных споров был заложен фундамент тех методов математической физики, с помощью которых сейчас во всем мире очень интенсивно изучают и рассчитывают музыкальные инструменты. Исследования колебаний струн занимали видное место в теоретических работах ученых XVIII века, но проблемы колебаний других источников музыкальных звуков также не оставались без внимания. Выше уже говорилось, что Ньютон рассчитывал длины волн, излучаемых трубами. Эти расчеты основывались, между прочим, на экспериментальных работах Савера. В своих мемуарах (1700—1707) Савер рассматривает явление биений, возникающих при одновременном звучании двух органных труб, лишь незначительно отличающихся по частоте. Само явление биений было давно хорошо известно конструкторам органов, но заслуга Савера в том, что он указал на важность наблюдаемого явления и на его основе и истолковании разработал метод определения числа колебаний. Биения органных труб, как объяснял Савер, возникают от того, что колебания двух близких по высоте труб периодически совпадают и расходятся. Например, если частота одного звука трубы 32 колебания в сек., а частота звука второй трубы — 40 колебаний в сек., то конец пятого колебания первой трубы ($32 \times 5 = 160$) совпадает с концом четвертого колебания второй трубы ($40 \times 4 = 160$). В этом случае происходит усиление суммарного колебания, то есть возникает биение. Савер установил, что частота биений равна разнице частот органных труб, и с помощью этого наблюдения вывел свой метод расчета частоты неизвестного колебания, когда известна частота одного звука и число биений в секунду при одновременном звучании двух тонов.

Открыв метод, Савер нашел ему и практическое применение: с его помощью он пытался определять границы восприятия частоты колебаний человеческим ухом. По его измерениям частота самых низких звуков, слышимых человеком, равна 25 колебаниям в сек., а самых высоких — 12 800. Эти пределы еще долгое время будут уточняться.

Звуковые колебания в трубах интересовали и Эйлера. Молодой швейцарец еще в 1727 году, когда ему было всего 20 лет, в своей «Диссертации о физике звука», написанной в Базеле, рассматривал гармонические тоны в трубах. Физическая сущность процессов в трубах уже тогда была правильно объяснена Эйлером, и это объяснение не отличается от того, которым пользуются сейчас. Вклад Эйлера в развитие музыкальной акустики долгое время недооценивался, и его огромное влияние на развитие акустики вообще признано лишь сравнительно недавно. Из духовых музыкальных инструментов Эйлера особенно интересовала флейта. Работы Эйлера 1759 и 1766 годов посвящены проблемам звуковых колебаний в трубах. По этому вопросу между Эйлером и Лагранжем велась оживленная переписка. Лагранжу в 1759 году удалось теоретическим путем рассчитать приблизительное значение частот гармонических тонов открытых и закрытых органных труб.

Наконец, в XVIII веке была заложена основа теории распространения звуковых волн в воздухе. И опять же трудами Эйлера, Д'Аламбера и Лагранжа. Сейчас уже невозможно установить с точностью роль каждого из них в деле создания этой теории. Д'Аламбер, например, в 1747 году вывел волновое уравнение для струны и указал, что оно может быть применено и к звуковым волнам. Однако никаких подробностей он при этом не сообщил. Эйлер близко подошел к волновому уравнению в работе «О распространении звука» (1759) и мог бы получить точное решение, какое было получено в XIX веке, если бы математическая ошибка не увела его в сторону. Физика же звукового явления была дана им точно.

Отцом экспериментальной акустики по праву считают Эрнеста Хладни (1756—1827). Наибольшую известность принесли Хладни опыты по исследованию колебаний пластин с помощью открытого им метода акустических, или звуковых «фигур», которые произвели огромное впечатление на современников. Сейчас их называют «фигурами Хладни». Свой метод, заключающийся в том, что песок, покрывающий тонким слоем колеблющуюся пластинку, указывает расположение узловых линий, Хладни изложил в знаменитом трактате «Открытия в теории звука», изданном в Лейпциге (1787). Эти экспериментальные исследования являются до сих пор образцом изящного эксперимента; они поставили новую задачу математической физике — задачу о колебании мембраны.

В музыкальной акустике «фигуры Хладни» — историческая веха. Хладни наглядно показал, что узловые линии наблюдаются не только на струне, но и существуют на пластинках и мембранах. Но этим не исчерпывается вклад Хладни в акустику. Он первым исследовал колебания вилочного камертона, установил законы колебаний стержней при различных способах возбуждения — посредством удара, трения и т. д., исследовал продольные волны в твердых телах, занимался проблемой измерения скорости звука в твердом теле, открыл крутильные колебания стержней. Наконец, Хладни вслед за Савером выполнил новые экспериментальные измерения верхней границы слышимости звука. По Хладни эта граница соответствует 22 000 колебаний в секунду, что почти в два раза выше границы, данной Савером. Надо сказать, что эти измерения (естественно, с применением более совершенных методик) производятся до сих пор и диапазон слышимости по частоте в различной литературе по акустике указывается различный.

Знаменитое руководство Хладни «Акустика», в котором он описывает все основные сделанные им открытия в экспериментальной акустике, появилось уже в другом столетии — в 1802 году.

XVIII век в истории акустики, и в частности музыкальной акустики, занимает почетное место. Было начато исследование многих акустических явлений на достаточно солидной для того времени теоретической и экспериментальной базе, в акустику врываются и даже, более того, на ее основе разрабатываются выдающиеся идеи зарождавшейся высшей математики и математической физики. При разработке математических идей акустические явления рассматривались

как механические процессы, то есть как механические движения колеблющихся тел и частиц среды, в которой распространяется звук. Благодаря Ньютону акустика превратилась в раздел механики. Проблемы акустики с величайшим упорством ставились и решались выдающимися математиками того времени, хотя математический аппарат Исаака Ньютона и Готфрида фон Лейбница был еще не в состоянии справиться со сложными проблемами колебаний. В XVIII веке был введен и сам термин «акустика» для названия науки о звуке (первым предложил такое название Жозеф Савер). Некоторые ученые называют восемнадцатый век «золотым веком математической физики», и это, наверное, не преувеличение. А так как математическая физика является теоретической основой музыкальной акустики, то понятно, какое огромное значение имел этот век для нее.

Конец XVIII и начало XIX века отмечены многочисленными попытками теоретического анализа волн звука. Имя Томаса Юнга (1773—1829) оставило здесь заметный след. Юнг — врач по профессии, его медицинская диссертация была посвящена исследованию человеческого голоса. (Между прочим, врачом по профессии, как и Юнг, был и знаменитый лорд Рэлей, более прославивший физику, нежели медицину, но о нем речь позднее.) Юнг первый дал наглядное объяснение теории волнового движения. Особенно интересны опыты Юнга со струнами. Было замечено, что если струну возбуждать щипком или смычком на различном расстоянии от конца, то тембр струны будет в некоторой степени меняться: чем ближе к одному из концов находится точка возбуждения струны, тем более яркий и более блестящий, более живой и резкий оттенок звука струны. В чем причина этого явления? Юнг показал, что дело здесь в том, что при изменении точки возбуждения струны изменяется состав сложного звукового колебания струны. А именно, когда возбуждается какая-либо точка струны, то все высшие гармоники, имеющие в этой точке узел, исчезают из звука. Можно сказать и по-другому: в звуке струны остаются только те гармоники, которые имеют пучность в точке возбуждения. Например, будем защипывать струну ровно в середине, тогда вторая гармоника, имеющая в середине струны узел, не возбуждается. В действительности дело обстоит сложнее и в реальном звуке струны можно все же обнаружить вторую гармонику, но сильно ослабленную. Юнг был бы полностью прав, если бы сказал, что гармоники устраняются не полностью из звука, а лишь существенно ослабляются.

В 1816 году Пьер Симон Лаплас (1749—1827) нашел наконец разгадку несоответствия скорости звука, вычисленной теоретическим путем Ньютоном почти 130 лет до него,— скорости звука, наблюдаемой при непосредственном экспериментальном определении. Скорость звука по Ньютону получалась почти на 10% меньше фактической. Лаплас объяснил ошибку в теоретических предположениях Ньютона. Тот считал, что при прохождении звука в воздухе упругие колебания частичек воздуха происходят при постоянной температуре. Но нужно было учесть, что звук движется с такой скоростью, что возникающие при сжатии и расширении нагревание и охлаждение не

успевают равномерно распределиться по всей массе воздуха. В результате происходит возрастание скорости звука. Это и было доказано Лапласом.

Огромное влияние на развитие музыкальной акустики оказало обоснование Жаном Фурье (1768—1830) теоремы, утверждавшей, что любую форму колеблющейся струны возможно представить бесконечной суммой синусоид. Теорема Фурье позволяла сложное колебание струны представить отдельными простыми колебаниями, рассмотрение которых намного проще, чем рассмотрение суммарного сложного колебания. 1822 год, когда появилась теория рядов Фурье, считается годом создания научной базы для музыкальной и физиологической акустики.

Теория колебаний гибкой мембраны, важная для понимания природы звуков, издаваемых барабаном, впервые была с успехом рассмотрена французским математиком С. Д. Пуассоном (1781—1840) в 1829 году, хотя он и не сумел до конца решить задачу о колебании круглой мембраны. Пуассону принадлежит честь установления двух видов волн в твердых телах достаточно большого размера: поперечных и продольных. Эта работа, посвященная исследованию изотропных (то есть имеющих одинаковые свойства в любых направлениях) упругих тел, была по достоинству оценена лишь век спустя, когда стали заниматься изучением распространения волн в конструкциях: в деталях корпусов музыкальных инструментов, машинах.

Экспериментальными исследованиями продольных волн в пластинах почти в то же самое время (1827) занимался француз Феликс Савар (1791—1841). В экспериментах им использовался метод песчаных фигур Хладни. Савар наблюдал любопытное явление. Он закреплял круглую пластинку, например в центре, и возбуждал ее смычком. Узловые линии, указываемые песком, располагались так, что смычок оказывался по центру вибрирующего сегмента. Любопытное начиналось после того, как прекращалось воздействие смычка на пластинку,— система узловых линий, остававшаяся неподвижной во время действия смычка, начинала вдруг медленно колебаться или даже вращаться. Объяснение явлению было дано позже, и заключалось оно в том, что вращение узловых линий может быть только на неоднородной пластинке. Неоднородности вызывают перераспределение колеблющихся частей пластинки после прекращения возбуждения. В 1833 году Чарлз Уитстон экспериментировал с квадратными деревянными пластинками, причем направление годичных слоев было параллельно одной паре сторон. Эти эксперименты — одни из первых, относящихся к исследованиям деревянных тонких пластин, которые в музыкальных инструментах являются деками. Уитстон нашел, что, выбирая различные способы возбуждения, можно получить узловые линии либо параллельные годовым слоям, либо перпендикулярные им. И в обоих этих случаях тон пластинок был разным. И это естественно, поскольку древесина — анизотропный (разнородный в разных направлениях) материал — и жесткость на изгиб во взаимно перпендикулярных направлениях в деревянной пластинке различны.

Учение о слуховых ощущениях — один из важных разделов музы-

кальной акустики. Интерес к свойствам органа слуха, возникший на основе стремления понять природу звучания и попыток установить закономерности, связывающие физические характеристики музыкального звука с его субъективными характеристиками, особенно возрос после работы Георга Симона Ома (1787—1854), автора знаменитого в электротехнике «закона Ома». В 1843 году он выдвинул свою оригинальную теорию восприятия звука. Основные положения «закона Ома», уже в акустике, таковы: простой музыкальный тон возникает благодаря синусоидальному колебательному движению какого-либо вибратора.

Экспериментально Ом установил, что если вибрирующее упругое тело совершает простое (по закону синуса) колебание, то слышен простой тон. То есть простой тон, воспринимаемый ухом, неотделим от простого колебания. Если нет простого колебания, то нет и простого тона.

Музыкальные звуки являются сложными по своему составу и содержат тоны, соответствующие простым синусоидальным колебаниям.

Тембр музыкального звука по Ому определяется комбинацией простых тонов, имеющих кратные частоты ($f : f_n = 1:2:3$ и т. д.). Здесь f — частота основного тона, f_n — частота обертона с номером n.

Человеческое ухо способно разложить звук на ряд тонов, то есть оно способно слышать основной тон и его обертоны (верхние тоны).

Работы, проведенные в этом направлении другими исследователями, показали, что к закону Ома должны быть сделаны поправки: вне действия закона должны быть оставлены компоненты, которые находятся вне пределов слышимости по высоте, ухо неспособно воспринимать по отдельности тоны, имеющие очень близкие частоты, и, наконец, колебания должны иметь достаточную интенсивность, ниже определенного уровня которой не имеет смысла применение закона Ома.

Теория Ома базируется на представлении простых тонов в виде синусоидальных колебаний. И действительно, гармоническое движение в акустике занимает исключительно важное место. Однако здесь необходимо сделать такую оговорку, может быть даже несколько неожиданную: чистых синусоидальных колебаний в природе не существует. Синусоида — это кривая, изображающая движение, которое никогда не начиналось и никогда не кончается, то есть существует всегда. В природе же любое движение когда-либо было начато и потом, когда-либо, будет закончено. Чтобы обойти это противоречие, считают, что если колебание достаточно длительное, то его можно принять за синусоидальное, гармоническое.

Закон Ома не учел также важность несинусоидальных процессов в звуке: характер нарастания и спада колебаний, играющий существенную роль в восприятии тембра. Это будет сделано намного позже Ома.

Но работа Ома затронула важные для музыкальной акустики во-

просы и открыла новый этап в истории науки о звуке, стала толчком к проведению многочисленных опытов по анализу звука.

На вторую половину XIX столетия приходится расцвет деятельности двух великих физиков, экспериментаторов и теоретиков одновременно, заложивших фундамент современной музыкальной акустики. Один из них — Герман фон Гельмгольц (1821—1894), другой — Джон Вильям Стретт (1842—1919), более известный под именем лорда Рэлея. До настоящего времени трудно найти серьезный научный труд по акустике, в котором не было бы ссылок на труды этих ученых. Без изучения книги Гельмгольца «Учение о слуховых ощущениях» (1862) и книги Рэлея «Теория звука» (1877) не обходится ни один специалист в области акустики. Эти книги не посвящены непосредственно музыкальной акустике, но вопросы, которые в них рассматривались, целиком принадлежат акустике не только физической и физиологической, но и музыкальной. В этих трудах не только обобщено все основное, что было уже ранее сделано, но в значительной степени разработано вновь благодаря экспериментальным и теоретическим исследованиям авторов. Обе книги являются шедеврами в музыкальной акустике, как по глубине рассмотрения затронутых в них вопросов, так и по методической продуманности изложения материала. Это классические произведения, которые навсегда сохраняют свое непреходящее значение.

В 1868 году профессор Джордж Стокс (1819—1903) показал, насколько слабо передаются в окружающее пространство колебания от поверхности струны. Стокс сравнил действительно слышимый звук струны и звук, который распространялся бы в том же направлении, если бы не было обтекания воздуха вокруг струны при ее колебаниях. Для струн рояля в области первой октавы звук примерно в 40 000 раз слабее, чем если бы он был у струны без обтекания воздуха. В одной из своих работ Стокс замечает: «Это показывает жизненную важность деки в струнных инструментах. Хотя амплитуда колебаний частиц деки крайне мала сравнительно с амплитудой колебания частиц струны, но поскольку дека представляет собой широкую поверхность, соприкасающуюся с воздухом, она способна возбуждать громкие и звучные колебания, в то время как струна, натянутая абсолютно жестко, возбуждала бы непосредственно в окружающем воздухе колебания настолько малые, что они были бы почти или даже совсем не слышны».

В 1876 году А. М. Мейер описал так называемое явление маскировки, при котором звуки значительной интенсивности могут быть заглушены более низкими звуками достаточной интенсивности, но никакой звук, даже если он и очень интенсивен, не заглушает одновременно слышимого звука более низкой частоты.

К 1876 году относятся опыты Прейера по определению дифференциального порога ощущения изменения частоты, иначе говоря — по вопросу о том, на какое количество колебаний необходимо изменить частоту звука, чтобы это изменение было заметно на слух. В данном случае имеется в виду последовательное предъявление слушателю двух звуков. Прейер на основании многочисленных опытов установил,

что разницу по частоте менее 0,20 колебания в секунду человеческое ухо уже не различает ни при какой частоте. Но так как чувствительность уха зависит от частоты, то при других значениях последней дифференциальный порог другой: при 120 Гц едва различается разность 0,4 колебания в сек., при 500 Гц различаются 0,3 колебания, а на частоте 1000 Гц — 0,5. Интересно в связи с этим проследить изменение стандарта частоты тона *ля* первой октавы, который к концу XIX века приближается к постоянному значению. Вообще стандарт высоты в ходе истории современной музыки изменялся довольно существенно. Во времена Генделя и Моцарта, в начале XIX века, частота колебаний *ля* первой октавы равнялась 422 Гц, а в начале XX века она доходила до 461,6 Гц (в американских оркестрах). Особенно интересно прослеживается стандарт высоты, применявшийся Лондонским филармоническим оркестром: в 1826 году *ля* = 422 Гц, а уже в 1845 году он поднялся до 455 Гц.

На штутгартской конференции в 1834 году частота тона *ля* первой октавы была принята в 440 Гц.

Во Франции стандарт *ля* равнялся 435 Гц и был установлен благодаря исследованиям камертонов Кёнигом (1859). В 1891 Международный комитет рекомендовал принять в Европе и Америке «Интернациональный стандарт высоты» — *ля* = 435 Гц при температуре 20°С. Кроме того, было предложено принять в качестве компромисса высоту *ля* = 438 Гц, как среднюю между штутгартским 440 и французским 435 Гц. С практической точки зрения, очень мало различие между частотами 435, 438 и 440 Гц и должен быть один номинальный стандарт. В начале нашего века склонны были принимать за стандарт 435 Гц, с середины нашего века больше тяготеют к 440 Гц, однако до сих пор в разных странах мира существуют оба эти стандарта, несмотря на то что в большинстве стран все же установлен стандарт *ля* = 440 Гц, в том числе и в нашей стране (в соответствии с ОСТ 7710). Однако и этот стандарт не всегда выдерживается. По некоторым причинам в больших оркестрах, в состав которых входят духовые инструменты, строй завышен примерно до 443 Гц.

В конце XIX века были осуществлены и наиболее глубокие исследования границ частот, воспринимаемых ухом. Большинство исследователей сходилось на том, что границы частот еще слышимых человеческим ухом звуков находятся в пределах 20—20 000 Гц. Но расхождение значений этих границ у разных исследователей довольно существенное: от 8 до 30 Гц на нижнем диапазоне и до 16 000—40 000 Гц на верхнем диапазоне. Самая верхняя граница — 40 000 Гц — дается самим Гельмгольцем. Сейчас в большинстве справочников верхняя граница определяется в 20 000 Гц.

Чем объяснить такое значительное расхождение в оценке границ слышимости звуков? Неужели сейчас человек стал хуже слышать высокие частоты? И, может быть, действительно виноват в этом наш шумный век и человек немного оглох от шумной эпохи индустриализации? По-видимому, расхождения в оценке границ слышимости объясняются индивидуальными способностями людей к восприятию звуков.

Со времен древних греков история музыкальной акустики была полна поисками музыкальных строев, пригодных как для инструментов со свободной интонировкой, так и для инструментов с фиксированным звукорядом,— например, у клавишных струнных и у язычковых инструментов.

Уже в древние времена греки предложили музыкальную шкалу, основанную на делении струны в кратном отношении. Но даже сами изобретатели этой системы, философы школы Пифагора, вряд ли слышали хоть один инструмент, в котором бы была реализована их система музыкального строя. Короче говоря, пифагоров строй полностью никогда не был реализован в музыкальных инструментах. Да и существующий сейчас, всеми общепризнанный равномерно-темперированный строй при тщательном исследовании оказывается на практике лишь приближенно реализуемым. Первая половина нашего столетия в области музыкальной акустики характеризуется интенсивными исследованиями всевозможных натуральных и искусственных отклонений и нерегулярностей в звучании музыкальных инструментов. К таким нерегулярностям относятся процессы вибрато, переходные процессы, иначе говоря, изменения тембра звука в продолжении звучания одного тона, а также всевозможные отклонения от жесткой, фиксированной шкалы частот. Концепция постоянства тембра звука, принятая в качестве закона в прошлом веке, оказалась для нашего двадцатого столетия полностью несостоятельной в свете новой точки зрения на музыкальный звук как на непрерывно изменяющееся во времени по амплитуде, частоте, тембру и длительности звуковое явление. Оказывается, что не только инструменты, на которых исполнитель по своему усмотрению может искусственно менять тембр (как, например, при игре вибрато на скрипке), но и инструменты, в которых, казалось бы, принципиально невозможно получить какое-либо «оживление» звука,— рояль, язычковый инструмент — не имеют строго постоянный по каким-либо параметрам звук. Правильнее будет сказать, что ни один из существующих музыкальных инструментов, кроме, может быть, электромузыкальных, не имеет абсолютно стабильного постоянства таких параметров, как частота, интенсивность и тембр звука. С этим связаны «блеск» и «живость» звучания музыкальных инструментов, дающие возможность композитору выражать человеческие чувства, а слушателю сопереживать их. В чем же состоит причина такого воздействия музыкального звука на человека, если иметь в виду воздействие звуковых колебаний на человеческое ухо и сознание человека? Этот вопрос связан с природой звукообразования в музыкальных инструментах, и он стоит в центре внимания ученых XX века. Человеческое ухо как приемник звуковых колебаний изучалось давно, и интерес к вопросу о том, каким образом человеческое ухо воспринимает колебания, оказал большое влияние на развитие музыкальной акустики.

Основополагающие понятия теории слуха были разработаны трудами Ома и Гельмгольца. Невозможно, хотя бы даже вкратце, упомянуть многочисленных исследователей, которые занимались вопросами слуха. Здесь можно назвать только единицы. Работы Г. Бекеши были

посвящены исследованиям физиологических факторов, определяющих слуховое впечатление; ощущение громкости изучалось Х. Флетчером и В. Мансеном; влияние низкочастотных переходных процессов на ощущение расстояния доказал Бекеши в 1938 году. Х. Бакгауз установил, что переходные процессы очень важны для тембральной окраски звука; например, если из музыкальной ноты устранить каким-либо образом начальный процесс возникновения звука, то тембр ноты существенно изменится. В основном указанные открытия были сделаны в первой четверти этого века.

Наряду с этим исследователи стараются глубже проникнуть в тайны образования звуковых колебаний в музыкальных инструментах.

Е. Г. Ричардсон в 1931 году исследовал процесс звукообразования в духовом музыкальном инструменте, и ему, в частности, принадлежит термин «краевой тон». Струя воздуха в духовом инструменте попадает на край трубки, разбивается этим краем, так что образуются завихрения воздуха, в результате которых в воздушном потоке создаются периодические сжатия и разрежения, то есть колебания воздушного столба. В 1936 году вышел труд Филиппа Морза «Колебания и звук». В этой книге применены методы современной математической физики к описанию многих вопросов классической акустики.

Начиная с 20-х годов XX века в нашей стране интенсивно проводятся исследования вопросов музыкальной акустики, создается ряд научных учреждений, в которых ставятся и решаются проблемы построения музыкальных инструментов и технологии их изготовления. Наиболее известным учреждением, в котором в основном и были сосредоточены эти работы, следует считать Научно-исследовательский институт музыкальной промышленности РСФСР.

Выдающаяся группа советских ученых во главе с академиком Н. Н. Андреевым впервые в мире в широком, комплексном плане начала заниматься вопросами звукообразования в музыкальных инструментах, проблемами качества, методами акустических испытаний и расчетов. Академиком Н. Н. Андреевым дан метод определения акустических свойств древесины как материала, идущего на изготовление дек музыкальных инструментов.

Профессору А. В. Римскому-Корсакову принадлежат основополагающие работы в области струнных инструментов — клавишных, смычковых и щипковых.

Теми или иными проблемами музыкальной акустики занимались в 40—50-х годах С. Н. Ржевкин («Слух и речь в свете современных физических исследований», 1936; «Курс лекций по теории звука», 1960), Н. А. Гарбузов, выдвинувший теорию зонной природы слуха («Музыкальная акустика», 1954 г.), П. Н. Зимин, занимавшийся вопросами истории клавишных инструментов, расчетом духовых музыкальных инструментов, и другие.

Оценка звуковых и игровых качеств музыкальных инструментов — особенная проблема в акустике. Исторически сложилось так, что эта проблема в основном решалась для скрипки. Данный инстру-

мент, как никакой другой, приковал к себе многочисленных исследователей. Возможно, свою роль сыграла здесь слава старинных итальянских мастеров скрипичного дела, секреты которых не дают покоя современным скрипичным мастерам, возможно — причина в красоте звука скрипки. Как бы то ни было, но для скрипки можно считать установленным характер спектра резонансного корпуса, соответствующий скрипкам разного класса качества, а следовательно, установлен такой физический параметр, который можно контролировать и с помощью которого можно добиться требуемого тембра инструмента. А. В. Римский-Корсаков доказал возможность акустического копирования скрипок. Он пишет: «Опыт показывает, что схожесть характеристик излучения в области резонанса объема воздуха (260—270 Гц), главного резонанса корпуса (400—500 Гц) и в области от 700 до 1500 Гц уже дает хорошие результаты. Опытный музыкант, прослушивая со стороны, в этом случае может и не отличить звука оригинала от звука копии. Для такого копирования звука требуется простой и, главное, нетрудоемкий способ снятия частотных характеристик излучения инструмента» [5, *254*].

В связи с установлением роли спектра для оценки качества скрипки возникает вопрос опознания принадлежности спектра того или иного типа к тому или иному классу качества, или иначе — к тому или иному типовому спектру инструмента. Здесь фактически поставлена другая проблема, а именно проблема распознавания звуковых образов. Музыкальные звуки являются сложными звуковыми сигналами. Можно говорить о языке звуков, как это делает Л. Л. Мясников в книге «Автоматическое распознавание звуковых образов» (1970). Музыкальные инструменты говорят на своеобразном языке. Один инструмент имеет яркий тембр, другой — глубокий тембр, третий, может быть,— гнусавый. Нужно научиться понимать язык инструмента, понимать слова и грамматику языка, и — уметь переводить этот язык на тот, которым мы говорим.

II. ОСНОВЫ МУЗЫКАЛЬНОЙ АКУСТИКИ

Рассмотрим теперь современные понятия музыкальной акустики и принципы звукообразования в основных группах музыкальных инструментов.

Источники звука в музыкальных инструментах, которые настраиваются на определенную высоту тем или иным механическим способом, делятся по типу излучателей на несколько групп [6, 7]:

а) источники с колеблющимися струнами;
б) источники с колеблющимися язычками и стержнями;
в) источники с колеблющимися мембранами;
г) источники с колеблющимися пластинами;
д) источники с колеблющимися столбами воздуха (в трубах).

Во многих трудах по акустике констатируется факт распространенности механических колебаний в природе и технике. Утверждается, что колебательные движения и колебательные процессы представляют собой наиболее часто встречающиеся явления нашего мира. Каким образом музыка связана со звуковыми, колебательными движениями? Музыка — искусство, отражающее действительность в звуковых художественных образах. Звук в музыке является носителем художественного образа, и он есть не что иное, как распространяющиеся в упругой воздушной среде механические колебания, воспринимаемые ухом.

Ощущение звука передается нашему уху с помощью механических колебаний частиц воздуха, создающих волны давления и разрежения. Задумаемся о природе этого давления. С очевидностью мы поймем, что в каждой отдельной точке воздушной среды в определенный момент времени это давление будет принимать вполне определенное значение и, следовательно, его можно будет выразить числом. Если же от исполнителей к ушам слушателей будет распространяться информация об игре оркестра в виде волн сжатия и разрежения, то с помощью маленького микрофона, установленного по нашему желанию в подходящем месте зала, мы сможем записать осциллограмму звуковых колебаний в виде кривой, показывающей, как изменяется звуковое давление в выбранной точке во времени. И вот эта осциллограмма, кривая какой-то сложной формы, будет содержать в себе всю информацию об оркестре, вернее о его звучании: и какие в данный момент времени инструменты играют, и то, что, например, вторая скрипка в первом ряду сыграла одну фальшивую ноту, кашлянул зри-

тель и т. п. И при этом никакого значения не имеет ни количество музыкантов, ни сложность исполняемой музыки — все это может быть представлено одним единственным графиком, характеризующим изменение звукового давления. Ухо и человеческий мозг на основе этого изменения давления вместе выполняют почти сверхъестественную работу по разгадыванию всей нужной информации и представляют ее нам в простой осознаваемой форме.

Если мы сравним записи звучания двух разных оркестров, например симфонического и джазового, то, к нашему удивлению, нам будет чрезвычайно трудно найти какое-либо характерное различие записанных кривых. Они очень сложны. Мы с гораздо большим успехом сможем заняться изучением сначала простейших колебаний. График простейшего колебания представляет собой синусоиду, которая в свою очередь является «портретом» чистого музыкального тона, который звучит довольно глухо и малоинтересен с музыкальной точки зрения, но имеет ярко выраженную определенность высоты (схема 1). Сравним синусоиду с графиком «белого шума» (схема 2), примером которого является шум аплодисментов или шум морского прибоя и который не имеет какой-либо определенной высоты. Кривая такого графика больше похожа на случайный, хаотичный набор импульсов.

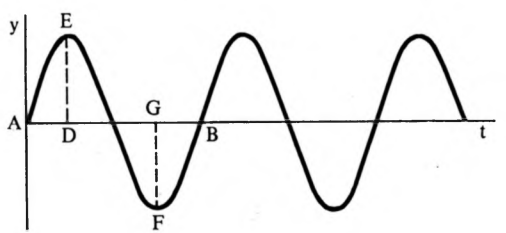


Схема 1. Простое гармоническое колебание
AB — период; DE и GF — амплитуда

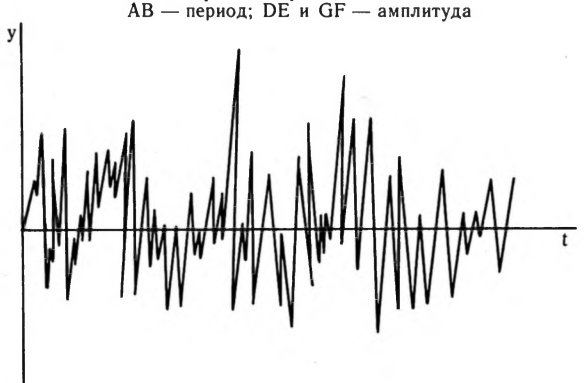


Схема 2. Белый шум

Схемы 1 и 2 представляют два крайних по свойствам звука. Можно сказать, что все другие сложные звуки находятся между этими двумя крайностями: полной регулярности и полной нерегулярности. Начнем изучение простейших колебаний.

Физическая сущность колебательных процессов, происходящих в вибраторах музыкальных инструментов, различна. Причины колебаний, например, струны, возбужденной ударом, отличаются от причин колебаний язычка в проеме голосовой планки, на который действует поток воздуха, и совсем другая причина колебаний столба воздуха в трубке духового музыкального инструмента. Но даже первое знакомство с законами колебаний вибраторов музыкальных инструментов обнаруживает много одинакового в самих колебательных движениях этих вибраторов.

Благодаря схожести различных колебательных процессов для музыкальных инструментов оказалось возможным выделить два основных типа колебаний: 1) свободные колебания, то есть такие, какие совершает вибратор, первоначально возбужденный и затем предоставленный самому себе. Пример свободных колебаний дает струна фортепиано, ударенная молоточком, деревянная пластинка ксилофона, возбужденная колотушкой и т. д.; 2) вынужденные колебания, то есть такие, какие совершает вибратор музыкального инструмента, на который непрерывно воздействует какая-либо внешняя сила. Если это язычок в аккордеоне или баяне, то внешней силой является поток воздуха; если это струна скрипки, то внешняя сила возникает благодаря трению смычка о струну и т. д.

Укажем на основное различие этих типов колебаний: при свободных колебаниях внешняя возбуждающая сила действует только в первоначальный момент, дальше вибратор колеблется самостоятельно, свободно, на него уже не действует никакая сила (кроме сопротивления воздуха и сил трения в материале вибратора и его опорах). При вынужденных же колебаниях внешняя возбуждающая сила постоянно воздействует на вибратор. В результате такого различия в первом случае колебания относительно быстро прекращаются, во втором — они длятся так долго, как долго существует внешняя сила.

Рассмотрим более подробно оба типа колебания.

1. Свободные колебания вибраторов в музыкальных инструментах

Колебательные движения в самом общем виде — это движения туда и сюда, из стороны в сторону. Сравним между собой, например, колебания ветки дерева при порывах ветра разной силы и колебания точки, взятой на середине струны. И ветка дерева и струна совершают движения «из стороны в сторону». Однако оба эти движения принципиально различаются по характеру. Ветка каждый раз может отклоняться на различное расстояние, и ее среднее положение в разные моменты времени будет различным. Точка же на струне всегда совершает движение около положения равновесия, которое она зани-

мает тогда, когда находится в покое. Это первое отличие. Второе отличие более важное. Оно заключается в том, что точка на струне проходит определенное положение (например, положение равновесия) через равные промежутки времени. Движение ветки дерева такого признака не содержит: она проходит какое-либо фиксированное положение через разные промежутки времени. Наконец, есть еще два менее существенных отличия: путь, который проходит ветка, во много раз больше пути, проходимого точкой струны, но зато быстрота движения или иначе — скорость движения у струны гораздо больше. Для того чтобы характеризовать оба вида движения, первое обозначают как непериодическое, то есть неповторяющееся строго во времени, а второе — как периодическое, то есть повторяющееся регулярно во времени. Во времени периодически повторяются не только определенные положения точки, но и ее скорости и ускорения. В музыкальной акустике рассматриваются только периодические колебания и такие, периодичность которых нарушается незначительно.

При изучении колебаний обычно не интересуются положением точки в данный момент времени. Например, струна издает звук *ля*. В какой-то момент времени мы слышим этот звук, но он не определяется положением струны в данный момент времени, а зависит от всего процесса колебаний струны в целом. Установление общих закономерностей всего процесса в целом характерно для рассмотрения различных типов колебаний источников музыкальных звуков.

Посмотрим, каковы колебания точки, находящейся на торце вилки камертона. По движению одной точки еще нельзя судить о движении многих других точек вибратора, и правомерен вопрос: можно ли отождествлять колебания одной точки с колебаниями источника, на котором взята эта точка? Теория колебаний показывает, что такое отождествление хотя и незаконно во всех случаях, но часто весь процесс колебаний может быть представлен так же, как и движение одной-единственной точки.

Мы сказали, «посмотрим... колебания точки». Действительно, как сделать видимыми колебания точки на торце вилки камертона? Можно, конечно, мысленно представить себе, что вилки камертона попеременно то сближаются, то удаляются. Обычный камертон стандарта высоты *ля*[1] не позволит увидеть движение, но если взять большой камертон и прикрепить к одной вилке кусочек грифеля от карандаша, то движение можно сделать видимым. Нужно только быстро и легко провести грифелем на колеблющемся камертоне по полоске бумаги.

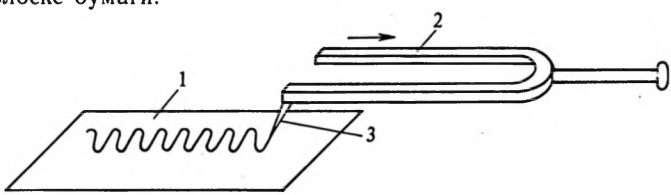


Схема 3. Визуализация колебаний ножек камертона
1 — бумага; 2 — камертон; 3 — карандаш

Таким образом, с помощью большого камертона мы смогли увидеть яснее движение торцов вилок и запечатлеть «портрет» колебания на бумаге. Колебания как бы развернулись во времени; подобный прием изображения колебаний на бумаге так и называется — «разверткой колебаний». Кстати сказать, развертка колебаний может быть осуществлена и другими путями, например, с помощью электронного луча на экране электронно-лучевой трубки.

Камертон можно заставить звучать не только ударом, но и проводя по нему смычком. В этом случае портрет колебаний изобразится плавной кривой — синусоидой. Синусоида — графическое представление какой-либо переменной величины, изменяющейся по закону синуса. В нашем случае так изменяется во времени положение точки на торце вилки камертона.

Многие физические явления в природе происходят в соответствии с законом синуса. Строгая математика считает синусоидальным только такое колебание, которое никогда не начиналось и никогда не кончается. Естественно, что реальные колебательные процессы никогда такому условию не отвечают. Все имеет свое начало и конец. Поэтому принято считать колебания синусоидальными, если они являются таковыми хотя бы на конечном, достаточно длительном отрезке времени. Важно подчеркнуть, что не сама синусоида представляет интерес, а переносимый ею признак, та информация, которая рассказывает нам о свойствах колебательной системы, о процессах, происходящих с настраиваемыми источниками звука. Человек слышит звук камертона именно потому, что барабанная перепонка в его ухе колеблется в такт с синусоидальными колебаниями камертона.

Выявление общих законов колебаний намного облегчается, если использовать графики колебаний, дающие наглядное представление о характере колебаний. Такой график можно получить либо с помощью прибора, как в вышеприведенном случае, либо вычертить, учитывая закономерности колебаний.

На схеме 3 горизонтальная ось точно совпадает с положением точки на торце вилки, когда камертон не колеблется. Горизонтальная ось — ось времени, и если провести в какой-то момент времени через эту ось перпендикуляр до пересечения с синусоидой, то точка пересечения покажет, на каком расстоянии находится вилка камертона от центрального положения, то есть положения равновесия.

Говорят, что точка совершает полное колебание, когда она из какого-то фиксированного положения, например из положения покоя, отклоняется в одну сторону, далее опускается до положения равновесия вновь, проходит его, отклоняется в другую сторону и снова возвращается в центральное положение. Время, в течение которого точка, совершающая колебания, проходит все промежуточные положения и возвращается к произвольно выбранному исходному, называется п е р и о д о м колебаний. Наибольшее отклонение точки от положения равновесия называется а м п л и т у д о й колебаний. Таким образом, точка совершает одно полное колебание, когда проходит расстояние, равное в сумме четырем амплитудам, а время, затрачен-

ное точкой на это движение, равно периоду. Например, период колебания камертона *ля*[1] равен 0,0022727272 с. Округленно 0,0023 с или 2,3 миллисекунды. Это значительно меньше времени, необходимого глазу для восприятия движения (около 0,1 с), поэтому мы и не в состоянии увидеть колебания ножек камертона *ля*[1].

Число колебаний или число периодов за одну секунду есть ч а с т о т а колебаний. Этот параметр обратно пропорционален периоду, и его можно вычислить, разделив единицу на период. Так частота для колебания с периодом 0,002273 с будет равна 1:0,00273 ≈ 440 колебаний в секунду. Единица частоты — г е р ц. Один герц — одно колебание в секунду, 440 Гц — 440 колебаний в секунду.

Для колебания, представленного на схеме 1, рассмотренные только что параметры — период, частота и амплитуда — постоянные во времени величины. Они постоянны и в первую, и во вторую, и в третью, и в последующие секунды. Но каким же образом постоянные величины могут представлять само движение точки? Мы еще не сказали об одной переменной величине, которая несет непосредственную информацию о движении и зависит от констант (постоянных величин) колебательного процесса. Эта переменная величина — о т к л о н е н и е колеблющейся точки от положения равновесия в данный момент времени. Когда отклонение максимальное, его называют амплитудой, как и было уже установлено выше. Если мы будем знать закон изменения отклонения y во времени, то тем самым будем знать практически все о данном процессе колебания. Графически закон изменения отклонения во времени уже представлен кривой на схеме, т. е. синусоидой. Поэтому остается только представить эту кривую с помощью соответствующей формулы:

$$y = A \cdot \mathrm{Sin}\ 2\pi f \cdot t, \qquad (1)$$

где: A — амплитуда колебания,
f — частота колебания ($f = \frac{1}{T}$; где T — период),
2π — постоянный коэффициент ($\pi = 3{,}14$),
t — текущее время,
y — отклонение колеблющейся точки от положения равновесия в данный момент времени t.

Обозначим произведение постоянного коэффициента 2π на частоту f буквой ω, которую назовем, в отличие от циклической частоты f, круговой частотой: $2\pi f = \omega$. Это обозначение будет использовано ниже.

Любое колебательное движение, совершающееся по закону (1), называется гармоническим колебанием. Ему соответствует звук камертона, колебания которого непрерывно поддерживаются смычком. В музыкальной акустике с понятием гармонического колебания связано понятие чистого тона. Именно чистый тон, взаимодействующий с другими чистыми тонами, является «объектом» настройки.

Изменения параметров гармонического колебания вызывают соответствующие изменения тона. Так, увеличение амплитуды вызывает увеличение громкости, а уменьшение или увеличение частоты — понижение или повышение тона. А существует ли связь между

амплитудой и частотой? Зависит ли частота от того, насколько сильно возбудили камертон или струну? Ответ — и да, и нет — может показаться на первый взгляд парадоксальным. Из логики ведь известно, что два противоположных суждения об одном и то же предмете не могут быть одновременно истинными, какое-то суждение должно быть ложным. Однако логика такого ответа будет спасена, если учесть, с какой точностью определять изменение частоты при изменении амплитуды. В первом приближении можно считать, что параметры не зависят для большинства вибраторов один от другого, если амплитуды колеблющихся струн или язычков достаточно малы. Такое свойство колебаний называется *изохронностью*. Практически человек не замечает изменения частоты, если первый раз сыграть тон очень тихо (пианиссимо), а второй раз — очень громко (фортиссимо). Да иначе и нельзя было бы играть на инструментах, в которых при изменении громкости изменялась бы частота. И все же небольшие отклонения от изохронности наблюдаются даже у признанного эталона частоты — камертона: частота очень тихих его колебаний чуть-чуть ниже частоты сильных колебаний. Но ухо таких отклонений частоты попросту не замечает. В данной книге рассматриваются только изохронные колебания или, как их иначе называют, линейные колебания. Если же изохронность нарушается, то колебания называют нелинейными. Большинство вибраторов музыкальных инструментов при очень сильных колебаниях, больших амплитудах дают нелинейные колебания или, как говорят, становятся нелинейными системами. Но при достаточно малых амплитудах колебания в музыкальных инструментах можно считать линейными.

Мы установили, что гармонические колебания камертона имеют определенную частоту (или обратную ей величину — период) и амплитуду. Допустим, два одинаковых камертона имеют одинаковые амплитуды и частоты. Могут ли чем-то отличаться колебания этих камертонов? Оказывается, могут. Один камертон можно заставить звучать несколько позже, чем другой. Соответствующие графики колебаний будут смещены друг относительно друга (см. схему 4). Такому смещению дали специальное обозначение — *сдвиг* или, что более употребительно, *разность фаз*. Разность фаз определяется расстоянием, отсчитанным по оси времени (горизонтальной оси), однако это смещение по времени удобнее выразить в долях периода, короче говоря, сопоставить смещение с величиной периода.

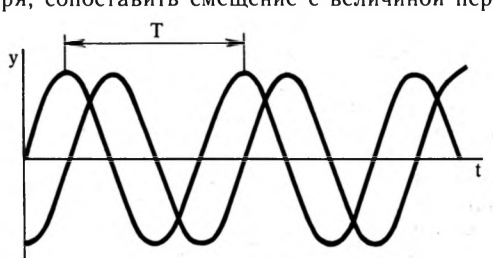


Схема 4. Сдвиг фаз колебаний

Предположим, что в какой-то момент вилки одного камертона отклонились от положения равновесия на максимальную величину, а в тот же самый момент вилки второго камертона проходят положение равновесия. Синусоиды в этом случае сдвинуты на четверть периода (см. схему 4), и колебания различаются по фазе на 90° (полный период принят за 360°).

Для настройки важную роль, как увидим далее, играет разность фаз 0° и разность фаз 180°. Соответствующие пары синусоид показаны на схемах 5 и 6. При нулевой разности фаз графики колебаний

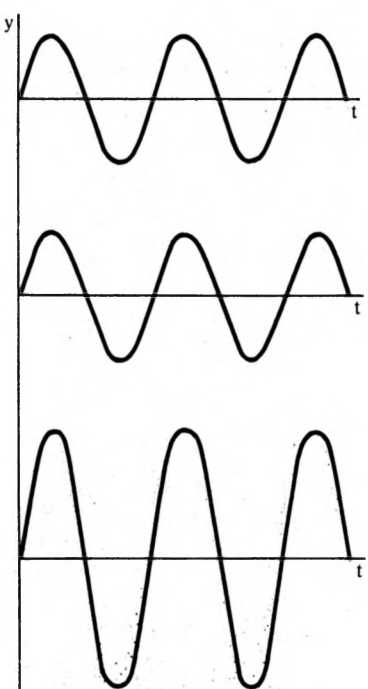


Схема 5. Сложение гармонических колебаний с равными частотами Разность фаз = 180°

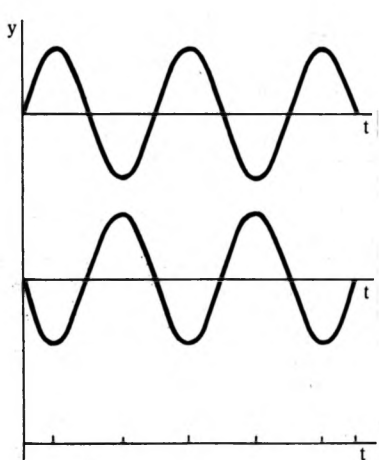


Схема 6. Сложение гармонических колебаний с равными частотами разность фаз Φ = 0°

камертонов точно совпадают, такие колебания называются с и н ф а з н ы м и. При разности фаз 180° колебания являются как бы зеркальным отражением друг друга. В этом случае вилки одного камертона максимально раздвинуты, а вилки второго камертона максимально сближены в тот же самый момент, в следующий момент положение вилок меняется на противоположное и т. д. Если частоты камертонов в точности совпадают, а разность фаз сохраняется постоянной (и не обязательно равной нулю), то такие колебания называют с и н-

хронными. Синхронизация колебаний имеет место, например, при настройке унисона. Отметим также, что колебания с разностью фаз 180° называются антифазными, сами колебания происходят в противофазе.

Понятие о разности фаз необходимо при выяснении явлений, происходящих при сопоставлении двух или нескольких гармонических колебаний в процессе настройки вибраторов музыкального инструмента (то есть струн, язычков и т. д.). В этом случае разность фаз сопоставляемых тонов имеет решающее значение. Сдвиг фаз рассматривался до сих пор как характеристика временно́го смещения колебаний. Но можно установить понятие фазы и для одного гармонического колебания. Тогда фазу, выраженную в долях периода, нужно отсчитывать от какого-либо произвольно выбранного момента времени. Обычно рассматривают так называемую начальную фазу, которая характеризует состояние гармонического колебания в начальный момент времени, и обозначают ее буквой φ_0. Начальная фаза колебаний вибратора в музыкальном инструменте зависит от способа его возбуждения. Так, для струны фортепиано, возбужденной ударом молотка, начальная фаза будет равна нулю, так как струна практически мгновенно начинает двигаться из своего положения равновесия. Напротив, струна щипкового инструмента, оттянутая в сторону и отпущенная, начинает свои колебания от максимального отклонения от положения равновесия, и фаза такого колебания струны будет равна не нулю, а 90°.

Теперь можно заполнить три графы «анкеты» любого гармонического колебания: частота, амплитуда и фаза. Эти параметры остаются постоянными в течение всего процесса и характеризуют колебание в целом, в отличие от переменных «отклонения y» и «времени t», характеризующих положение колеблющейся точки во времени. С учетом «анкетных данных» гармоническое колебание может быть записано аналитически в следующем виде:

$$y = A \cdot \mathrm{Sin}(\omega t - \varphi_0), \qquad (2)$$

где: y — отклонение точки от положения равновесия в данный момент времени t,
A — амплитуда,
ω — круговая частота,
t — время,
φ_0 — фаза колебания (начальная фаза).

Отклонение y колеблющейся точки от положения равновесия по вышеприведенной формуле (2) можно связать с параметрами вибратора. Какие же в данном случае нужны параметры вибратора? Существует два обобщенных параметра любой колеблющейся системы, влияющие на частоту колебаний: это упругость и масса вибратора. Они обозначаются, соответственно, буквами *к* и *м*. Коэффициент *к* называют еще жесткостью. Физический смысл этого коэффициента проще всего пояснить на примере пружины с грузом, который может колебаться на пружине, если второй конец пружины неподвижно закреплен в опоре: коэффициент *к* численно равен усилию

в пружине при ее растяжении (или сжатии) на единицу длины (*см*). В струне коэффициент жесткости увеличивается с повышением натяжения струны, в язычке этот коэффициент можно уменьшить, подпилив язычок у основания. Выяснив теперь физический смысл упругости (жесткости) вибратора, мы без труда поймем и связь параметров вибратора с частотой, устанавливаемую основной формулой для колебания материальных тел:

$$\omega = \sqrt{\frac{к}{м}},$$

где $к$ и $м$ — рассмотренные выше упругость и масса.

Значение частоты из формулы (3) можно подставить в уравнение (2). Тогда окажется, что весь процесс гармонического колебания зависит от четырех постоянных параметров: упругости и массы тела, с одной стороны, и амплитуды и начальной фазы — с другой. Два первых постоянных параметра выражают динамические свойства вибратора, а два последних — так называемые начальные условия колебаний (где рассматриваемая точка находилась и какую скорость имела в начальный момент времени).

Мы уже сопоставляли гармонические колебания двух камертонов при расшифровке понятия сдвига фаз, но при этом оставили без внимания результат совместного звучания двух камертонов. То, что случаи сложения колебаний практически имеют место в музыкальных инструментах, доказывает как опыт с камертонами, так и совместное звучание струн, язычков, пластин ксилофонов и т. д. Например, два одновременно колеблющихся язычка воздействуют на воздушный объем, находящийся рядом с ними, заставляя его колебаться под воздействием суммарного движения язычков.

Рассмотрим с помощью графического сложения несколько основных случаев, характерных для настройки, а чтобы наши рассуждения были строгими, заставим колебаться два камертона или два язычка достаточно тихо с небольшими амплитудами (при больших амплитудах колебания становятся отличными от простой синусоиды) и будем поддерживать колебания в течение того времени, которое нам необходимо. В этих условиях выбранные источники звука дадут гармонические колебания, соответствующие закону синуса. Возьмем для определенности оба камертона с одной и той же частотой, например 440 Гц. Из практики любой настройщик или музыкант знает, что результат ничего особенного представлять не будет: просто два камертона будут звучать громче, чем один. Пояснят также, что именно для увеличения громкости в фортепиано натягивают три струны, а в язычковом инструменте делают два или три язычка для одной и той же ноты. Теория колебаний подсказывает нам, что колебания нескольких одинаково настроенных вибраторов синхронизируются, разность фаз их колебаний становится нулевой и они взаимно усиливаются. Если бы мы сложили графически две синусоиды, изображенные на схеме 5, то получили бы тоже синусоиду, с такой же частотой, но с амплитудой, равной сумме амплитуд складываемых колебаний A_1+A_2. Но теория колебаний говорит также и о том, что при сложении двух гармонических колебаний с одинаковыми часто-

гами может происходить не только усиление колебаний, но и их ослабление. Это произойдет в том случае, если колебания антифазные, то есть с разностью фаз 180°. В этом можно убедиться, если графически сложить синусоиды, показанные на схеме 6. Складывать необходимо с учетом направления отклонения вверх или вниз. Например, в какой-то момент времени точка в соответствии с одной синусоидой должна отклониться вверх на величину y, но в соответствии с другой синусоидой она должна отклониться вниз на ту же величину y. Если амплитуды равны, то результирующее воздействие на колеблющуюся точку оказывается равным нулю и точка должна оставаться в покое. Теоретически два антифазных гармонических колебания с равными амплитудами взаимно уничтожаются, $A_1 - A_2 = 0$. Но кто-нибудь и когда-нибудь разве слышал, чтобы два одновременно звучащих камертона гасили колебания друг друга? Нет, не слышал. Однако теория здесь права. В действительности же очень трудно при точно настроенных камертонах получить колебания с разностью фаз 180°. Колебания камертонов или струн в унисоне автоматически синхронизируются, становятся синфазными. И все же гашение колебаний, хотя и не совсем полное, частичное, можно получить, слушая колебания одного камертона. Для этого надо расположить камертон вертикально вблизи уха и медленно вращать вокруг вертикальной оси. Нетрудно найти такое положение камертона, при котором звук как бы мгновенно пропадает. Это значит, что в данном месте на частицы воздуха действуют две гармонические колебательные силы, пришедшие от разных вилок и оказавшиеся в противофазе. Направление, которое соответствует линии противофазности колебаний, составляет примерно 45° к плоскости, проходящей по осям обеих вилок. Из рассмотрения этих случаев мы должны сделать два практически важных вывода: во-первых, синфазные колебания взаимно усиливают друг друга, и во-вторых, антифазные колебания взаимно уничтожают друг друга, или если амплитуды складываемых колебаний не точно равны друг другу, то уменьшаются до величины, равной разности амплитуд.

Теперь рассмотрим случай сложения колебаний, исключительно важный для практики настройки, когда в результирующем колебании периодически чередуются синфазность и антифазность складываемых колебаний. Сначала послушаем этот случай: заставим колебаться два камертона, имеющих различные частоты, например 440 и 441 Гц. Или еще проще — послушаем один тон давно не настраиваемого инструмента — пианино, баяна, одноименные двойные струны мандолины. При очень внимательном слушании, даже у относительно настроенного инструмента можно обнаружить хотя бы несколько тонов, в которых нет точной настройки вибраторов. На слух такое несоответствие проявляется в вибрации, дрожании тона, периодических усилениях и ослаблениях громкости звука. В музыкальной акустике это называется б и е н и я м и. Биения легко получить в опытах с любыми источниками звуков, лишь бы два источника давали слегка различающиеся по высоте звуки. Четче всего биения проявляются на простых тонах камертонов, органных труб. В таких случаях

уменьшение громкости при наступлении состояния антифазности колебаний доходит почти до нуля.

Какова физическая сущность биений и как они образуются, и наконец, какова их роль в настройке? Этими вопросами мы сейчас и займемся.

Пусть два камертона 440 и 441 Гц начнут колебаться одновременно, причем разность фаз их колебаний в начальный момент будет равной нулю. Значит, какое-то время колебания камертонов будут синфазны и будут усиливать взаимно друг друга, звук в это время кажется громче. На схеме 7а показаны гармонические колебания камертонов.

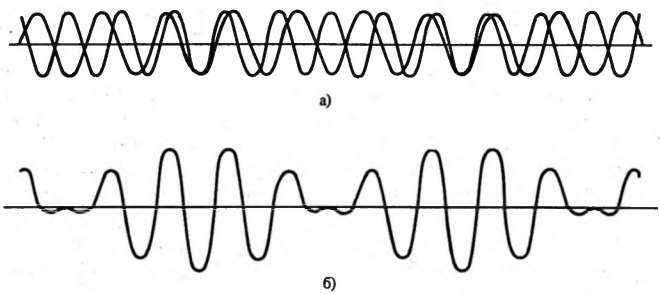


Схема 7. Сложение гармонических колебаний с небольшим различием частот

В последующие моменты времени колебания одного из камертонов, а именно имеющего частоту 440 Гц, начнут отставать от колебаний камертона с частотой 441 Гц, так что через одну секунду разница числа совершенных камертонами колебаний составит ровно одно колебание (441—440=1). Это отставание выразится в том, что через одну секунду после начала колебаний разность фаз станет равной 180°. Таким образом, синфазный участок колебания превратился, а точнее сказать, перешел в антифазный. А мы уже знаем, что противофазные колебания взаимно гасят, ослабляют друг друга. В дальнейшем опять наступает период согласованности колебаний — синфазность, и затем она снова сменяется рассогласованностью — антифазностью. Ну а что происходит, когда колебания периодически то усиливаются, то ослабляются? Суммарное колебание в этом случае периодически становится то громче, то тише. Это и есть биения. Графически биения представлены на схеме 7б. Амплитуда суммарного колебания в какой-то момент времени равна сумме амплитуд A_1+A_2 (период синфазности), в другой момент времени сумма амплитуд переходит в разность амплитуд $A_1—A_2$. В идеальном случае, когда амплитуды колебаний камертона равны $A_1=A_2=A$, мы можем сказать, что суммарная амплитуда периодически меняется от нуля до 2А. Когда биения слышны лучше всего? Очевидно, в этом идеальном случае равенства амплитуд складываемых колебаний: от периодов

полного исчезновения звука до периодов максимальной громкости. Хуже всего биения слышны тогда, когда одно колебание во много раз больше другого. Отсюда можно получить одно практическое правило: при настройке сравниваемые тоны должны быть по возможности равногромкими. На некоторых видах инструментов раздельная регулировка интенсивности звучания тонов вполне возможна, как, например, у рояля и пианино, и опытные настройщики этим пользуются. Соответствующим подбором силы удара по клавишам можно в некоторой степени повысить четкость биений, глубину биений.

В вышеприведенном примере, когда камертоны имели частоты 440 и 441 Гц, одно усиление или одно ослабление колебаний происходило, как было подсчитано, один раз в секунду. Так же можно подсчитать число биений в секунду и при любой другой частоте камертонов: если одновременно звучат камертоны 440 и 442 Гц, то через секунду разность количества полных колебаний камертонов достигнет 442—440=2, и следовательно, в течение этой первой секунды два раза произойдет совпадение и расхождение колебаний, то есть два биения. Отсюда можно получить правило для нахождения частоты биений в секунду, она равна абсолютной величине разности частот складываемых колебаний:

$$f_б = f_1 - f_2 \qquad (4)$$

Следовательно, чем реже биения, тем меньше разница по частоте у двух колебаний, тем точнее они совпадают друг с другом. Точная настройка в унисон будет, следовательно, при равенстве частоты биений нулю, т. е. при их отсутствии. Частоту биений не следует путать с частотой самого суммарного колебания, то есть если частота составляющих колебаний равна, например, 440 и 442 Гц, а частота биений равна разности 442—440=2, то какова же частота слышимого суммарного тона: 440, 442 Гц или какая-то иная? Теория колебаний доказывает, что средняя частота суммарного тона равна полусумме частот складываемых колебаний:

$$f = \frac{f_1 + f_2}{2} \qquad (5)$$

Казалось бы, к чему знать эту частоту, если два звука должны быть настроены точно? Однако в некоторых случаях требуется подсчет частоты суммарного колебания, например, когда тон настраивается с биениями (розлив в язычковых инструментах). Так, средняя частота колебаний в вышеприведенном примере равна 441 Гц. Биения существенным образом влияют на качество музыкального звука.

Отметим примечательную особенность колебаний с биениями: они получились в результате сложения двух гармонических колебаний, но сами не являются гармоническими, то есть синусоидальными.

Зададимся вопросом, что будет происходить с формой колебаний, если сложить еще большее число колебаний? Интуиция подсказывает, что форма колебаний должна быть сложной. Это подтверждает запись колебаний скрипичной струны Соль (схема 8).

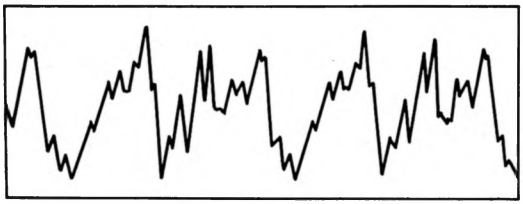


Схема 8. Форма колебаний скрипичной струны

Трудно даже сравнить кривую этого рисунка с кривой схемы 1. По форме они совсем непохожи. Единственное их сходство только в том, что они обе периодичны. Французский математик Фурье еще в прошлом веке доказал, что любое периодическое колебание может быть представлено суммой синусоидальных (гармонических) колебаний. Иначе говоря, любую сложную кривую можно разложить на ряд синусоид, что позволяет заменить изучение сложных по форме колебательных процессов определением параметров («анкетных данных», как говорилось выше) простейших синусоид. В связи с этим отдельное простое гармоническое колебание, входящее в состав сложного колебания, называют г а р м о н и к о й. Процесс нахождения гармоник сложной периодической кривой, которая характерна для большинства звуковых колебаний музыкальных инструментов, называется г а р м о н и ч е с к и м а н а л и з о м*. При настройке инструмента гармонический анализ производится настройщиком на слух и заключается в том, что ухо разлагает сложные колебания, то есть анализирует музыкальный звук и выделяет из него нужные для настройки гармоники, используя биения.

Гармоники музыкального звука обладают многими интересными особенностями, и одна из них состоит в том, что частоты гармоник имеют определенную закономерность: существует первая гармоника с самой низкой частотой f, затем имеется вторая гармоника с частотой в два раза большей, то есть 2f, дальше следует третья гармоника с частотой в три раза большей — 3f, в четыре, пять и т. д. раз большей, чем частота низшей гармоники. Первую гармонику называют основным тоном, вторую, третью и т. д. гармоники называют также первым обертоном, вторым обертоном и т. д. То есть счет гармоник на единицу выше, чем счет обертонов. Ряд частот, отношения которых соответствуют отношениям натурального ряда чисел — 1:2:3:4:5:6..., называется г а р м о н и ч е с к и м р я д о м. Например, гармонический ряд частот от основной частоты 440 Гц будет: 440, 880, 1320, 1760, 2200... Следует сказать, что только благодаря наличию в звуке гармоник и возможен процесс настройки.

Форма периодического колебания зависит от состава гармоник, отношения их аплитуд и соотношения фаз. Стоит только изменить

---

* Не путать с «гармоническим анализом» в теории музыки, где это понятие имеет другой смысл.

даже у одной гармоники амплитуду или фазу, и это повлечет изменение формы результирующего колебания. В некоторых звуках могут отсутствовать отдельные гармоники, и это тоже отражается на форме колебания. В прошлом веке Ом установил, что для стационарных (постоянных по амплитуде) звуков фазовые соотношения сравнительно мало влияют на слуховое восприятие. Позднейшие исследования показали, что это не совсем так и фаза гармоник в начальный момент определенным образом сказывается на тембре звука. Но до настоящего времени предпочитают при контроле физических параметров музыкального звука не вдаваться в подробности фазовых соотношений гармоник. С одной стороны, это объясняется трудностью точных измерений фаз гармоник, а с другой стороны — их влияние не настолько все же велико, чтобы его необходимо было безусловно учитывать. Для настройщика прежде всего представляют интерес лишь частоты и амплитуды гармоник настраиваемых тонов. Совокупность гармоник с определенными частотами и амплитудами называется с п е к т р о м данного колебания. Спектр обычно изображают в виде диаграммы, по горизонтальной оси которой откладываются в масштабе (как правило, логарифмическом) номера (или часто́ты) гармоник, а по вертикальной оси откладывают в относительном масштабе амплитуды гармоник. На схеме 9 показан спектр звука *соль* скрипки. Положение каждой линии (столбика) указывает определенную частоту гармоники, а высота линии пропорциональна амплитуде соответствующей гармоники.

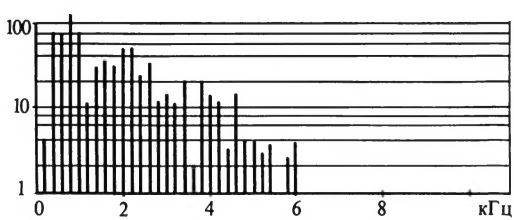


Схема 9. Спектр звука *соль* скрипки

В спектрах тонов нижних регистров музыкальных инструментов может содержаться от 20 до 40 гармоник, в тонах средних регистров — около 10 и верхних регистров 2—3 гармоники. Как правило, амплитуды первых гармоник в нижнем регистре малы и это вносит осложнение в настройку.

Мы рассмотрели простые и сложные колебания, причем такие, которые, однажды возникнув, продолжаются сколь угодно долго. В действительности колебания реальных источников происходят с уменьшением амплитуды, если колебания свободные. Поэтому нам пришлось колебания камертонов поддерживать смычком, а колебания язычков — потоком воздуха, и, строго говоря, такие колебания не являлись свободными, так как пришлось компенсировать потери энергии с помощью внешней силы. Однако если бы не было потерь

энергии при колебаниях реальных вибраторов, то характер всех рассмотренных нами колебаний, показанных на примере камертонов, точно соответствовал бы свободным и незатухающим колебаниям (которых, увы, в природе не существует). Иначе говоря, были рассмотрены идеальные случаи, а для того, чтобы их можно было увидеть на простых колебательных системах в действительности, потребовалось некоторое отступление от формального определения свободных колебаний. Теперь устраним это отступление, и после того как камертон возбудим ударом мягкого молоточка, оставим его колебаться без подвода внешней силы для поддержания колебаний. Отклонения вилок камертона от положения равновесия будут происходить все меньше и меньше, пока совсем не исчезнут. Такое уменьшение амплитуды колебаний во времени называется *затуханием*, а сами колебания называются *свободными затухающими колебаниями*.

Рассеяние механической энергии (так называемая диссипация), что собственно и вызывает затухание, происходит из-за того, что всякая колеблющаяся система, во-первых, деформируется, и на преодоление упругих сил в материале вибратора затрачивается часть энергии, во-вторых, раскачивает свои опоры, и это вызывает потери энергии на трение в опорах, в-третьих, преодолевает сопротивление окружающего воздуха и, в-четвертых, расходует энергию на перенос колебательного движения в окружающее пространство, то есть на излучение.

Современные средства физического эксперимента позволяют записать затухающие колебания вибратора музыкального инструмента. Самой простой записью оказывается опять-таки кривая затухающих колебаний камертона, изображенная на схеме 10.

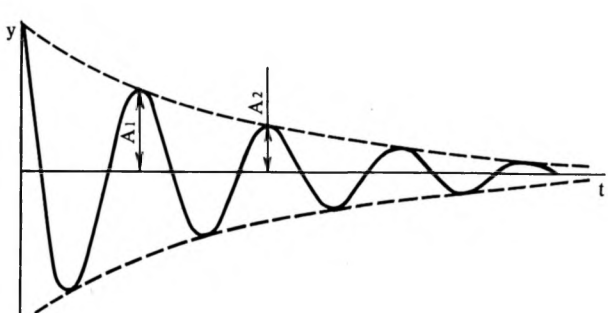


Схема 10. Затухающие колебания

Эта кривая — не синусоида, не гармоническое колебание, и можно лишь с большой натяжкой считать ее синусоидальным колебанием, амплитуда которого убывает со временем. На схеме 10 по вершинам

синусоид проведена кривая, называемая экспонентой, она как бы показывает, что уменьшение амплитуды происходит по экспоненциальному закону: $e^{-\alpha t}$, а само колебание происходит по закону синуса: $A \sin \omega t$. Тогда затухающее колебание можно представить формулой:

$$y = Ae^{-\alpha t} \sin \omega t, \tag{6}$$

в которой требует расшифровки только множитель $e^{-\alpha t}$. Здесь e — основание натуральных логарифмов, равное 2,718, а коэффициент α называется коэффициентом затухания колебания. Он характеризует уменьшение амплитуды колебаний за единицу времени и обратно пропорционален времени, в течение которого амплитуда убывает в e (≈ 3) раз. Если α мало, то убывание амплитуды происходит медленно. Затухающее колебание можно характеризовать еще одним параметром: логарифмическим декрементом колебания, который получается, если взять натуральный логарифм отношения двух соседних амплитуд:

$$\delta = \ln \frac{An}{A_{n+1}} = \alpha T. \tag{7}$$

Декремент колебания характеризует уменьшение амплитуды за один период и обратно пропорционален числу колебаний, по истечении которых амплитуда спадает в e раз. Приведем пример. Хороший камертон имеет $\delta = 1/10\,000$. Это значит, что амплитуда колебаний уменьшится в e раз через 10 000 колебаний.

Часто для характеристики вибраторов употребляется еще такая величина, как добротность:

$$Q = \frac{\pi}{\delta}$$

которая тем больше, чем дольше длительность свободных затухающих колебаний вибратора. Есть и другой смысл понятия добротности: она показывает, во сколько раз увеличивается амплитуда вибратора в момент резонанса по сравнению с амплитудой прогиба вибратора при статическом приложении силы той же самой величины.

Добротность, декремент и коэффициент затухания — это такие параметры, которые определяют затухание (в широком смысле) колебательных систем. Таким образом, мы рассмотрели три основных фактора, которые определяют свободные колебания вибраторов музыкальных инструментов,— масса, упругость и затухание. Эти характеристики могут изменяться в процессе настройки, они определяют «динамическую индивидуальность» вибратора. Собственно говоря, процесс настройки осуществляется изменением какого-либо из этих факторов (или даже суммы факторов): массы и упругости при настройке, например, язычка, упругости и затухания при настройке струны и т. д. То или иное сочетание их позволяет обеспечивать нужную частоту вибратора.

2. Вынужденные колебания источников звука в музыкальных инструментах

Во многих музыкальных инструментах для приведения в колебательное движение вибратора используется внешняя сила. При этом вибратор совершает вынужденные колебания. Пример вынужденных колебаний — движение язычка под действием воздушного потока, колебания столба воздуха в трубе, совершающиеся в результате периодических толчков воздуха со стороны мундштука, наконец, колебания деки в струнных инструментах под воздействием вибраций струн. На вынужденные колебания оказывают влияние в основном два фактора: динамическая индивидуальность системы, зависящая, как было установлено выше, от массы, упругости и затухания, и характер внешнего воздействия — частота, амплитуда и изменение их во времени у вынуждающей силы. Имеются две принципиальные возможности заставить вибратор колебаться: подводить к нему внешнюю периодическую силу, и тогда частота колебаний вибратора будет определяться частотой колебаний вынуждающей силы, или же внешняя сила будет сообщать вибратору только энергию, не являясь сама периодической. Вибратор в этом последнем случае возбуждается на собственной частоте, той частоте, с которой он колебался бы свободно.

Рассмотрим прежде всего вынужденные колебания, возбуждаемые гармонической внешней силой. Нас прежде всего интересует вопрос, что происходит с простой колебательной системой, когда на нее воздействует периодическая сила? Какими особенностями будет характеризоваться движение сразу же после приложения силы и далее в течение последующего времени? Интерес представляет и вопрос зависимости колебаний от частоты вынуждающей силы.

В начальный момент приложения внешней силы отклонение равно нулю, и затем колебательная система будет все больше и больше раскачиваться (см. схему 11).

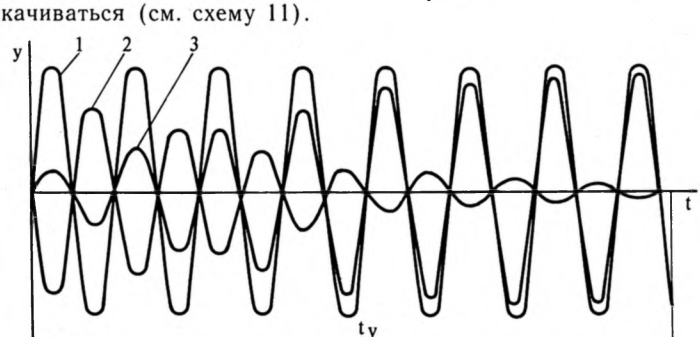


Схема 11. Вынужденные колебания
1 — периодическая внешняя сила;
2 — собственные затухающие колебания вибратора;
3 — вынужденные колебания вибратора

Как правило, движение происходит по сложному закону и может рассматриваться как результат сложения двух колебательных движений: собственных затухающих колебаний и периодических колебаний внешней силы. Через некоторое время собственные колебания затухнут и установятся колебания с постоянной амплитудой, процесс нарастания амплитуды прекратится. Таким образом, прежде чем колебания установятся, происходит процесс раскачки системы. Данная часть процесса называется процессом установления колебаний или в общем случае — переходным процессом, за которым следует процесс стационарных (или установившихся) колебаний.

Время нарастания колебаний от нуля до некоторого стационарного значения называется временем установления колебаний и обозначается буквами t_y. Характер переходного процесса оказывает влияние на тембр звука, точно так же как спектр влияет на окраску звука.

Одна из характеристик переходного процесса — время установления колебаний. Если раскачка колебаний происходит относительно быстро, как, например, при ударе молотка фортепиано по струне, то такой процесс нарастания колебаний называют жесткой атакой, при относительно медленном нарастании колебаний, например, у гармонного язычка — мягкой атакой. Время установления колебаний в первом случае составляет сотые доли секунды, во втором — десятые. Конечно, на слух человек не в состоянии оценить, за сколько сотых секунд установилось колебание, но тембр звука заметно изменяется в зависимости от быстроты нарастания колебаний.

Установившиеся колебания не зависят от того, каким путем вибратор был приведен в движение. Но основные параметры вынужденного колебания — частота, амплитуда и фаза зависят от частоты и амплитуды вынуждающей силы и от массы, упругости и затухания вибратора музыкального инструмента.

Важную роль играет соотношение собственной частоты вибратора и частоты вынуждающей силы. Амплитуда стационарных колебаний мала, если частота вынуждающей силы много больше или, наоборот, много меньше частоты собственных колебаний. Исключение составляет случай равенства этих частот. В этом случае происходит резкое нарастание амплитуды вынужденных колебаний, то есть наблюдается явление резонанса. Если настроить точно в унисон струны двух скрипок и возбудить какую-либо струну на одной скрипке смычком, то на другой скрипке одноименная струна незамедлительно придет в колебательное движение, демонстрируя резонанс. Подъем демпфера одного хора струн фортепиано и удар другого хора струн молоточком октавой ниже вызывают звучание — резонанс соответствующих гармоник первого хора.

Типичные зависимости амплитуды вынужденных колебаний от частоты вынуждающей силы, называемые резонансными кривыми, показаны на схеме 12.

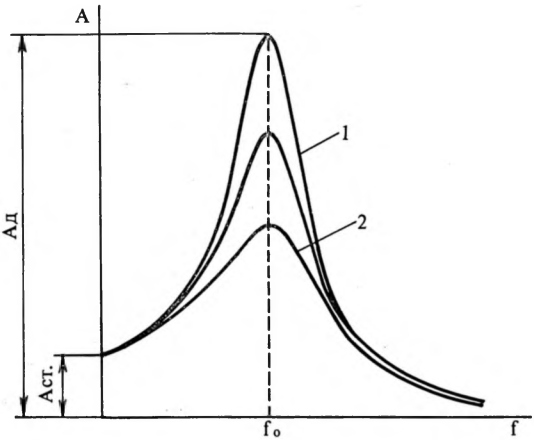


Схема 12. Резонансные кривые
$A_д$ — амплитуда вибратора в момент резонанса; $A_{ст}$ — статический прогиб; 1 — острый резонанс; 2 — тупой резонанс

Здесь изображены три различающиеся кривые. Они соответствуют различной величине амплитуды в момент резонанса и, следовательно, разной степени затухания, которое у разных струн или язычков может быть неодинаковым. Чем больше затухание, тем меньше амплитуда, и наоборот. Но влияние это существенно в основном только вблизи области резонанса $f=f_0$.

В музыкальных инструментах мы встречаемся с вибраторами, имеющими как малое затухание, так и большое. В первом случае вибратор настроен только на одну основную частоту и ее гармоники. Это струны, язычки, пластинки ксилофона и т. д. Во втором случае вибратор должен резонировать более или менее равномерно во всем диапазоне частот, излучаемых инструментом,— пример деки фортепиано, корпуса гитары и скрипки и т. п.

В рассмотренном примере внешняя сила была в виде отдельного гармонического колебания. В музыкальных инструментах чаще внешняя сила сложна по своему составу: на деку воздействует несколько колебаний (гармоник) струны. Как в таком случае происходят колебания деки как резонатора? Если дека будет иметь острый резонанс в какой-либо формантной области частот, то она будет хорошо отзываться только на эти частоты, которые лучше всего излучает, и значительно хуже будут излучаться другие частоты, которые не попадают в область резонанса. Всегда нежелательны острые резонансные пики в деках, из-за них возможно появление трудноустранимых при настройке биений.

Рассмотрим случай, когда к вибратору подводится не периодическая внешняя сила, а постоянная сила и вибратор все же совершает колебания. По такому принципу работают, например, струны смычко-

вых инструментов и язычки в язычковых инструментах. Покажем на примере струны скрипки этот новый класс колебаний, не похожий ни на свободные колебания, ни на вынужденные колебания под действием периодической внешней силы.

При воздействии смычка на струну между волосом смычка и струной создается сильное местное давление, доходящее до 300 ньютон (10 ньютон — сила, равная примерно 1 килограмм-силе). В результате совместного воздействия давления и повышения температуры из-за трения частицы канифоли, находящиеся на волосе и попадающие между струной и волосом смычка, расплавляются и переходят в полужидкое пластическое состояние. Липкость частиц моментально увеличивается, и их способность слипаться повышается. Происходит сплавление частиц канифоли между собой и между струной и волосом смычка. В момент возникновения такой спайки движущийся волос смычка начинает тянуть за собой струну. При дальнейшем движении вскоре наступает равновесие сил, удерживающих струну на смычке, и сил от натяжения струны, пытающихся оторвать струну от смычка. В этот момент струна все еще удерживается на смычке, так как частицы канифоли успели остыть и затвердеть, образовав прочную спайку между волосом смычка и струной. Некоторое время спайка сопротивляется разрыву, но затем растягивающие усилия возрастают настолько, что связь струны со смычком разрушается, частицы канифоли ломаются и освобожденная струна скачком отклоняется в противоположную сторону, где она вскоре останавливается и вновь сцепляется с частицами канифоли. Величина обратного хода струны зависит от массы и натяжения струны. Сама струна, по существу, управляет колебаниями. Описанный процесс повторяется много раз в секунду, пока движется смычок. Ритм колеблющейся струны определяет характер и повторяемость протекающих явлений. Если движение смычка равномерное, давление постоянное, то процессы сцепления струны со смычком синхронны с периодом колебания струны.

Колебания струны в этом случае уже не являются гармоническими, а скорее похожи на зубья пилы по форме. Амплитуда колебаний устанавливается автоматически такая, при которой потери энергии компенсируются новыми поступлениями энергии от источника постоянной силы — смычка.

Класс колебаний, описанных на примере струны скрипки, отличается от уже разобранных выше одной особенностью — наличием о б р а т н о й с в я з и. Такие периодические процессы называются а в т о к о л е б а т е л ь н ы м и. При свободных колебаниях звук создается одним вибратором. При вынужденных колебаниях нужны вибратор и периодическая внешняя сила. Автоколебания же создаются: вибратором, источником постоянной внешней силы и преобразователем энергии, осуществляющим обратную связь между вибратором и внешней силой. В рассмотренном примере вибратор — это струна скрипки, источник постоянной внешней силы — смычок, преобразователь энергии — механизм переменного трения, создаваемый с помощью канифоли. Автоколебания широко распространены в музы-

кальных инструментах, они лежат в основе звукообразования смычковых, язычковых и духовых инструментов.

Мы закончили разбор основных колебательных процессов, которые могут происходить в группе классических инструментов и которые необходимы для изучения явлений, происходящих при настройке этих инструментов.

Распространение звуковых волн в помещении приводит к возникновению своеобразного явления, которое может воздействовать на восприятие тембра звука и сказываться на настройке и интонировке музыкального инструмента. Речь идет о следующем. В тех инструментах, которые могут давать непрерывный и длительный звук (язычковые, смычковые, духовые инструменты), при игре в не очень большом помещении возникает явление стоячих волн. Оно возникает тогда, когда звуковая волна падает перпендикулярно на хорошо отражающую поверхность — стену, потолок и т. д. Отраженная от преграды волна становится обратной и складывается с падающей волной. Благодаря тому что частота колебания волны не изменяется при отражении, возникают участки, где давление воздуха максимально как в прямой волне, так и в отраженной, и участки, где, напротив, разрежения в волнах совпадают и дают минимальное местное давление. Можно говорить также о том, что в тех местах, где колебания давления максимальны, возникают пучности колебаний, а там, где колебания давления минимальны,— узлы колебаний. Стоячие волны в помещении могут сильно изменить действительную картину звуковых волн, так как на некоторых частотах происходит резкое усиление колебаний, звук становится значительно громче. В обычных условиях стоячие волны не так сильно проявляются, поскольку музыкальные звуки непрерывно изменяются по интенсивности и по частоте и это затрудняет образование стоячих волн.

Однако можно проделать простейший эксперимент, который демонстрирует явление стоячих волн и их воздействие на слух. Надо просто спеть в ванной комнате, причем особым образом. Возьмем голосом самый низкий тон, который нам доступен (можно просто «мычать»), и будем постепенно его повышать. Поднимая высоту тонов, мы немедленно обнаружим, что отдельные тона звучат громче остальных, заставляя ванную комнату как бы гудеть. Если после перерыва мы точно по высоте воспроизведем один из таких тонов, то помещение моментально громко отзовется.

Таким образом, голосом удается выявить несколько резонансных тонов комнаты, которые усиливаются именно по причине возникновения стоячих волн на определенных частотах. Кстати, аналогичный эффект можно ощутить, если гудеть («мычать»), повышая высоту голоса, но вслушиваться и отмечать усиление звучания отдельных тонов в своей собственной голове (маске — по выражению певцов). Удивительно то, что может обнаружится, что один из резонирующих в вашей голове тонов случайно совпадает с тоном камертона по высоте. Вот вам и всегда при себе довольно точный эталон высоты настройки! Его надо только запомнить в ряду нескольких других резонансов.

Свободные колебания в твердых телах по существу также представляют собой чередование узлов и пучностей, т. е. стоячие волны. При вынужденных колебаниях и автоколебаниях в твердых и газообразных телах образуются стоячие волны с постоянной амплитудой, если только вынуждающая сила действует достаточно долгое время и с неизменной частотой. Вспомним колебания струны, возбуждаемой смычком. Таким образом, при настройке музыкальных источников звуков колебания во сех без исключения вибраторах сопровождаются образованием стоячих волн.

3. Элементы музыкальной грамоты

Без музыкальной грамоты настройщику практически трудно обойтись. Прежде чем настраивать тон, необходимо знать, как он обозначается, в какой последовательности должны браться интервалы, тоновая величина этих интервалов, какие интервалы и аккорды можно использовать для настройки и т. д.

Музыкальный звук, обозначаемый на письме нотой, имеет определенные физические характеристики, которые присущи самому колебательному движению: интенсивность, частота, спектр и время. Эти характеристики не зависят от человека, иначе говоря, они являются объективными параметрами звука. В отличие от объективных характеристик, человек оценивает звук субъективными характеристиками, являющимися результатом слухового восприятия звука. К ним относятся: громкость, высота, тембр и длительность. Таким образом, четыре объективные характеристики звука сопоставляются с четырьмя субъективными. Можно сказать, в первом приближении громкость определяется интенсивностью колебаний, их амплитудой, высота — частотой колебаний, тембр — спектром и переходными процессами, а длительность — временем колебаний. Но в конечном итоге каждая субъективная характеристика зависит от всех физических характеристик. Так, громкость звука зависит не только от его интенсивности, но и от частоты и спектра звука. Субъективно высокочастотные звуки большой интенсивности кажутся более низкими, чем те же звуки, но малой интенсивности. Тембр звуков нижнего и среднего регистров кажется различным даже при небольших различиях в спектрах. Но подобные же различия в составе гармоник звуков верхнего регистра почти не меняют окраску звука. Все это должно учитываться в музыкальной практике.

Звуки человеческой речи записываются буквами, но при этом никакой информации о громкости, высоте, тембре или длительности произносимой буквы мы не можем получить из текста. Музыкальный звук для своего определения требует указания на письме хотя бы двух характеристик. Наиболее определенно указываются высота и относительная длительность звука, менее конкретно указывается громкость, которая обычно относится к какой-либо части музыкального произведения, а не к отдельной ноте. Тембр ноты вообще никак не

обозначается, если не считать, что обычно произведение предназначено для определенного музыкального инструмента. Но так как одну и ту же мелодию можно с успехом исполнить на разных инструментах, имеющих различный тембр, то фактически и подобное косвенное обозначение ничего не дает. Обозначение тембра не имеет смысла также и потому, что подавляющее большинство инструментов не позволяют произвольно менять тембр без изменения громкости звука. Исключение составляют те язычковые инструменты, которые снабжены регистрами, и в нотах иногда указывается требующийся регистр. То же можно сказать и об органе и электронных инструментах, обладающих возможностями изменения тембра. Сказанное не относится, конечно, к ансамблям инструментов, в которых окраска звука создается совместным звучанием групп инструментов.

В музыке используется до 80—100 звуков. На любом инструменте можно последовательно нажимать клавиши или кнопки, лады, или брать соседние позиции пальцев (на скрипке). Если не пропускать ни одного тона, то мы получим последовательность восходящих или нисходящих звуков, так называемый музыкальный звукоряд. При этом нетрудно заметить, что отдельные звуки повторяются по высоте, как бы сливаются в одно звучание через определенное число тонов. Такие регулярно повторяющиеся промежутки между совпадающими тонами называются о к т а в а м и. Диапазон музыкального инструмента принято считать по числу октав или по ширине интервала между самым низким и самым высоким звуками инструмента.

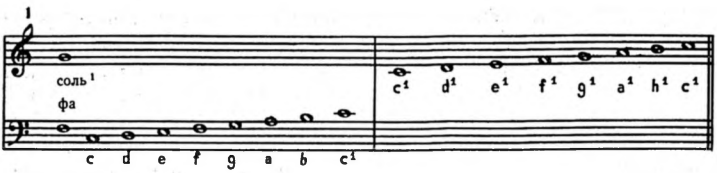
Для сравнения дадим диапазон в октавах некоторых инструментов: фортепиано $7^1/_4$, арфа $6^1/_2$, виолончель $4—4^1/_3$, духовые инструменты $2^1/_2—3^1/_2$, человеческий голос $2^1/_2$.

Диапазон симфонического оркестра около $8^1/_4$ октав. Ухо человека воспринимает диапазон около $10^1/_2$ октав.

В каждой октаве имеется семь звуков, соответствующих основным ступеням: *до, ре, ми, фа, соль, ля, си*. Эти ступени записываются на письме знаками, называемыми нотами. Иногда в музыкальной акустике термин «нота» используется для обозначения сложного музыкального звука, в отличие от простого звука — тона, соответствующего простому гармоническому колебанию. В контексте обычно легко различить, когда и в каком значении употреблен этот термин.

Высота тонов обозначается при их записи на системе из 5 линеек, называемой нотоносцем. Чем выше записана нота, тем выше звучание — больше частота. Пяти линеек обычно не хватает, и тогда пользуются добавочными линейками, выше или ниже нотоносца. Для инструментов с большим звукорядом используются два нотоносца, а чтобы было понятно, в каком регистре записана нота, в начале нотного стана проставляется ключ.

Скрипичный ключ определяет положение на нотоносце ноты *соль* первой октавы, а басовый ключ Фа — положение ноты *фа* малой октавы. От этих ключевых нот находятся и все остальные ступени (см. нотный пример 1).



Расположение основных ступеней на нотоносце в малой и первой октавах

Так как нот в октаве двенадцать, а основных ступеней семь, то остальные ноты, называемые производными, находятся путем повышения или понижения основных нот с помощью знаков альтерации. Основные знаки альтерации: диез (♯) — повышает ноту на полтона, бемоль (♭) — понижает ноту на полтона и бекар (♮) — отменяет действие диеза и бемоля.

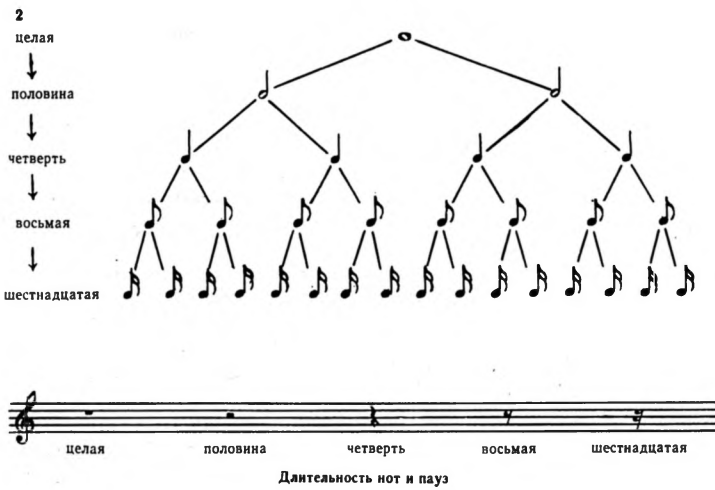
Какой интервал равен полутону? Полутон — это наименьшее расстояние (по высоте), между двумя звуками. На фортепиано полутон может быть взят между белой и черной клавишей или между двумя соседними белыми клавишами, между которыми нет черной клавиши. Два полутона составляют целый тон. На струнном инструменте с ладами полутон берется на соседних ладах.

Буквенные или слоговые обозначения основных и производных звуков аналогичны для разных октав. Существует только некоторая разница в написании названия звуков в зависимости от октавы. Октавы имеют следующие названия снизу вверх: субконтроктава, контроктава, большая октава, малая октава, первая, вторая, третья, четвертая и пятая октавы. Можно пользоваться вместо слоговой системы названия звуков — *до, ре, ми* и т. д.— соответствующей буквенной системой: *c, d, e, f, g, a, h**. Тогда буквенное обозначение тона в различных октавах примет вид (на примере тона *ля* — *a*): $A_2, A_1, A, a, a^1, a^2, a^3, a^4$. В этом примере обозначение a^1 соответствует тону *ля* первой октавы, имеющему частоту 440 Гц.

Каким образом обозначаются длительности нот? За основную единицу измерения принята целая нота, длящаяся четыре счета. Каждый счет может быть равен секунде, но может несколько отличаться от нее. В музыке важна относительная длительность нот, а не абсолютная. Каждая последующая по длительности нота вдвое короче предыдущей. Нота, по длительности вдвое меньшая целой, называется половинной нотой. Нота, по длительности вдвое меньшая половинной, называется четвертной нотой или четвертью, она в четыре раза короче целой ноты. Наконец, ноты в половину четверти и в четверть четверти называются, соответственно, восьмой и шестнадца-

* В нотной системе Англии и Америки можно встретить обозначение *b* для *си* и *h* для си-бемоль, в Европе буквой *h* принято обозначать ноту *си* и буквой *b* — *си-бемоль*.

той. Все эти ноты имеют особое написание, элементами которого являются овал, зачерненный или незачерненный, штиль, флажок (хвостик). Знаки молчания — паузы соответствуют по длительности нотам. На нотном примере 2 даны обозначения нот и пауз различной длительности. Названия пауз также соответствуют названиям нот определенной длительности.



Длительность нот и пауз

В музыкальном произведении существует определенная закономерность ударных и безударных звуков (или долей), точно так же, как в стихотворении ударные и неударные слоги чередуются в определенной последовательности. Ударные звуки обычно связаны со счетом «раз», неударные — с любым другим счетом. Определенная последовательность ударных и неударных звуков, повторяющихся в музыкальном произведении, называется метром. Часть музыкального произведения, заключенная между ударными долями, называется тактом. В одном такте может быть, например, одна сильная доля и две слабых. Это такт трехдольного метра. Если чередуются сильная и слабая доли, то такт — двухдольного метра. За единицу счета могут быть приняты следующие доли: четверть, половинная и восьмая. Обозначение размера такта в виде дроби показывает долю, выбранную за единицу счета (она стоит в знаменателе), и число долей в такте (в числителе). Наиболее распространены размеры: $^{2}/_{4}$, $^{3}/_{4}$, $^{4}/_{4}$, $^{3}/_{8}$, $^{6}/_{8}$ и т. д.

Одним из существенных понятий музыкальной грамоты является понятие интервала. В музыке имеют дело не с отдельными, не связанными между собой звуками, а со звуками, находящимися в определенном соотношении друг с другом, и для настройки важна именно эта

взаимосвязь звуков. Два звука могут находиться на большем или меньшем расстоянии друг от друга, то есть между ними может быть различный интервал.

Музыкальный интервал — это сочетание двух звуков, взятых одновременно или последовательно. При одновременном исполнении звуков — интервал гармонический, при последовательном — мелодический. Звуки в гармоническом интервале имеют различный характер по своей окраске: они могут сливаться, звучать спокойно и, наоборот, давать неспокойное, несогласное звучание. В первом случае интервал называют консонансом, во втором — диссонансом. Это древние понятия. Так, известно старое определение Евклида, не устаревшее и в наши дни: «Консонанс есть смешение двух тонов, высокого и низкого. Диссонанс, напротив, есть неспособность двух тонов смешаться, отчего они на слух производят грубое впечатление».

Почему же одни двоезвучия консонансы, а другие диссонансы? Герман Гельмгольц установил, что степень консонантности связана с соотношением частот звуков интервала. Чем проще это отношение, тем больше степень консонанса, и наоборот. Самое простое отношение 1:1. Такой интервал называется примой или унисоном. Далее 2:1 — октава, 3:2 — квинта, 4:3 — кварта, 5:4 — большая терция и 6:5 — малая терция. Это все консонирующие интервалы. Отношение 9:8 имеет большая секунда и 16:15 — малая секунда — диссонирующие интервалы. Непосредственная же причина диссонанса — наличие ярко выраженных биений определенной частоты. По Гельмгольцу наиболее неприятными являются двоезвучия (или вообще многозвучия), в которых присутствуют биения около 33 в секунду. Диапазон биений, вызывающих диссонанс, лежит в пределах от 20 до 60 биений в сек.

Самый диссонирующий интервал в музыкальном звукоряде — малая секунда в первой октаве, дающая как раз наиболее неприятное количество биений. Например, подсчитаем биения в малой секунде *ля*^{1} — *ля-диез*^{1}: 466, 16 — 440 = 26, 16 биений в сек. Это как раз близко к области биений, придающей интервалам наибольшую степень диссонантности. Так как биения образуются между различными гармониками, то влияние их на характер звучания будет зависеть от энергии гармоник, дающих биения, попадающие или не попадающие в зону диссонанса. В звуке могут быть, например, и биения, равные 33 в секунду, но если они слабы, то они просто не будут заметны на слух.

Как можно определить интервал? В музыке существуют две меры интервалов: ступеневая величина интервалов и тоновая (или полутоновая) величина интервалов. В первом случае интервал определяется числом основных ступеней от одного тона до другого. Во втором случае — числом тонов или полутонов. Ступеневая и полутоновая ширина интервалов дана в таблице ниже. Причем в таблице не даны энгармонические названия интервалов, то есть тех интервалов, которые имеют одну и ту же тоновую величину, но называются поразному.

Ширина интервалов

Название интервала	№ ступени	Полутоновая величина интервала
Прима (унисон)	I	0
Малая секунда	II	1
Большая секунда	II	2
Малая терция	III	3
Большая терция	III	4
Чистая кварта	IV	5
Увеличенная кварта	IV	6
Чистая квинта	V	7
Малая секста	VI	8
Большая секста	VI	9
Малая септима	VII	10
Большая септима	VII	11
Октава	VIII	12
Нона (секунда через октаву)	IX	13 и 14
Децима (терция через октаву)	X	15 и 16
Ундецима (кварта через октаву)	XI	17 и 18
Дуодецима (квинта через октаву)	XII	19
Терцдецима (секста через октаву)	XIII	20 и 21
Квартдецима (септима через октаву)	XIV	22 и 23
Квинтдецима (двойная октава)	XV	24

Настройщику необходимо знать, что интервалы могут быть обращены. Обращением интервалов называется перенесение нижнего звука на октаву вверх или верхнего звука на октаву вниз. Интервал и его обращение в сумме составляют октаву. Так как при перенесении нижнего тона на октаву вверх его частота удваивается, то удваиванием меньшего числа получим отношения обращенных интервалов. Основные обращения интервалов, находящие практическое применение при настройке, следующие:

Интервал	Соотношение частот	Обращение интервала	Соотношение частот
Прима (унисон)	1:1	Октава	2:1
Малая терция	5:6	Большая секста	5:3
Большая терция	4:5	Малая секста	8:5
Кварта	3:4	Квинта	3:2
Квинта	2:3	Кварта	4:3
Октава	1:2	Унисон	1:1
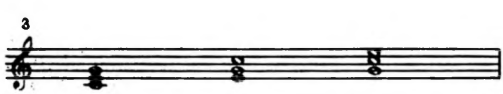
Познакомимся с организацией последовательности музыкальных звуков в гамме. Гамма — звукоряд в пределах октавы. Существуют гаммы различных видов, характер которых зависит от последовательности тонов и полутонов. Последовательность основных ступеней, в которую входит семь звуков, составляет диатоническую гамму. Интервалы этой гаммы: тон, тон, полутон, тон, тон, тон, полутон. Если последовательность звуков составляет ряд из полутонов, то гамма хроматическая.

Кстати, необходимо отметить, во избежание путаницы, что название «тон» в музыкальной грамоте служит мерой для определения величины интервала, равного сумме двух полутонов, в то время как в музыкальной акустике «тон» — простое гармоническое колебание, звук определенной высоты.

В музыкальном произведении подбор звуков не является случайным, а подчинен определенной системе, в которой звуки как бы группируются вокруг одного устойчивого звука, чаще встречающегося. На этом устойчивом звуке произведение нередко начинается и кончается, на нем строится соответствующая гамма. Организация музыкальных звуков вокруг устойчивого или опорного звука называется ладом. Опорный звук лада носит название тоники. Это первая ступень гаммы. Имеют название также остальные ступени:

1-я ступень — тоника, тоническая прима;
2-я » — нисходящий вводный звук;
3-я » — медианта, тоническая терция;
4-я » — субдоминанта;
5-я » — доминанта, тоническая квинта;
6-я » — субмедианта;
7-я » — восходящий вводный звук.

Главными ступенями лада являются тоника, субдоминанта и доминанта, на них строятся основные аккорды. Аккорд — это сочетание трех и более звуков. Важным аккордом является трезвучие: мажорное трезвучие, состоящее из большой и малой терций, и минорное трезвучие, состоящее из малой и большой терций. Если в аккорде звук — тоника, то такой аккорд называется основным. Аккорд может быть обращенным. В первом обращении внизу аккорда находится медианта или тоническая терция, тогда аккорд носит название секстаккорда. Во втором обращении внизу находится уже доминанта или тоническая квинта, и тогда аккорд называется квартсекстаккордом. Основной аккорд и его обращения показаны в нотном примере 3.



Аккорд и его обращения

В качестве тоники может быть взят любой звук из музыкального звукоряда. Абсолютная высота тоники определяет тональность лада, высоту всех его остальных звуков. Тональность это и есть высота лада. Наиболее распространенные лады — мажор и минор. В гамме мажорного лада чередование тонов и полутонов следующее: тон, тон, полутон, тон, тон, тон, полутон. В гамме минорного лада: тон, полутон, тон, тон, полутон, тон, тон. Количество минорных и мажорных гамм одинаково: семь диезных, семь бемольных и одна без знаков, то есть пятнадцать гамм. Мажорные и минорные гаммы с одинаковым количеством ключевых знаков называются параллельными. Тоника мажорной гаммы выше тоники минорной гаммы на малую

терцию. Мажорная и минорная гаммы, построенные на общей тонике, называются одноименными.

Тональности могут быть расположены по квинтам и квартам. Такая система построения тональностей параллельных мажорных и минорных гамм называется квинто-квартовым кругом. (Может быть построение только по квинтам, создающее квинтовый круг.) Эта система схематически изображена в виде замкнутого круга, в котором снаружи обозначены мажорные гаммы, а внутри круга — минорные гаммы (см. схему 13).

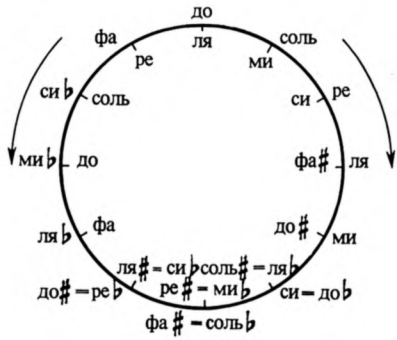


Схема 13. Квинто-квартовый круг гамм

Наконец, музыканту и настройщику в своей деятельности приходится сталкиваться с динамикой звучания инструментов, с динамическими оттенками звуков. В таблице ниже сопоставлены основные ступени громкости с уровнем громкости в фонах.

Обозначение	Название ступени	Характеристика	Уровень громкости, фон
ppp	piano-pianissimo	предельно тихо	40—50
pp	pianissimo	очень тихо	50—60
p	piano	тихо	60—70
mp	mezzo-piano	умеренно тихо	70—80
mf	mezzo-forte	умеренно громко	80—90
f	forte	громко	90—100
ff	fortissimo	очень громко	100—110
fff	forte-fortissimo	предельно громко	110—120

Особенность шкалы динамических оттенков заключается в том, что каждая последующая ступень в два раза громче предыдущей, что равносильно приращению уровня громкости на 10 фон. Динамические оттенки являются относительными, и fortissimo трубы, например, громче fortissimo скрипки, но тише fortissimo оркестра. Здесь нет абсолютных фиксированных уровней. Пределы, в которых находятся одни и те же ступени шкалы динамических оттенков, составляют так называемую зону динамического слуха Н. А. Гарбузова [8].

III. АКУСТИЧЕСКИЕ ОСНОВЫ НАСТРОЙКИ МУЗЫКАЛЬНЫХ ИНСТРУМЕНТОВ

1. Музыкальные строи современной европейской музыки

Под настройкой понимают установление высотного согласования между тонами музыкального инструмента.

Цель настройки — получение либо чисто настроенных интервалов (чистый строй), либо интервалов с определенной расстройкой (например, равномерно-темперированный строй).

Хотя практическая настройка во многих случаях и не достигает идеального качества, большой точности установки интервалов, можно установить те основные принципы, на которых она базируется. Эти принципы относительно просты и с научной точки зрения безупречны.

Теоретически достаточно просто подсчитать частоты любого музыкального звукоряда, если опираться на какую-либо заранее предписанную схему.

Прежде всего необходимо установить исходную частоту, так сказать, точку отсчета, то есть необходимо задать определенное числовое значение частоты для какого-либо выбранного тона. Обычно таким тоном является *ля* первой октавы.

По частоте выбранного отправного тона определяют частоты всех других тонов октавы, которые должны соответствовать строю инструмента. Укажем здесь, что в чистом строе настраиваются такие инструменты, как скрипка, арфа, некоторые виды гармоний; в равномерно-темперированном строе — клавишные, язычковые инструменты.

Каким же образом можно определить соотношения частот тонов в обоих строях?

Небольшой экскурс в историю поможет нам лучше разобраться в этом вопросе [4].

Древнейшие звукоряды у греков были построены на основе квинтовых и октавных ходов; для получения интервалов октавы и квинты достаточно было изменить длину струны в определенной пропорции (октава — $^1/_2$ длины струны; кварта — $^3/_4$ и квинта — $^2/_3$). Так как часто́ты звуков обратно пропорциональны длинам звучащих частей струн, то для древнейшего звукоряда, положе́нного, по преданию, в основу настройки арфы Орфея, получим ряд интервальных коэффициентов для нахождения частот по частоте основного тона *(до)*, коэффициент которого равен 1:



Основных интервалов здесь два — квинта и октава. Кварта *(фа)* теоретически может быть получена, если взять квинту от основного тона вниз, а полученный звук перенести на октаву вверх. Звуковысотные интервалы складываются и вычитаются, при этом их интервальные коэффициенты умножаются друг на друга или делятся. Например, кварта+квинта=октава соответствует $^4/_3 \cdot {}^3/_2 = 2$.

Пользуясь основными интервалами — квинтой и октавой, можно расширить полученный звукоряд. Если от тона звукоряда *соль* с интервальным соотношением $^3/_2$ сделать ход на квинту вверх, а от тона *фа* ($^4/_3$) — ход на квинту вниз, то после переноса обоих новых тонов в пределы октавы получим:

1	$^9/_8$	$^4/_3$	$^3/_2$	$^{16}/_9$	2
до	*ре*	*фа*	*соль*	*си-бемоль*	*до*^{1}

В этом звукоряде представлены интервалы: прима, секунда, кварта, квинта, малая септима, октава. Последующие ходы по квинтам дают возможность получить большую терцию и большую сексту. Этот строй был известен философам школы Пифагора (V—VI вв. до н. э.) и был целиком построен по квинтовым ходам.

Используем для нахождения частоты тонов пифагорова строя оба его основных требования — чистые квинты 3:2 (1,5:1) и чистые октавы 2:1, взяв последовательно от самой низкой ноты *Ля*$_2$ двенадцать квинтовых ходов и семь октавных ходов вверх. Получим: *Ля*$_2$ — 27,5; *Ми*$_1$ — 41,25; *Си*$_1$ — 61,87; *Фа-диез* — 92,81; *до-диез* — 139,22; *соль-диез* — 208,83; *ре-диез*^{1} — 313,24; *ля-диез*^{1} — 469,86; *фа*^{2} — 704,79; *до*^{3} — 1057,19; *соль*^{3} — 1585,79; *ре*^{4} — 2378,68; *ля*^{4} — 3568,02 Гц. Здесь мы последовательно умножали исходную частоту 27,5 Гц на квинтовое отношение 1,5. Октавный ряд построим простым удвоением той же частоты: *Ля*$_2$ — 27,5; *Ля*$_1$ — 55; *Ля* — 110; *ля* — 220; *ля*^{1} — 440; *ля*^{2} — 880; *ля*^{3} — 1760; *ля*^{4} — 3520 Гц.

Мы пришли к тому, что правила пифагорова строя внутренне противоречивы — для частоты одного и того же тона *ля*^{4} получили два разных значения: 3568 и 3520 Гц, то есть строй не замкнулся и после нахождения частот всех двенадцати тонов разница достигла 48 Гц. Найдем частоту тона *ля* первой октавы, разделив эти числа на 8, получим соответственно 446 и 440 Гц. Разница в 6 Гц, отнесенная к полосе частот целого тона, равная здесь 50,8 Гц, составит несколько менее $^1/_8$ тона. Эту величину расхождения строя называют пифагорейской (или пифагоровой) коммой. Наличие коммы ведет к акустическому недостатку. Недостатком пифагорова строя является неблагозвучие терции, которая имеет слишком большое число биений и не пригодна для полифонической музыки. Поэтому в XVI веке в Италии был предложен чистый строй, основу которого составляли,

наряду с чистыми октавами, квинтами и квартами, также и чистые большие терции с соотношением частот 5:4. Их особенность — сочное звучание в гармонических интервалах. Большой терции пришлось ждать почти полторы тысячи лет, прежде чем музыканты и теоретически и практически признали ее консонирующим интервалом. В чистом строе диатоническая гамма имеет такие интервальные коэффициенты:

Мажор

прима	секунда	терция	кварта	квинта	секста	септима	октава
1	$^{9}/_{8}$	$^{5}/_{4}$	$^{4}/_{3}$	$^{3}/_{2}$	$^{5}/_{3}$	$^{15}/_{8}$	2
до	*ре*	*ми*	*фа*	*соль*	*ля*	*си*	*до*[1]

Минор

прима	секунда	малая терция	кварта	квинта	малая секста	малая септима	октава
1	$^{9}/_{8}$	$^{6}/_{5}$	$^{4}/_{3}$	$^{3}/_{2}$	$^{8}/_{5}$	$^{9}/_{5}$	2
до	*ре*	*ми-бемоль*	*фа*	*соль*	*ля-бемоль*	*си-бемоль*	*до*[1]

Чистый строй, как и пифагоров, не замкнут, так как не имеет энгармонически равных звуков. В этом строе, например, *до-бемоль* не совпадает с *си*. Интервалы чистого строя больше или меньше одноименных интервалов пифагорова строя примерно на величину $^{1}/_{10}$ тона, которая называется дидимовой коммой. Если строить звукоряды от каждого нового тона в соответствии с приведенными выше коэффициентами для мажорной и минорной гамм, то каждый раз будем получать иные частоты для тонов. Это делает невозможным модуляции из одной тональности в другую и затрудняет создание музыкальных инструментов с фиксированной частотой звуков. Поиски замкнутого строя, дающего возможность модуляций, привели к появлению равномерно-темперированного строя. Зарождение равномерно-темперированного строя можно проследить в глубокой древности. Еще греческий философ Аристоксен, ученик Аристотеля, предложил в IV веке до н. э. заменить строй Пифагора делением чистой кварты на пять равных полутонов, как и в современном равномерно-темперированном строе. Принцип деления октавы на двенадцать равномерных полутонов был дан в расчетах физика М. Мерсенна в XVI веке, но его предложение еще не воспринималось музыкантами того времени. Потребовалось более ста лет, пока Андреас Веркмайстер и его ученик Иоганн Нейдгардт теоретически обосновали и практически ввели, около 1691 года, двенадцатиступенную равномерную темперацию, в которой основной интервал — октава — делится на 12 одинаковых интервалов, полутонов, имеющих интервальный коэффициент

$$\sqrt[12]{2:1}=1{,}05946309$$

Родоначальники равномерной темперации ввели настройку квинт с уменьшением их ширины по сравнению с чистым интервалом на $^{1}/_{12}$ пифагорейской коммы, то есть на $^{1}/_{8{,}5}\cdot\ ^{1}/_{12}=^{1}/_{102}$ тона. Понятие «темперация» означает выравнивание интервальных соотношений между ступенями звуковой системы.

Отношения частот двенадцати тонов в равномерно-темперированном строе можно приблизительно выразить следующими дробями, полученными еще Гельмгольцем и в дальнейшем несколько уточненными [9] $^{1}/_{1}$; $^{89}/_{84}$; $^{55}/_{49}$; $^{44}/_{37}$; $^{63}/_{50}$; $^{295}/_{221}$; $^{99}/_{70}$; $^{442}/_{295}$; $^{100}/_{63}$; $^{37}/_{22}$; $^{98}/_{55}$; $^{168}/_{89}$; $^{2}/_{1}$.

В таблице 1 сравниваются интервальные коэффициенты для получения частот звуков чистого и равномерно-темперированного строев построением интервалов от тона *до*. Величина интервалов дана также в центах*.

Как видно из таблицы 1, полутон в чистом строе в зависимости от его положения в октаве имеет разную величину. В равномерно-темперированном строе все полутоны равны.

Таблица 1

Ноты	Чистый строй		Темперированный строй		Ошибка в процентах
	соотношение частот	интервал, цент	соотношение частот	интервал, цент	
до	1,00000	0	1,00000	0	0
до-диез	1,04166	70	1,05946	100	1,7
ре-бемоль	1,08000	112			
ре	1,12500	204	1,12246	200	0,25
ре-диез	1,17187	274	1,18921	300	1,47
ми-бемоль	1,20000	316			
ми	1,25000	386	1,25992	400	0,8
фа-бемоль	1,28000	427			
ми-диез	1,30208	455	1,33484	500	0,11
фа	1,33333	498			
фа-диез	1,38889	568	1,41421	600	1,79
соль-бемоль	1,44000	631			
соль	1,50000	702	1,49831	700	0,12
соль-диез	1,56250	773	1,58740	800	1,59
ля-бемоль	1,60000	815			
ля	1,66667	883	1,68179	900	0,91
ля-диез	1,73611	954	1,78180	1000	2,63
си-бемоль	1,80000	1016			
си	1,87500	1088	1,88775	1100	0,7
до-бемоль	1,92000	1129			
си-диез	1,95313	1159	2,00000	1200	0,0
до^{1}	2,00000	1200			

С помощью интервальных коэффициентов высчитаны частоты тонов малой октавы (4 тона), первой и второй октав (3 тона) равномерно-темперированного строя для двух эталонов частоты 440 и 435 Гц, а для сравнения в таблице 2 (см. с. 57) даны также и частоты тонов чистого строя (за точку отсчета взят тон *до*^{1} = 261,62 Гц).

* Цент — одна из единиц для измерения звуковысотных интервалов. Один полутон равен 100 центам. Цент — логарифмическая единица; его величина, выраженная в единицах частоты — герцах, увеличивается от нижних частот к верхним. Так, один цент в области *ля* первой октавы равен примерно 0,26 Гц, а в области *ля* малой октавы = 0,13 Гц.

Таблица 2

Название ноты	Равномерно-темперированный строй		Чистый строй *до*^{1}=261,62 Гц
	ля^1=440 Гц	*ля*^{1}=435 Гц	
соль-диез	207,65	205,29	—
ля	220,00	217,50	—
ля-диез	233,08	230,43	—
си	246,94	244,13	—
до^1	261,62	258,65	261,62
до-диез	277,18	274,03	—
ре^1	293,66	290,33	294,32
ре-диез^1	311,13	307,59	313,95
ми^1	329,63	325,88	327,02
фа^1	349,23	345,26	348,82
фа-диез^1	369,99	365,79	—
соль^1	391,99	387,54	392,43
соль-диез^1	415,30	410,59	418,60
ля^1	440,00	435,00	436,03
ля-диез^1	466,16	460,87	465,17
си^1	493,88	488,27	490,54
до^2	523,25	517,31	523,20
до-диез^2	554,36	548,06	—
ре^2	587,33	580,65	—

Именно этот диапазон (*соль-диез* — *ре*^{2}) или более узкий *ля* — *ля*^{1} настройщик фортепиано темперирует в первую очередь, и от правильной настройки этого диапазона зависит правильность настройки всего инструмента в целом.

Частоты тонов, выходящих за пределы таблицы, легко могут быть получены октавными ходами вверх или вниз с удвоением частоты при повышении на октаву и делением частоты вдвое при понижении на октаву (см. частоты звуков равномерно-темперированного строя в приложении). Действительные же частоты тонов, полученные после настройки инструмента, близки к табличным, но полного совпадения никогда не бывает по причинам, которые будут рассмотрены ниже.

Надо сказать, что, с музыкально-акустической точки зрения, и чистый, и равномерно-темперированный строй имеют существенные недостатки, выявляющиеся в процессе исполнения музыки. Благозвучие интервалов и аккордов чистого строя, их красота и сочность, которые высоко оцениваются музыкантами и слушателями, представляют в музыкальной практике исключение. Одни только чистые интервалы не всегда получаются даже на инструментах со свободной интонацией, не говоря уже о темперированном строе, в котором нечистое звучание аккордов уже заложено в системе настройки. И дело не только в квалификации исполнителя, совершенстве его интонационного мастерства. Теоретически невозможно исполнять одни чистые интервалы во всем диапазоне музыкального инструмента.

Поясним сказанное примерами. Подсчитаем разностные тона для чистого и темперированного аккорда. Возьмем, к примеру, мажорный
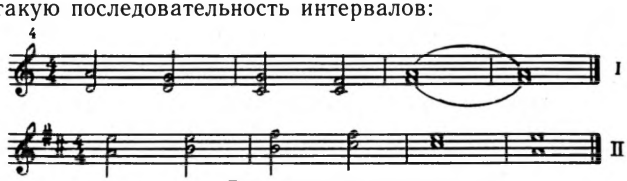
аккорд *ля*^{1} — *до-диез*^{2} — *ми*^{2}:440, 550 (=440· $^5/_4$) и 660 Гц (=440· $^3/_2$). Получим следующие разностные тоны: 550—440=110, 660—550=110 и 660—440=220 Гц. Таким образом, в приведенном чистом аккорде можно услышать разностные тоны 110 и 220 Гц. При небольшой неточности интонирования чистого аккорда появившиеся отклонения частот еще малозаметны. Высчитаем теперь разностные частоты того же аккорда, но составленного из темперированных тонов. Для *ля*^{1} оставляем ту же частоту 440 Гц, для *до-диез*^{2} — 554,4 (=440· 1,26) и для *ми*^{2} — 659,26 (=440· 1,4983) Гц. Соответствующие разностные тоны будут: 554,4—440=114,4 Гц, 659,26—554,4=104,86 Гц и 659,26—440=219,26. Все три разностных тона имеют отличающиеся частоты, что и даст заметные на слух биения в аккорде.

Чистые аккорды можно слушать в игре квартетов смычковых инструментов, в многоголосии квалифицированных певческих ансамблей. Но во многих случаях в больших хоровых ансамблях не придерживаются строго чистой интонации. Это особенно заметно в хоровом исполнении на радио. Каждый отдельный певец имеет индивидуальное представление о высоте тона и модулирует, кроме того, высоту звука вибрато. При этом сдвиг частоты достигает более полутона. В результате даже в унисонах существуют широкие полосы высот, которые в целом приводят к шумовому гудению, «клокотанию», и слушатель с трудом обнаруживает правильный тон. Нередко и дирижеры смотрят на такое нечистое исполнение как на неизбежное зло.

При пении интонационные отклонения, дающие биения не более 10 Гц, еще не обнаруживают особой шероховатости. Грубое, нечистое звучание, создающее впечатление «бурления», возникает тогда, когда частота биений достигает примерно 16 в секунду, что может восприниматься как низкий разностный тон.

Определенные проблемы возникают и при исполнении музыки мелодического склада, для которой чистый строй считается наилучшим.

Нормальная высота настройки любого инструмента, ансамбля, хора — это частота *ля*^{1}=440 Гц. Она определена стандартом. Это действительно так, и в отношении настройки инструментов с фиксированным звукорядом иных мнений не должно быть: пианино, рояли, аккордеоны, баяны, гитары и т. д. должны быть настроены в соответствии со стандартом. Но вот оказывается, музицирование в чистом или пифагорейском строе не может выполнить требования постоянства высоты *ля*^{1} 440 Гц. В чем тут дело? Построим примеры ходов по чистым интервалам с периодическим возвратом к тону *ля*^{1}. Возьмем такую последовательность интервалов:



Последовательность чистых интервалов

Вычислим полученные частоты тонов. Если все интервальные ходы построены чистыми интервалами, то тон *ля*^{1} в верхнем примере оканчивается с частотой 434,57 Гц, а в нижнем — с частотой 445,5 Гц. Соответственно, на — 5,43 Гц ниже и 5,5 Гц выше нормы 440 Гц. Можно было бы привести другие примеры и убедиться в появлении все новых и новых значений частоты для тона *ля*^{1}. С теоретической точки зрения, таких новых частот *ля*^{1} может быть получено бесконечное множество. Можно подобрать такие музыкальные примеры, в которых при чистом строе отклонения тона *ля*^{1} достигнут более плюс-минус полутона. Это обстоятельство, которое можно подтвердить экспериментальными измерениями частоты, должно учитываться в хоровой практике.

Если бы мы захотели найти место каждого чистого интервала в одной системе, то есть построенной от одной исходной частоты, то убедились бы, что это невозможно. Иными словами, ни музыкальный инструмент, ни певец не в состоянии в сколько-нибудь сложной музыке исполнить все интервалы произведения в чистом строе одной системы. В зависимости от последовательности ходов чистых интервалов встречающиеся одноименные тона по частоте будут различаться. Следовательно, исполнение музыки на инструментах со свободной интонацией чистыми интервалами возможно только с использованием множества систем чистого строя, когда из каждой такой системы берутся только один чистый интервал и его обращение.

В определенном смысле мы будем не очень далеки от истины, если скажем, что реально в настройке существует только равномерно-темперированный строй (или, по крайней мере, то, что приближается к нему). Действительно, ни один музыкальный инструмент не настроен полностью в системе пифагорова строя или чистого строя. Да, на инструментах со свободной интонацией музыкант берет чистые интервалы, но все эти чистые интервалы относятся не к одной какой-либо системе пифагорова или чистого строя, а ко многим системам, для которых частоты одноименных тонов не совпадают ни теоретически, ни практически (другое дело, что разница может и не быть большой). Музыкант играет отдельные чистые интервалы, относящиеся к разным системам.

Только при игре в равномерно-темперированном строе частота исходного тона *ля*^{1} сохраняется при любых модуляциях из одной тональности в другую.

Однако исполнительство в чистом и в пифагоровом строях имеет все же и практическое значение в музыкальной практике сегодняшнего дня. Поэтому приходится решать, нужно ли требовать точного соблюдения высоты тона *ля*^{1} 440 Гц? Как норма для настройки, такая высота тона может быть выдержана с необходимой точностью. Но если требовать при пении a cappella соблюдения 440 Гц во всех случаях, то это равносильно требованию петь, употребляя только равномерно-темперированные интервалы. Ни о каком благозвучии чистых интервалов в этом случае говорить не придется. Единственно, чего нужно добиваться,— это соблюдения общей средней высоты *ля*^{1} в исполняемом произведении.

Иногда некоторые музыканты предлагают настраивать инструмент с фиксированным звукорядом, чистыми квинтами, забывая о том, что получающийся при этом строй является незамкнутым и осуществить такую настройку нельзя.

Каким же образом настройщик получает нужную в инструменте высоту тона? Основное средство — слуховой контроль биений.

В качестве критерия настройки в унисон удобно использовать контроль числа биений в секунду.

Обычно рекомендуется считать биения в течение, например, 10 с, но это не совсем точный метод, так как трудно различить дробные части биений. Лучше удается подсчет биений, если с помощью секундомера измерить время определенного числа биений, если, конечно, они не слишком часты. Существуют электронные метрономы с индикацией ритма световыми вспышками. С помощью такого метронома можно синхронизировать биения с частотой вспышек и по шкале метронома, предварительно отградуированной, получить отсчет числа биений. Механический метроном для этой цели непригоден, так как его громкие щелчки будут только маскировать биения. Слишком быстрые или, наоборот, слишком медленные биения контролировать трудно. Обычно считается, что точность счета достаточна при числе биений от одного за 10 с до нескольких биений за 1 с. При известной тренировке и соответствующем опыте настройщикам удается контролировать 5, 10 и даже 20 биений в секунду, но в таком случае биения не считают, а запоминают характер их звучания, то есть ту окраску звука, которую придают интервалу соответствующие биения.

Достаточно легко подсчитать биения и меньше двух в секунду, но не у любого инструмента это возможно, так как чем реже биения, тем длительнее должно быть звучание для их подсчета. Не все инструменты по своему принципу звукообразования обеспечивают достаточное для этой цели время звучания. Легко заставить звучать практически как угодно долго язычковый инструмент и очень точно настроить его, но подобного преимущества нет у фортепиано. Даже басовые струны, имеющие самое большое время звучания, находятся в колебании примерно 40—50 с у рояля и всего 20—25 с у пианино. Теноровые струны колеблются примерно 10 с, а самые короткие дискантовые струны около 1 с. Фактически же пригодное для прослушивания время еще меньше, если учесть, что часто необходимо слушать биения между обертонами, затухающими быстрее основного тона струны. Биения, которые для своего определения требуют времени больше, чем звучит струна, уже нельзя подсчитать с высокой точностью.

Мы теперь знаем, какие частоты должны излучать музыкальные инструменты, рассчитать это было делом сравнительно нетрудным. Более трудная задача состоит в обеспечении требуемой высоты тонов в процессе настройки.

В технической литературе часто отсутствуют указания, как же достичь выполнения предложенных там рекомендаций практически. И не многие настройщики в состоянии правильно разъяснить, что же

скрывается за теми обычными операциями, которые осуществляются при настройке музыкальных инструментов. К рассмотрению этих вопросов мы и приступаем в следующем разделе.

2. Физическая сущность настройки интервалов

Тоны определенной высоты получают посредством настройки интервалов с помощью контроля биений. Основные интервалы, используемые при настройке,— это прима (унисон), октава, квинта, кварта, большая и малая терции, большая и малая сексты, большая децима. Музыкальные звуки, как известно, сложны по своему составу, то есть содержат ряд гармонических составляющих, кратных по частоте основному тону. В этом нетрудно убедиться при помощи флажолетов. Если, например, слегка коснуться пальцем точно середины струны и после ее щипка сразу же снять палец со струны, мы явственно услышим вторую гармонику. Если место касания расположено на одной трети длины струны, то подобным же образом получим ясно слышимую третью гармонику. Этот опыт наглядно показывает наличие множества простых тонов, составляющих сложный звук струны. Поэтому когда камертон имеет частоту, близкую к частоте первой гармоники, то есть основного тона, то биения возникают между этими двумя частотами. Возьмем другой камертон, близкий по частоте ко второй гармонике той же струны,— биения будут образовываться уже между звуком камертона и этой второй гармоникой и т. д. Так можно «прощупать» до десятка гармоник сложного звука. И везде, где в звуках интервала окажутся унисоны (примы) между какими-либо гармониками, эти унисоны при не совсем точной их настройке обязательно дадут биения. Поэтому наша задача будет заключаться в нахождении унисонов в интервалах, независимо от того, какие гармоники дают эти унисоны. Гармоники, создающие унисон, называют совпадающими, независимо от точности этого унисона.

Если настраивать струну по камертону, то возникает лишь один вид биений, а именно — между основными тонами струны и камертона.

А что мы услышим, когда одну струну будем настраивать по другой в унисон? Здесь уже становятся заметными биения как между первыми гармониками, так и между вторыми и третьими. Стоит слегка расстроить частоты совпадающих гармоник, как между ними возникнут биения с частотой, определяемой разностью частот этих гармоник. Сравним, например, гармонические ряды для струн, первые гармоники которых не совсем точно настроены, в единицах Гц:

440	880	1320	1760	...
439	878	1317	1756	...

Нетрудно подсчитать биения между соответствующими парами гармоник — они равны 1, 2, 3, 4 биений в секунду. Следовательно, одновременно должно быть слышно несколько видов биений. Внимательное вслушивание в слегка расстроенный хор струн или язычков подтверждает данный вывод. Обычно хорошо слышны два-три вида биений, различающихся между собой как по силе, так и по числу.

Естественно, что моменты синфазности для разных пар совпадающих гармоник приходятся на разное время. Если, например, первые гармоники в один момент времени находятся в антифазе, то они ослабляют друг друга, громкость их мала, и в этот момент времени лучше слышны совпадающие гармоники более высокого порядка, находящиеся в состоянии синфазности. Можно заметить даже как бы скачкообразное, на мгновение, повышение тона на октаву. Добавление к двум струнам третьей (в унисон) изменяет картину биений, они становятся как бы «размазанными», нечеткими; звучание трех струнного хора, таким образом, может замаскировать ошибки настройки.

Иногда слышны биения и в одной струне, что затрудняет настройку. Причин этого явления может быть много. Это — овальность поперечного сечения струны, неравномерность распределения плотности материала по длине, несколько различная в разные моменты времени плоскость колебания (вращение струны при колебаниях), неплотная посадка конца рабочей части струны на штифт штега* пианино или рояля, плохая обработка кланг штабика** на чугунной раме — нечеткая линия отсечки струны, вызывающая изменение длины колеблющейся части струны при больших амплитудах, близкое совпадение одной из резонансных частот деки с частотой струны, что приводит к появлению биений и т. д. Эти биения устранить довольно трудно, замена струны не всегда помогает. Неустранимые биения могут появиться и в результате взаимодействия двух или трех струн. Это произойдет в том случае, если невозможно совместить по частоте все гармоники струн одновременно. Так мы добьемся устранения биений между первыми гармониками струн, но могут остаться при этом биения между другими гармониками, если их частоты не совпадут одновременно с совпадением первых гармоник. Причинами могут быть различная длина струн в хоре, различная жесткость материала керна, различный диаметр струн и др.

Проверка точности настройки струн в унисон клавишных и язычковых инструментов показывает, что абсолютно точного унисона не существует. Даже высококвалифицированные настройщики часто оставляют в унисонах десятые доли биений в секунду. Объясняется это невозможностью достижения идеального результата и тем, что расстройка сознательно допускается настройщиками для «оживления» звука. Незначительная, еле уловимая расстройка унисонов

---

* Штег — деревянный брусок со штифтами, приклеенный к резонансовой деке.
** Кланг штабик — ребро отсечки струны на чугунной раме.

благоприятно сказывается на тембре звука, делает его ярче, выразительнее, полетнее. Но важно не перейти границу, за которой начинается плохая настройка. О точности настройки будет сказано в следующих разделах.

После настройки унисона обычно следует настройка октавы. Какие биения слышны в октаве? Мы знаем, что соотношение частот нот в октаве 1:2 (или 2:1, что то же самое), поэтому подходящим примером для октавы будут такие, например, два звука со следующими частотами гармоник, Гц:

440	880	1320	1760	...
880	1760	2640	3520	...
1	2	3	4	...
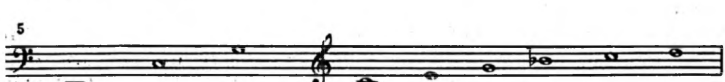
Самыми близкими частотами, между которыми могут возникать биения в октаве (при неточной настройке), как показывает данный пример, обладают вторая гармоника первого звука и первая гармоника второго звука, то есть гармоники с частотой 880 Гц.

Приведенные выше числовые примеры содержат интересную закономерность: в унисоне соотношение частот основных гармоник 1:1, и биения возникают между первой гармоникой одного звука и первой гармоникой второго звука (1 и 1). Далее, в октаве отношение частот 1:2, и биения возникают между первой гармоникой верхнего звука и второй гармоникой нижнего звука (1 и 2). Продолжая рассуждать таким образом, легко вывести правило, по которому, зная интервальный коэффициент, можно сразу сказать, между какими гармониками, составляющими интервал звуков, образуются биения. Надо только учесть, что большее число в интервальном коэффициенте соответствует номеру гармоники нижнего звука, а меньшее — номеру гармоники верхнего звука интервала.

Выпишем коэффициенты основных консонансных интервалов натурального звукоряда* — именно они используются в настройке.

унисон	октава	квинта	кварта	большая терция	малая терция	большая секста
1:1	1:2	2:3	3:4	4:5	5:6	3:5

Последовательность расположения интервалов в натуральном звукоряде легко прослеживается, если записать в нотном обозначении гармоники, например, от ноты *до* большой октавы:



Гармоники от ноты *до* большой октавы

* Натуральный (или гармонический) звукоряд — ряд из гармоник.

Таким образом, в натуральном звукоряде интервалы располагаются в следующем порядке: унисон, октава, квинта, кварта, большая терция, малая терция, малая терция, большая секунда, большая секунда и т. д. Зная последовательность интервалов между гармониками, достаточно просто написать натуральный звукоряд от верхней и нижней ноты выбранного интервала и установить гармоники, образующие в этом интервале унисон. Покажем это на примере квинты (*ля*^{1} — *ре*^{1}) и кварты (*соль*^{1} — *ре*^{1}):

Интервал	Номера гармоник					
	1	2	3	4	5	6
квинта *ля*^{1} — *ре*^{1}	*ля*^{1} *ре*^{1}	*ля*^{2} *ре*^{2}	*ми*^{3} *ля*^{2}	*ля*^{3} *ре*^{3}	*до*^{4} *фа*^{3}	*ми*^{4} *ля*^{3}
кварта *соль*^{1} — *ре*^{1}	*соль*^{1} *ре*^{1}	*соль*^{2} *ре*^{2}	*ре*^{3} *ля*^{2}	*соль*^{3} *ре*^{3}	*си*^{3} *фа*^{3}	*ре*^{4} *ля*^{3}

Из таблицы наглядно видно, что в интервале квинты унисон образуется между второй гармоникой верхнего звука и третьей гармоникой нижнего звука, а в интервале кварты — между третьей гармоникой верхнего звука и четвертой гармоникой нижнего звука (в таблице для квинты — это *ля*^{2}— *ля*^{2}, для кварты — *ре*^{3}— *ре*^{3}). Тон *ля*^{2} называется тоном совпадения звуков *ля*^{1} и *ре*^{1}, аналогично *ре*^{3}— тон совпадения звуков *соль*^{1} и *ре*^{1}. В других интервалах тоны совпадения устанавливаются таким же способом.

Вернемся еще раз к биениям обертонов. Предположим, например, что мы слушаем правильно настроенную темперированную квинту *ре*^{1} — *ля*^{1} с частотами основных тонов 293,66 и 440,00 Гц соответственно. Предположим для простоты рассуждений, что обертоны кратны основным тонам. Тогда получим следующие два гармонических ряда, Гц:

ля^1	440	880	1320	1760	2200	2640	... Гц
ре^1	293,66	587,33	880,99	1174,66	1468,32	1761,99	.. Гц

Нетрудно заметить, что частота биений между второй гармоникой верхнего звука и третьей гармоникой нижнего звука будет равна 880,99—880=0,99 или округленно 1 Гц. Но биения дадут также четвертая гармоника верхнего звука с шестой гармоникой нижнего звука. Эти биения, хотя они и более слабые по сравнению с нижними биениями, будут достаточно хорошо слышны и иметь частоту 1761,99—1760=1, 99 или округленно 2 биения в секунду, то есть в два раза чаще. Если не представлять себе акустические процессы, происходящие при колебаниях струн в настраиваемом интервале, то легко ошибиться и принять за ориентир верхние биения, сводя их частоту к 1 биению в секунду. В итоге квинта будет темперирована непра-

вильно. Верхние более частые биения в конечном счете не только не мешают настройке, но и помогают более точно установить зону темперации интервала и величину темперации. Важно только уметь переключать на них внимание. Переключение необходимо на подходе к точной темперации интервала, когда нижние биения из-за их растянутости на фоне общего затухания тонов становятся более трудными для контроля, в то время как верхние биения очень четко слышны и нужно только оставлять их в два раза более частыми, по сравнению с частотой нижних биений. Ориентировке помогает и то обстоятельство, что верхние биения звучат на октаву выше (сравните частоту второй и четвертой гармоники *ля*[1], а также третьей и шестой гармоники *ре*[1] в вышеприведенном примере).

Что удивительно — в популярных брошюрах, пособиях по настройке, авторы которых прекрасно знают настройку, ничего не говорится об этом важном для обучения моменте — «многоголосии биений», с которым неизбежно сталкивается любой начинающий настройщик, который только после многочисленных проб и ошибок, блужданий и неуверенности в овладении темперированием интервалов начинает понимать роль и значение верхних биений в настройке квинт и кварт, начинает их использовать. Правило удвоения частоты для верхних биений легко запоминаемо, и если в среднем квинту надо темперировать по 1 биению в секунду, а кварту по 1,4 биения в секунду, то частота верхних биений в среднем будет соответствовать 2 биениям в секунду и 2,8 биений в секунду. Этот момент, кажется, является новым в теории настройки (но не в практике квалифицированных настройщиков, которые, однако, о нем не любят распространяться).

Полноправное введение верхних биений квинт и кварт в процесс настройки облегчит и ускорит овладение начинающими настройщиками техникой настройки. Это — прекрасная иллюстрация общеизвестного философского тезиса о том, что нет ничего практичнее хорошей теории.

Мы уже знаем, что темперация — уход от чистых интервалов — сопровождается появлением биений. Как правильно выбрать необходимое направление темперации и частоту биений? Как посчитать биения?

Это нетрудно сделать, взяв за основу прослеженную выше связь числителя и знаменателя интервального коэффициента с номерами гармоник, дающих биения. При этом необходимо знать частоты первых гармоник (основных тонов), рассчитанные выше для равномерно-темперированного строя с помощью интервального коэффициента $\sqrt[12]{2}=1{,}05946309$. Общую формулу для подсчета биений выведем на примере квинты. В квинте частота третьей гармоники нижнего звука равна $3f_н$. где $f_н$ — частота основной гармоники нижнего звука, а частота второй гармоники верхнего звука — $2f_в$, где $f_в$ — частота основной гармоники верхнего звука. Отсюда определим частоту биений как разность $2f_в - 3f_н$.

Пусть мы хотим получить квинту с частотами первых гармоник 200,3 и 300 Гц (частоты выбраны лишь для примера и не соответ-

ствуют какой-либо реальной ноте). После подстановки получим: 2· 300—3· 200,3=600—600,9= —0,9 биений в секунду. Знак минус перед результатом показывает, что чистый интервал должен быть уменьшен примерно на одно биение в секунду, как это необходимо для темперированной квинты. Обозначим частоту биений $f_б$, тогда получим следующее выражение для подсчета биений в любых темперированных интервалах:

$$f_б = mf_в - nf_н, \qquad (9)$$

где $f_в$ и $f_н$ — частоты основного тона верхнего и нижнего звуков соответственно (их берут из шкалы частот равномерно-темперированного строя); m и n — числитель и знаменатель интервального коэффициента, в котором первым поставлен верхний звук* (например, в квинте 2:3, где m=2, n=3).

При таком методе определения необходимого числа биений в интервалах положительное значение разности (знак +) покажет, что данный интервал шире соответствующего чистого интервала, а отрицательное значение (знак —) будет указывать на то, что данный интервал у́же чистого.

Нет необходимости каждый раз делать подсчет числа биений темперированных интервалов в диапазоне *ля* — *си*^{1}, так как их значения можно взять из таблицы на с. 67, где они приведены для стандарта высоты *ля*^{1} = 440 Гц.

Как можно судить по знакам перед числами биений в темперированных интервалах, приведенных в таблице выше, два интервала — квинта и малая терция — настраиваются суженными, остальные интервалы шире чистых. Число биений в секунду увеличивается с перемещением интервала вверх в области темперирования** *ля* — *ля*^{1} от 12 до 24 для малой терции (числа биений округлены), от 9 до 18 для большой терции, от 1 до 2 для кварты, от 0,74 до 1,48 для квинты и от 10 до 20 для большой сексты. В середине рассмотренного диапазона округленные значения биений равны: 17 для малой терции, 12 для большой терции, 1,4 для кварты, 1,1 для квинты и 14 для большой сексты.

Повышение частоты биений в темперированных интервалах настроенного инструмента при перемещении интервалов вверх является следствием общего математического принципа получения темперированного строя.

Отношение частот двух соседних тонов в равномерно-темперированном строе постоянно — это $\sqrt[12]{2}$.

---

* Интервальный коэффициент для интервала, в котором первый звук выше второго (интервал направлен вниз), есть величина, обратная коэффициенту для того же интервала, направленного от нижнего звука к верхнему.

**Областью темперирования считается тот участок звукоряда музыкального инструмента, в котором производится начальный этап настройки — темперирование интервалов.

Нижний тон интервала	Малая терция	Большая терция	Чистая кварта	Чистая квинта	Большая секста	Малая секста
ля	до^1 −11,87	до-диез^1 +8,73	ре^1 +0,99	ми^1 −0,74	фа-диез^1 +9,98	фа^1 −13,86
ля-диез	до-диез^1 −12,58	ре^1 +9,25	ре-диез^1 +1,05	фа^1 −0,79	соль^1 +10,58	фа-диез^1 −14,68
си	ре^1 −13,32	ре-диез^1 +9,79	ми^1 +1,12	фа-диез^1 −0,83	соль-диез^1 +11,21	соль^1 −15,56
до^1	ре-диез^1 −14,12	ми^1 +10,38	фа^1 +1,18	соль^1 −0,89	ля^1 +11,87	соль-диез^1 −16,48
до-диез^1	ми^1 −14,96	фа^1 +11,00	фа-диез^1 +1,25	соль-диез^1 −0,94	ля-диез^1 +12,58	ля^1 −17,46
ре^1	фа^1 −15,84	фа-диез^1 +11,66	соль^1 +1,33	ля^1 −1,00	си^1 +13,33	ля-диез^1 −18,50
ре-диез^1	фа-диез^1 −16,79	соль^1 +12,35	соль-диез^1 +1,41	ля-диез^1 −1,05	до^2 +14,12	си^1 −19,60
ми^1	соль^1 −17,78	соль-диез^1 +13,08	ля^1 +1,49	си^1 −1,12	до-диез^2 +14,96	до^2 −20,77
фа^1	соль-диез^1 −18,85	ля^1 +13,86	ля-диез^1 +1,58	до^2 −1,18	ре^2 +15,84	до-диез^2 −22,0
фа-диез^1	ля^1 −19,96	ля-диез^1 +14,68	си^1 +1,67	до-диез^2 −1,25	ре-диез^2 +16,79	ре^2 −23,31
соль^1	ля-диез^1 −21,15	си^1 +15,55	до^2 +1,77	ре^2 −1,32	ми^2 +17,79	ре-диез^2 −24,69
соль-диез^1	си^1 −22,41	до^2 +16,48	до-диез^2 +1,87	ре-диез^2 −1,40	фа^2 +18,84	ми^2 −26,16
ля^1	до^2 −23,74	до-диез^2 +17,46	ре^2 +1,98	ми^2 −1,48	фа-диез^2 +19,96	фа^2 −27,72
ля-диез^1	до-диез^2 −25,16	ре^2 +18,50	ре-диез^2 +2,10	фа^2 −1,58	соль^2 +21,16	фа-диез^2 −29,37
си^1	ре^2 −26,64	ре-диез^2 +19,58	ми^2 +2,24	фа-диез^2 −1,66	соль-диез^2 +22,42	соль^2 −31,11

Разность частот в интервалах растет с перемещением интервалов вверх. Например, если частоты звуков *ля* есть 27,5; 110; 220; 440 и т. д., то $55 - 27{,}5 = 27{,}5$ (октава), $110 - 55 = 55$ (октава), $220 - 110 = 110$ (октава) и т. д. Продолжая рассуждение таким образом, легко убедиться в том, что если мы переносим вверх на октаву темперированный интервал, имеющий, скажем, 1 биение в секунду, то мы повышаем вдвое все частоты, определяющие этот интервал, и таким образом удваиваем и разности между этими часто-

тами. Поэтому, например, кварта *си* — *ми*^{1} имеет 1,12 биений в секунду, а кварта на октаву выше *си*^{1} — *ми*^{2} — 2,24 биений.

Наши рассуждения сводятся к следующему:

1. Интервальный коэффициент (соотношение частот) — в равномерно-темперированном строе есть постоянная величина, не зависящая от места интервала в звукоряде.

2. Разность частот нот, составляющих одноименные интервалы, увеличивается с перемещением интервала вверх ровно в $\sqrt[12]{2}$ при перемещении интервала на один полутон.

3. Разность частот между двумя гармониками тонов совпадения интервала есть единственный фактор, определяющий частоту биений в интервале.

4. Число биений в любом заданном темперированном интервале увеличивается пропорционально частотам тонов, составляющих интервал.

Следует запомнить также два более простых и конкретных правила при перемещении интервала на октаву вверх:

а) разность частот тонов, составляющих этот интервал, удваивается;

б) число биений в этом интервале тоже удваивается.

В соответствии с приведенными правилами можно подсчитать необходимую частоту биений в любых интервалах и в любом месте музыкального звукоряда, а формула (9) позволяет определить и направление темперации интервала — сужение или расширение соответствующего чистого. Таким образом, любой тон можно настроить по любому интервалу: октаве, кварте, большой и малой терциям и большой сексте.

Например, если верхние тона указанных интервалов уже настроены, то нижний тон настраивают по выбранному интервалу, устанавливая необходимое число биений, расширяя или сужая чистый интервал. Выбор интервала для настройки определяется легкостью и точностью настройки.

Рассмотрим, какую точность обеспечивают пригодные для настройки интервалы. Возьмем для этого шкалу частот, построенных по соотношениям натурального ряда чисел (началом будет нота *до*^{1}).

Показатель	Название ноты и интервал					
	Унисон *до*^{1}	*ми-бемоль*^{1} малая терция	*ми*^{1} большая терция	*фа*^{1} кварта	*соль*^{1} квинта	*ля*^{1} большая секста
Частота, Гц	261,62	313,95	327,02	348,82	392, 43	436,03
Соотношение частот в интервале	1:1	5:6	4:5	3:4	2:3	3:5

Настройка натуральных интервалов в принципе не отличается от настройки темперированных. Разница лишь в отсутствии в натураль-

ных интервалах биений, но как в том, так и в другом случае контролируются биения между гармониками в области тона совпадения звуков интервала. Поэтому выводы в отношении точности настройки пригодны как для чистых, так и для темперированных интервалов.

При совершенно точной настройке чистого интервала биений не должно быть. Допустим, тон *до*^{1} нужно настроить в малую терцию по тону *ми-бемоль*^{1}, в большую терцию — по тону *ми*^{1}, в кварту — по тону *фа*^{1}, в квинту — по тону *соль*^{1}, в большую сексту — по тону *ля*^{1} и в октаву — по тону *до*^{2}. Для чистых интервалов частота тона *до*^{1} равна 261,62 Гц. Какие появятся биения в этих интервалах, если частоту тона *до*^{1} понизить всего на 0,1 Гц, то есть до 261,52 Гц. В соответствии с формулой (9) в перечисленных интервалах возникнут биения следующих частот, Гц:

в малой терции	$5\times 313{,}95-6\times 261{,}52=0{,}63$;
в большой терции	$4\times 327{,}02-5\times 261{,}52=0{,}48$
в кварте	$3\times 348{,}82-4\times 261{,}52=0{,}38$;
в квинте	$2\times 392{,}43-3\times 261{,}52=0{,}30$;
в большой сексте	$3\times 436{,}03-5\times 261{,}52=0{,}49$;
в октаве	$1\times 523{,}24-2\times 261{,}52=0{,}20$;

Мы видим, что наибольшее влияние расстройки нижнего тона интервала на 0,1 Гц сказывается на малой терции и наименьшее — на октаве. Необходимо теперь оценить степень заметности на слух расстройки того или иного интервала (о точности настройки речь будет впереди), но нам здесь потребуется практически достижимая точность в настройке прим.

По данным исследований, известных из литературы [10], вполне допустимая ошибка настройки примы в среднем регистре составляет всего 2—3 цента. В середине области темперирования два цента составляют примерно 0,4 Гц, то есть изменение в приме частоты одного из тонов на 0,4 Гц вызовет изменение биений на ту же величину и будет заметно на слух. Хотя мы рассматриваем настройку не примы, а других интервалов, биения образуются между такими гармониками, интервал между которыми составляет именно приму, и поэтому вполне оправдано использование данной ошибки настройки — 0,4 Гц.

Сравним теперь заметную на слух ошибку настройки с величиной биений, возникающих в чистых интервалах при расстройке нижнего тона *до*^{1} на 0,1 Гц. Малая частота биений в интервалах октавы и квинты приведет к тому, что данная величина расстройки не контролируется с помощью этих интервалов. Кварта — более чувствительный к данной ошибке интервал, ее биения уже заметны на слух. Но самыми чувствительными в данном примере интервалами оказались малая терция, большая секста и большая терция. Конечно, различная острота слуха у разных настройщиков и тщательность выполнения настройки могут несколько сдвинуть в ту или иную сторону границу разделения интервалов на «чувствительные» и «нечувствительные», но в любом случае остается общая закономерность влияния величины расстройки основного тона на число биений в разных интервалах. Последнее зависит только от физических параметров

колебательных процессов, а не от субъективного восприятия их.

Подсчитаем теперь точность настройки тона *до*^{1} — по различным интервалам при условии, что в любых интервалах слышны изменения на 0,4 Гц. Для этого формулу (9) перепишем относительно частоты нижнего звука интервала:

$$f_н = \frac{mf_в - f_б}{n}, \qquad (10)$$

где $f_н$ — частота нижнего звука,
$f_в$ — частота верхнего звука,
$f_б$ — частота биений,
m — номер гармоники верхнего звука,
n — номер гармоники нижнего звука.

Подставив числовые значения в формулу (10), получим частоту *до*^{1}, настроенного по разным интервалам, Гц:

по малой терции *ми-бемоль*^{1}	$\frac{5\times 313{,}95-0{,}4}{6}=261{,}56$	(неточность 0,06 Гц или 0,023%);
по большой терции *ми*^{1}	$\frac{4\times 327{,}02-0{,}4}{5}=261{,}53$	(неточность 0,09 Гц или 0,034%);
по кварте *фа*^{1}	$\frac{3\times 348{,}82-0{,}4}{4}=261{,}51$	(неточность 0,11 Гц или 0,042%);
по квинте *соль*^{1}	$\frac{2\times 392{,}43-0{,}4}{3}=261{,}49$	(неточность 0,13 Гц или 0,05%);
по большой сексте *ля*^{1}	$\frac{3\times 436{,}03-0{,}4}{5}=261{,}54$	(неточность 0,08 Гц или 0,031%);
по октаве *до*^{2}	$\frac{1\times 523{,}24-0{,}4}{2}=\widetilde{261{,}41}$	(неточность 0,21 Гц или 0,08%);

Расположив интервалы в порядке уменьшения относительной погрешности настройки, мы увидим, что наименьшую погрешность дают малая терция, большая секста и большая терция:

октава	квинта	кварта	большая терция	большая секста	малая терция
0,08%	0,05%	0,042%	0,034%	0,031%	0,023%

Терции и сексты очень чутко реагируют на малейшие отклонения от правильной установки высоты интервалов. Наименьшую точность настройки дают интервалы октавы, квинта и кварта. Поэтому приме-

нять интервал октавы при темперации не рекомендуется: чем больше октавных ходов, тем больше ошибок.

Влияет ли на точность настройки интервала порядок настройки его звуков: нижний после верхнего или наоборот? Мы только что установили, что чем выше совпадающие гармоники, по биениям которых выполняют настройку, тем точнее она должна быть: самый точный интервал — малая терция — образует приму между четвертой гармоникой верхнего звука и пятой гармоникой нижнего звука, и это обеспечивает наибольшую «чувствительность» интервала. Другими словами, точность настройки обеспечивается гармониками более высоких номеров, которые принадлежат нижнему звуку интервала. В качестве примера возьмем интервал квинты с частотами 220 и 330 Гц и построим от них гармонические ряды:

220	440	660	880	...
330	660	990	1320	...

Сузим интервал до появления 1 биения в секунду, повысив нижний звук либо понизив верхний; в зависимости от этого получим два варианта:

220,33	440,66	661	881,32	...
330	660	990	1320	...

Здесь одно биение, но 330 — 220,33 = 109,67 Гц, или:

220	440	660	880	...
329,5	659	988,5	1318	...

В этом случае в квинте также одно биение, однако разница частот первых гармоник несколько другая: 329,5 — 220 = 109,5 Гц.

Налицо парадокс: интервал один и тот же, в обоих случаях он сужен до появления одного биения, а разница частот первых гармоник различная, в зависимости от того, повышали ли нижний звук или понижали верхний: 109,67 Гц ≠ 109,5 Гц. Казалось бы, можно теперь утверждать, что при настройке интервала изменением нижнего звука повышается «чувствительность» интервала к ошибкам. Парадокс перестает быть парадоксом, как только мы заметим, что в приведенных выше гармонических рядах интервалы в обоих случаях близки, но не одинаковы по абсолютной высоте основных гармоник: нижний звук имеет в одном случае частоту 220,33 Гц, а во втором — ровно 220; аналогично дело обстоит и со вторым звуком. Мы уже знаем, что разность основных частот звуков, образующих интервал, повышается с передвижением интервала снизу вверх. Это и есть, оказывается, причина появления разницы в частотной ширине интервалов в нашем случае. Пересчетом легко показать, что точность настройки интервала не зависит от очередности настройки составляющих его звуков.

Выше было доказано, что бо́льшую точность настройки можно получить, используя малые и большие терции и большие сексты. Но легко ли работать с такими интервалами и одинаково ли хорошо слышны в них биения? И тут оказывается, что чем больше интервал приемлем для точной настройки теоретически, тем труднее его на-

страивать. Действительно, интенсивность гармоник, как правило, уменьшается с ростом номера, по крайней мере, в среднем диапазоне большинства музыкальных инструментов, с которого начинается настройка. Со снижением интенсивности гармоник снижается интенсивность и биений, которые необходимо слушать. Следовательно, если ряд интервалов построить по порядку нарастания легкости их настройки, получим ряд, обратный ряду, в котором интервалы следуют по порядку обеспечения ими точности настройки тонов: труднее всего настраивать малыми терциями и легче всего октавами, не считая прим. Получается замкнутый круг: легко настраивать октавами, квинтами и квартами, но точность, получаемая с их помощью, невелика; бóльшую точность обеспечивают большие и малые терции и большие сексты, но начинать с них настройку трудно.

Проблема на практике решается просто. С помощью легких для настройки интервалов октав, квинт и кварт делают приближенную, начальную настройку, а окончательную, точную — терциями и секстами. К сожалению, в учебной литературе для настройщиков настройка по терциям и секстам зачастую не освещается. Обычно предлагается настраивать только по квинтам, квартам, октавам, а иногда вообще рекомендуется обходиться только квинтами и октавами. На начальном этапе овладения настройкой это может быть в какой-либо мере оправдано, поскольку легче оперировать квинтами, квартами и октавами, но качество настройки при этом оставляет желать много лучшего; кроме того, при настройке квинтами и квартами очень легко незаметно перейти из зоны сужения интервала в зону расширения. Правда, у интервалов, обеспечивающих высокую точность настройки, есть свой недостаток, заключающийся в трудности контролирования их из-за большого числа биений в единицу времени. Прямой счет здесь невозможен, и приходится запоминать общий характер биений, их тембр. Человеческое ухо воспринимает биения в довольно широком диапазоне — от 0,01 (1 биение за 80—100 сек.) до 400 в секунду [6]. В этом диапазоне биения придают интервалам различную степень консонансности. До разницы частот звуков интервала в 4 Гц биения легко прослеживаются и каждое биение воспринимается в отдельности. Установлено, что ухо наиболее чувствительно к этому изменению частоты. В области частот от 5 до 20 биений в секунду отдельные биения не воспринимаются, а характер их изменяется незначительно. В области 20—60 биений в секунду характер биений резко меняется, звук интервала становится резким, грубым, диссонансным. Наконец, с увеличением числа биений (выше 60) их различать все труднее. Выше 400 биений в секунду они не воспринимаются вообще. Биения, используемые в настройке терций и сект, в области темперирования обычно не превышают 20—24 в секунду.

В процессе настройки применяются мелодические и гармонические интервалы, но их роль различна и определяется возможностями установки звуков интервала при их последовательном или параллельном проигрывании. Гармонические интервалы используют при настройке непосредственно по биениям, но при значительном наруше-

нии настройки, то есть после замены струн на инструменте или когда он долго не настраивался, а также при необходимости изменить общую высоту строя и т. д., использовать только гармонические интервалы не рекомендуется. Тут не обойтись без мелодических интервалов. Настройщику достаточно уметь сольфеджировать основные интервалы: октаву, квинту, кварту, большую терцию и большую сексту. Эти интервалы обычно запоминают по двум начальным тонам какой-либо популярной мелодии песни. Например, начало песни «Вечер на рейде» В. Соловьева-Седого: «Спо-емте, друзья...» — октава; начало песни «Дороги» А. Новикова: «Эх,—дороги...» — квинта; начало «Песни о Родине» И. Дунаевского: «Широ — ка страна моя родная...» — кварта; начало народной песни «По — зарастали стежки-дорожки...» — б. терция и, наконец, большая секста начало романса А. Варламова «Красный сарафан»: «Не — шей ты мне, матушка...»

Процесс настройки условно можно разделить на четыре этапа:

1) установка мелодического интервала. Задача этого этапа — ориентировочная установка интервала по мелодическому рисунку. При достаточно твердо заученной мелодии интервала, то есть при правильном его сольфеджировании эта задача особых затруднений не вызывает. Кроме того, не установив мелодический контур интервала, невозможно приступить к дальнейшей настройке по биениям. При неправильном сольфеджировании интервала создается опасность попасть в какой-либо другой интервал с другим числом контролируемых биений и свести работу на нет. Настройщик не должен недооценивать роль этого этапа;

2) нахождение зоны темперации. Зона темперации — это зона сужения или расширения интервала, в которой настройщик темперирует в соответствии со строем интервал, оперируя количеством биений в секунду как критерием правильности настройки. В двенадцатиступенном (по зонной теории слуха — двенадцатизонном [11]) равномерно-темперированном строе интервалы — квинта, малая терция и малая секста сужаются, то есть звуки темперированного интервала ближе друг к другу, чем звуки чистого интервала. Наоборот, при темперации расширяется кварта, большая терция, большая секста, малая септима (этот интервал редко применяется в настройке). Следует сначала настроить интервал чисто, затем сузить или расширить интервал до появления биений в нужной зоне. На этом этапе возможны ошибки в определении направления темперации, особенно при настройке квинты или кварты. Здесь имеется опасность перейти через нуль биений и попасть из зоны сужения в зону расширения, и наоборот. Характер биений при этом для слуха будет неизменным. Второй этап непосредственно переходит в следующий;

3) точная настройка интервала. Этот этап самый трудоемкий и продолжительный по сравнению с другими. Сюда входит не только создание в интервале нужного количества биений, но и контроль правильности настройки тонов интервала по биениям в других интервалах, то есть сопоставление с ранее настроенными тонами. От ка-

чества выполнения этих работ непосредственно зависит качество настройки;

4) общий контроль правильности настройки всего диапазона, то есть проверка правильности настройки интервалов во всех октавах, взаимная настройка различных октав по отношению друг к другу и устранение возможных неточностей. Нередко при чисто звучащих октавах остаются биения в интервалах в две, три и четыре октавы. Если при этом устранить биения в интервалах, например, в две октавы, то останутся биения в интервалах в одну, три и четыре октавы, то есть качество настройки в некоторой степени зависит от того, каким интервалом (в одну, две, три или четыре октавы) делается проверка. Чем больше негармоничность обертонов струн, тем больше может быть несоответствие в чистоте настройки двойных, тройных и учетверенных октав. О влиянии негармоничности на настройку более подробно будет сказано ниже.

Как уже говорилось, деление процесса настройки на четыре этапа является условным и необходимо только для облегчения понимания сущности этого процесса. В практической работе различные этапы могут накладываться один на другой, протекать иногда одновременно, а иногда частично или вообще отсутствовать. Например, если инструмент настраивался недавно (или он был мало расстроен), необходимость в первом этапе (установка мелодического интервала) отпадает, поскольку темперированные интервалы находятся в нужной зоне темперации и требуется уточнить число биений в интервалах. Настройка и контроль интервалов, по существу, проводятся одновременно.

3. Планы настройки и контроль

Под планом настройки обычно подразумевается принятая последовательность настройки тонов в области темперирования (середина звукоряда). Некоторые настройщики считают, что настройка краев диапазона не является простой операцией настройки по октавам, а есть продолжение темперирования всего звукоряда. Таким образом, под планом настройки тонов звукоряда музыкального инструмента следует понимать целесообразную последовательность настройки и контроля всех тонов звукоряда. План настройки области темперирования является составной частью общего плана настройки инструмента.

В практике встречаются многочисленные разновидности планов, имеющих те или иные преимущества и недостатки. Выбор конкретного плана настройки зависит от многих факторов: от вкуса и опыта настройщика, от физического состояния инструмента, периодичности предыдущих настроек, трудоемкости и требуемой точности настройки и т. д., но все планы настройки должны удовлетворять определенным требованиям. Укажем здесь только некоторые из них, позволяющие оценить тот или иной план настройки.

1. Равномерное распределение «ненатуральности» по всем основным интервалам, предусматриваемое самим термином «равномерная темперация». Это значит, что нельзя, например, «загрязнять» терцию для лучшего звучания квинты, как это часто делают при настройке по квинтам неопытные настройщики. Все основные интервалы, используемые в настройке, должны иметь минимально необходимую частоту биений. При правильной настройке наблюдается равномерное изменение частоты биений при полутоновом следовании одноименных интервалов.

2. План настройки не должен состоять из одних изолированных интервалов. Целесообразный план настройки предусматривает сведéние к минимуму количества тонов, которые настраиваются только по одному интервалу. Настройка тона по одному интервалу не дает необходимой точности: трудно без каких-либо приборов точно отсчитать частоту биений, кроме того, сам отправной звук настраиваемого интервала имеет ту или иную погрешность. Последовательность настройки должна обеспечивать наиболее раннюю возможность проверки настраиваемого звука бóльшим числом контрольных интервалов: квинт, кварт, терций и секст. При этом интервалы между ранее настроенными звуками и настраиваемым звуком должны как бы ограничивать этот звук, контролируя его сверху и снизу. Особенно удобны для проверки интервалы, имеющие примерно одинаковое число биений с вновь настраиваемым звуком, либо отличающиеся в два раза, чтобы биения в контрольных интервалах легко сопоставлялись на слух, так как легче оценить идентичность частот биений, чем заменить разницу частот в дробное число раз. Из данного правила также следует недостаточность контроля настройки одними квинтами и квартами, так как при этом значительный начальный участок работы будет состоять из настройки изолированных интервалов и вкравшуюся вначале ошибку удастся обнаружить лишь в конце настройки. Классический план включает не только настройку квинтами и квартами, но также предусматривает и использование малых и больших терций и секст. Профессиональные настройщики широко практикуют в области темперирования взаимный контроль интервалов: правильность больших терций проверяют последовательностями квинт и кварт, а последние интервалы проверяют последовательностями больших и малых терций.

3. План настройки должен обеспечивать минимальное перемещение вирбелей (колков), минимальное число перестановок ключа с одного вирбеля на другой при настройке фортепиано или минимальное число возвратов к одной и той же ноте вообще при настройке музыкальных инструментов. Требование в особых пояснениях не нуждается, так как ясно, что оно связано с трудоемкостью настройки и с сохранением стабильности строя и звуковых качеств инструментов.

4. Область темперирования не должна превышать октавы. Это требование уже было обосновано ранее. Напомним, что при расширенной области темперирования, то есть охватывающей до девятнадцати звуков, часть ходов приходится делать октавами, а эти интер-

валы, как уже сказано, являются наименее точными при кажущейся легкости настройки. В результате не обеспечивается необходимая точность настройки и возрастает трудоемкость.

Перечисленные требования в основном относятся к инструментам с фиксированным звукорядом равномерно-темперированного строя, которые наиболее трудоемки в настройке и требуют основательного изучения теории и большой тренировки.

Мы уже установили роль и значение основных видов интервалов в настройке зоны темперирования. Существуют еще два обстоятельства, связанные с построением планов настройки. Это — высотное положение области темперирования и общее направление ее настройки (преимущественное направление вверх или преимущественное направление вниз).

Область темперирования при настройке фортепиано обычно *ля — ля*^{1}, при настройке язычковых инструментов — *ми*^{1} — *ми*^{2}. Расположение этой области в среднем регистре оправдывается тем, что здесь легче всего слышны биения и что именно в среднем регистре ухо наиболее чувствительно к изменениям частоты, а также относительно проще техника настройки.

Однако небольшие сдвиги области темперирования возможны. Так, в практике американских настройщиков применяются области темперации *фа — фа*^{1} и *ми — ми*^{1}. Такое смещение имеет определенный смысл: при сдвиге области, например, на октаву вниз биения во всех интервалах становятся вдвое реже и, следовательно, проще настраивать такие чувствительные интервалы, как терции и сексты. Кроме того, в фортепиано более низкие струны имеют более продолжительное время звучания, что также помогает в настройке.

Но в конечном счете принятие для настройки того или иного высотного положения области темперирования зависит от вкуса и привычки настройщика.

Настройщику клавишных инструментов полезно иметь номограмму, представленную на схеме 14 [12] и составленную для диапазона *ля — си*^{1}, в котором обычно начинают темперирование.

На горизонтальной оси графика обозначены нижние тоны темперированного интервала. Каждая кривая соответствует определенному интервалу (малая терция, большая секста и т. д.). По вертикальной оси определяют абсолютную величину числа биений. Если, например, нужно узнать, какая частота биений должна быть в темперированном интервале *ми*^{1} — *соль-диез*^{1}, представляющем собой большую терцию, необходимо найти на горизонтальной оси ноту *ми*^{1}, по вертикальной линии дойти до пересечения с кривой «большая терция», на этом пересечении обозначена нота *соль-диез*^{1}, и от точки пересечения по горизонтали достичь вертикальной оси, на которой мы и найдем искомую частоту биений. Знак + на кривой обозначает, что в данном случае биения должны прослушиваться в зоне расширения интервала, знак — дает нам понять, что интервал (например, малая терция) темперируется в зоне его сужения.

Приведем пример плана настройки и темперации диапазона *ля — ля*^{1}, довольно типичного для области темперирования.

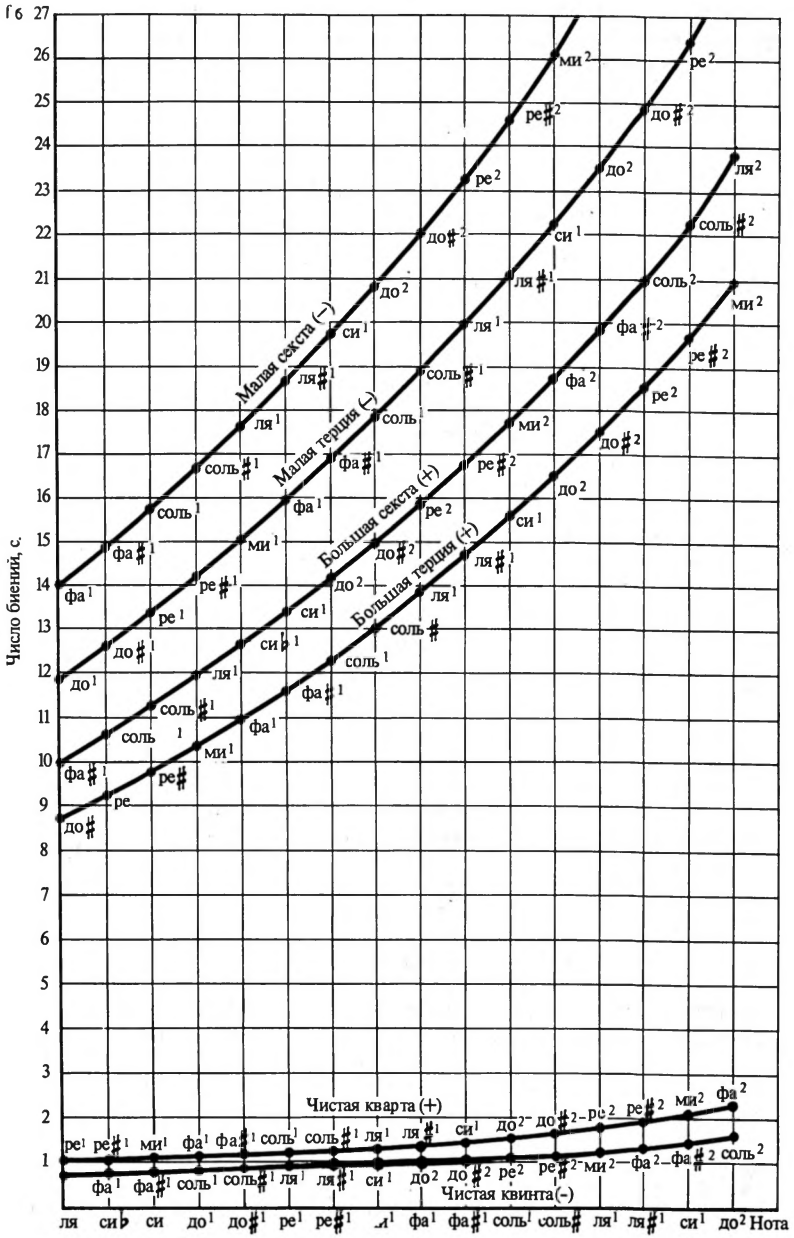


Схема 14. График биений интервалов настройки
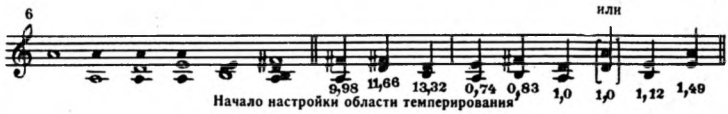
Настройку начинают с точной установки по камертону унисона *ля*^{1} и октавы *ля*, обращая внимание на точность настройки чистой октавы, так как от этого зависит вся последующая работа по темперации. Трудность заключается в том, что октава может быть настроена с большей или меньшей ошибкой, но по звучанию самого интервала октавы это бывает трудно установить. Безупречной настройки октавы можно добиться только с помощью привлечения поверочного теста — кварты с ее обращением — квинтой и малой терции с ее обращением — большой секстой. Из таблицы, помещенной на с. 67, видно, что число биений в нижней кварте *ля* — *ре*^{1} равно числу биений в верхней квинте *ре*^{1} — *ля*^{1}, то есть примерно одному биению в секунду. Ухо с большой точностью может оценить равенство чисел биений.

Допустим, октава широкая. В этом случае, считая априори средний тон *ре*^{1} настроенным правильно, в верхней квинте будет мало биений, а в нижней кварте — наоборот, много. Если же попытаться тон *ре*^{1} немного поднять, то можно получить правильную квинту, но и слишком широкую нижнюю кварту. Настроив правильно нижнюю кварту — не получим правильную верхнюю квинту. Допустим теперь, что октава несколько сужена. Тогда верхняя квинта будет иметь слишком большое количество биений и будет чрезмерно сужена, а нижняя кварта, наоборот, будет иметь почти чистую настройку. И в том и в другом случае, правильно настраивая один из интервалов, будем ухудшать другой.

Таким образом, когда не удается уравнять число биений в паре нижняя кварта — верхняя квинта изменением высоты среднего общего тона, то это значит, что сама октава настроена неправильно. Аналогичные рассуждения можно проделать и для другой пары интервалов — нижняя малая терция — верхняя большая секста. С той только разницей, что в нижней малой терции интервал у́же чистого, а в верхней большой сексте шире чистого интервала. Первоначальную настройку унисона, октавы, квинты и кварты производят до тех пор, пока не достигнут необходимого равенства чисел биений в нижней кварте и верхней квинте. Только в этом случае октава будет настроена точно.
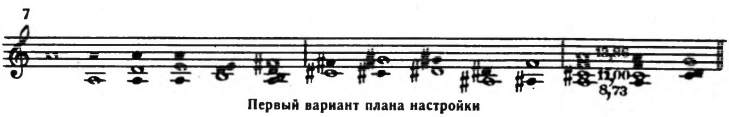
Дальнейшие ходы отличаются большим разнообразием; приведем некоторые из них. Настраиваем тон *ми*^{1} как кварту от *ля*^{1} с числом биений 1,48 и как квинту от *ля* с числом биений 0,74 (в два раза меньше). Убедившись в правильности настройки *ля* — *ре*^{1} — *ми*^{1} — *ля*^{1}, начинаем настройку, например, тона *си* в кварту от тона *ми*^{1} и в малую терцию — от *ре*^{1}; соответствующие числа биений 1,12 и 13,32. Тон *си* потом еще придется уточнить, поскольку на слух отсчитать 1,12 и 13,32 биений трудно и здесь относительно велика возможность неточной настройки. От *си* настроим квинту вверх *фа-диез*^{1}. Этот тон уже можно контролировать по *ре*^{1} и *ля*, составляющим с ней большую терцию и большую сексту с 11,66 и 9,98 биений в секунду соответственно. На этом этапе появляется возможность повторного уточнения правильности настройки тонов *си* и *фа-диез*^{1}. Последовательность настройки всех рассмотренных тонов (всего 6) приве-

дена в следующем нотном примере, в конце которого дана последовательность интервалов, служащая для контроля. Пустой овал (целая нота) обозначает настраиваемый тон, зачерненный овал — настроенный (контрольный) тон интервала.
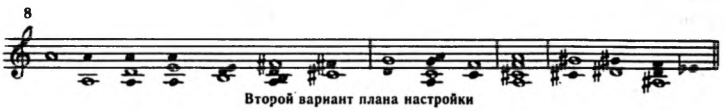


Числа под интервалами показывают числа биений, которые, как можно заметить, постепенно увеличиваются слева направо. Если при указанной последовательности проигрывания число биений будет плавно возрастать, то это будет служить одним из признаков того, что интервалы настроены правильно. Следует иметь в виду, что данный признак необходим, но недостаточен. Для проверки следует применять и другие приемы контроля.

Остальные тоны по данному плану могут быть настроены в порядке, приведенном в нотном примере 7.



После одиннадцатого хода наступает возможность проверки настройки темперации с помощью трех больших терций: *ля — до-диез*^{1}, *до-диез*^{1}*— фа*^{1} и *фа*^{1} *— ля*^{1}, которые дают соответственно 8,73; 11,00 и 13,86 биений в секунду. Взятые последовательно снизу вверх терции должны давать плавно возрастающие числа биений. В заключение настраивают тоны *до*^{1} и *соль*^{1}. Лучшим контролем правильности темперации является проигрывание последовательности больших и малых терций снизу вверх. При равномерной темперации частота биений в терциях плавно увеличивается.

Область темперирования иногда рекомендуется настраивать с двух сторон, например, начать с тона *ля* малой октавы и идти квинтами и квартами вверх. Затем, пройдя половину зоны темперации, начать настраивать интервалы уже в нисходящем порядке от *ля*^{1}. Считается, что таким путем уменьшается опасность накопления ошибок настройки на отдельных нотах.



Преимущество этого плана настройки по сравнению с первым в том, что восьмой по счету тон *соль*^{1} настраивают в кварту по одному из наиболее точно настроенных ранее тонов *ре*^{1} и таким образом исключают накопление ошибок при последовательной настройке тонов от *ля* до *до-диез*^{1}. После настройки тонов *соль*^{1}, *до*^{1}, *фа*^{1} появляется возможность проверки круга из больших терций. На этом этапе заранее устраняются ошибки в настройке всех предыдущих тонов и оставшиеся тоны *соль-диез*^{1}, *ре-диез*^{1} и *ля-диез* для своей настройки располагают бóльшим количеством контрольных интервалов. Здесь уместно сделать несколько замечаний.

1. Любой план можно читать с конца: настройку можно делать и в прямом и в обратном направлении.

2. Выбор конкретного плана настройки области темперирования — дело индивидуальное, но желательно применять постоянно один и тот же план, постепенно изучая его и добиваясь совершенства исполнения.

3. Нужно отметить, что сложные планы на первых порах не будут способствовать качеству настройки у начинающего настройщика. Такие планы требуют развитых профессиональных навыков настройки более трудных интервалов — терций и сект.

Если настройщик имеет достаточный опыт или если инструмент расстроен незначительно, то первым этапом может быть настройка круга больших терций, включающих ноты *ля — до-диез*^{1} — *фа*^{1} — *ля*^{1}. Однако и здесь необходимо быть уверенным в том, что октава *ля — ля*^{1} настроена точно. В следующем нотном примере приведен один из планов темперации (план Б. Голубева), в котором многие тоны настраиваются ходами по большим терциям и поэтому для начинающих он несколько труден:



Третий вариант плана настройки
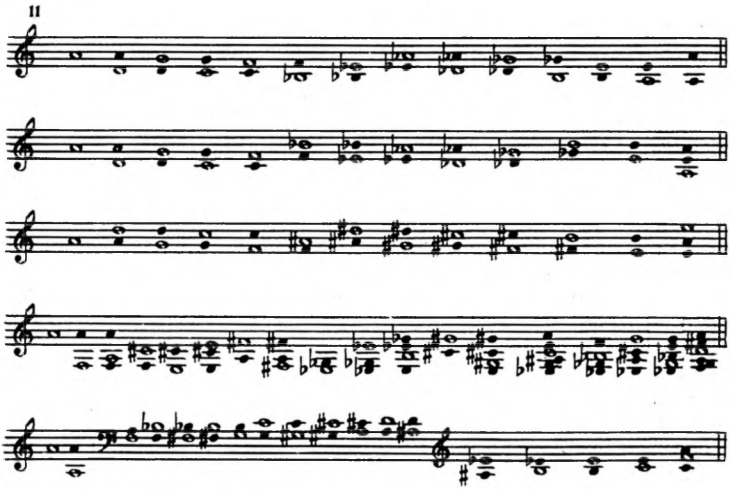
Мы уже убедились, что настройка октавы, а одновременно квинты и кварты в пределах октавы позволяет с высокой точностью настраивать эти интервалы. Существуют планы настройки области темперирования, в которых каждый ход сопровождается взаимопроверкой октавы, квинты и кварты. Такие планы по необходимости охватывают области больше одной октавы, их можно рекомендовать для отработки точности настройки октав, квинт и кварт. Пример подобного плана дает Г. К. Богино [13] (нотный пример 10). В нотном примере 11 приведено еще несколько планов настроек области темперирования, которые можно использовать в основном для фортепиано, язычковых инструментов. В любом из этих планов эффективным средством контроля является последовательное проигрывание больших и малых терций.

10



Четвертый вариант плана настройки

11



Различные варианты планов настройки области темперирования

По окончании настройки области темперирования, то есть когда произведена темперация звуков по меньшей мере одной октавы, переходят к темперации крайних регистров. Некоторые основные приемы настройки пригодны и здесь: начинают с приближенной настройки по октавам, квинтам и квартам и далее с помощью больших терций и секст добиваются необходимой точности. В нижнем регистре особенно полезно использовать большие децимы (большие терции через октаву) и большие децимы через одну и две октавы. Биения в децимах хорошо прослушиваются, и последовательная проверка децим в восходящем и нисходящем порядке позволяет с большой точностью выявлять все неравномерности. Большая децима может быть использована почти во всем звуковом диапазоне, кроме самых крайних трех-пяти дискантных тонов.

Настройка октав в самых нижних басах может быть облегчена проигрыванием контрольных последовательностей терцдецим (октава плюс секста).

В большой октаве хорошо слышны биения в увеличенных квартах (тритонах), и для проверки правильности настройки октав на данном
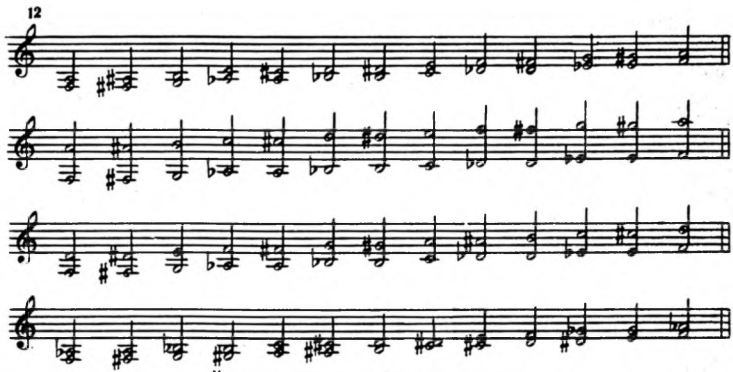
участке диапазона целесообразно использовать проверку последовательностями увеличенных кварт, следя за плавностью увеличения биений с повышением интервалов. Настройка нижнего регистра с привлечением терций, секст, децим и терцдецим особенно бывает полезной, когда басовые струны сами по себе имеют биения, мешающие настройке.

Дискантовые струны тоже нередко звучат с биениями, более или менее ярко выраженными. В этом случае, как рекомендует Г. К. Богино, можно использовать октаву с квинтой в середине или настраивать двумя последовательными квинтами: например, настраиваются квинты *ре*^{2} — *ля*^{2} и *ля*^{2} — *ми*^{3}, при этом *ми*^{3} настраивается по ранее настроенному *ми*^{2}, а общий для обеих квинт звук *ля*^{2} устанавливается затем по *ре*^{2} и *ми*^{3}.

Закончив настройку инструмента, необходимо убедиться в ее правильности с помощью специальных приемов контроля. Часть приемов аналогична приемам, используемым при настройке и контроле в области темперирования. Другие приемы связаны с контрольными интервалами, превышающими октаву. Их можно применять для проверки настройки клавишных, язычковых и некоторых других инструментов.

Контрольные приемы можно условно разбить на две группы. Приемы первой группы основаны на последовательном проигрывании интервалов, приемы второй группы — на сопоставлении биений в разных интервалах. Сущность приемов первой группы заключается в сравнении характера биений в одноименных интервалах, проигрываемых последовательно в восходящем или нисходящем порядке: частота биений должна постепенно увеличиваться при равномерном перенесении интервала вверх по звукоряду. Исключение составляют унисоны и октавы, в последовательностях которых контролируется как раз отсутствие заметных биений. Наиболее эффективно проигрывание последовательностей следующих интервалов: больших терций, больших секст, квинт, кварт, больших децим (также через одну и две октавы), больших терцдецим, малых терций, октав, двойных и тройных октав. Не все из этих интервалов одинаково хорошо прослушиваются на краях музыкального диапазона из-за понижения чувствительности уха к самым низким и самым высоким частотам.

Интервалы, имеющие в среднем регистре большую частоту биений — большие и малые терции и децимы, большие и малые сексты и терцдецимы, в левой части тенорового регистра и в басовом регистре имеют меньшее число биений — в два раза с каждым октавным понижением. Поэтому именно их целесообразно привлекать как контрольные последовательности при проверке правильности настройки октав левой половины диапазона. В хорошо настроенном инструменте одноименные интервалы, которые проигрываются в хроматической последовательности, на слух должны обладать схожим характером звучания, плавно меняющимся от одного регистра к другому. Последовательность чередования интервалов дана в нотном примере 12:



Контроль интервалами: большими терциями, большими децимами, большими секстами и малыми терциями

Настройку проверяют и аккордами: мажорными и минорными трезвучиями, а также их обращениями. Здесь надо хорошо разбираться в характере звучания каждого вида трезвучия. Этот способ проверки правильности настройки требует определенного опыта.

Во второй группе контрольных приемов сравниваются между собой разноименные интервалы по признаку равенства в них биений. Как уже говорилось выше, наиболее удобной парой интервалов для среднего, верхнего и части нижнего регистров является нижняя кварта и верхняя квинта, составляющие октаву. Способ проверки состоит в том, что биения нижней кварты сравниваются с биениями верхней квинты, эти биения должны быть равными по частоте. Действительно, из таблицы биений видим, что в октаве, например, *ля — ля*^{1} кварта *ля — ре*^{1} имеет 0,99 (то есть почти 1), а квинта *ре*^{1} — *ля*^{1} — 1,0 биение в секунду. Точно так же биения в кварте *си — ми*^{1} и квинте *ми*^{1} — *си*^{1} равны 1,12 в секунду. Этот прием нами был уже использован ранее при настройке области темперирования. Интересно отметить следующее. При установке октав по парам интервалов: нижняя кварта — верхняя квинта в левой части звукового диапазона фортепиано может быть использован факт чистого, почти без биений, звучания этих интервалов. Настройке хорошо помогает тембровая характерность звучания практически чистых квинт и кварт, их сочность. Правда, в самой нижней октаве звукового диапазона фортепиано уже трудно воспринимать эту сочность. В верхнем регистре проверку октав также можно вести парой кварта — квинта. Есть и другие пары интервалов с подобным замечательным свойством равенства биений.

Очень точным и удобным приемом контроля является проверка равенства по числу биений в интервалах большой терции и большой децимы, построенных на одном и том же нижнем звуке, например на ноте *фа* малой октавы. В этом случае число биений в большой тер-

ции *фа — ля* будет равно числу биений в большой дециме *фа — ля*^{1}, а именно 6,93 биений в секунду. Эта пара интервалов хороша для контроля, потому что биения в них отчетливо прослушиваются почти во всем звуковом диапазоне.

В качестве дополнительного контроля можно взять два интервала: малая терция — большая секста, составляющих октаву. Если биения в нижней малой терции равны по частоте биениям в ее обращении, то есть в большой сексте, значит октава настроена чисто, точно. Так, в малой терции *ля — до*^{1} имеется 11,87 биений в секунду и в большой сексте *до*^{1} *— ля*^{1} столько же биений (11,87). Следующий пример: малая терция *си — ре*^{1} имеет 13,32 биений и большая секста *ре*^{1} *— си*^{1} практически столько же — 13,33, но проверка этими интервалами непригодна для верхнего регистра, где биения становятся чрезмерно частыми. Уже в малой терции *соль-диез*^{1} *— си*^{1} и в большой сексте *си*^{1} *— соль-диез*^{2} биения достигают 22,41 — 22,42 в секунду, то есть воспринимаются с трудом. Наконец, есть еще две пары интервалов, числа биений у которых различаются менее чем на 2%, то есть они практически равны. Одна пара: большая секста — большая терция, расположенная внутри сексты на два полутона выше нижнего тона сексты. Из таблицы на с. 67 нетрудно подобрать пример: *ля — фа-диез*^{1} (+ 9,98 биений в секунду) и *си — ре-диез*^{1} (+ 9,79 биений в секунду). Другая пара: малая секста — малая терция, также помещенная внутри сексты на три полутона выше нижнего ее тона. Например: *ми — до*^{1} (— 10,38 биений в секунду) и *соль — си-бемоль* (— 10,58 биений в секунду). Почти одинаковая в этих парах частота биений делает схожим и тембр звучания интервалов. Эти пары интервалов целесообразно использовать для контроля настройки тонов в теноровом и басовом регистрах.

Пары интервалов: кварта — квинта и малая терция — большая секста, каждая из которых в сумме образует октаву, особенно удобны для настройки и проверки октавы. В первой паре (кварта — квинта) нижний интервал шире, а верхний у́же соответствующего чистого интервала: во второй (малая терция — большая секста) нижний интервал у́же, а верхний шире соответствующего чистого интервала. Поэтому, если октава настроена чисто, достаточно слегка повысить общий средний звук в кварте — квинте и слегка понизить общий средний звук в малой терции — большой сексте, чтобы получить правильно темперированные интервалы. При этом частоту среднего звука изменяют до тех пор, пока частоты биений в нижних и верхних интервалах не стану́т равными. Если же этого не удается добиться, значит октава настроена не совсем точно и необходимо, периодически подстраивая октаву и средний звук взаимно обращенных интервалов, получить равенство биений. Само собой разумеется, что в практической работе настройщика каждый контрольный прием одновременно является настройкой и проверкой точности настройки.

Описанные приемы контроля освобождают настройщика от необходимости прямого отсчета количества биений и помогают в тех случаях, когда требуется получить нулевые биения (в унисонах и окта-

вах). Ценность данных приемов обнаруживается особенно тогда, когда сами струны не свободны от биений, вызванных какими-либо механическими причинами и дефектами, и когда прямой подсчет биений при необходимости их устранения практически непригоден. Добавим, что самые нижние струны фортепиано, основные гармоники которых слабы, можно настроить с достаточной точностью только с помощью перечисленных приемов контроля. Самые верхние тоны фортепиано, продолжительность звучания которых недостаточна, удовлетворительно можно настроить интервалами в две и три октавы, большими децимами, а также большими децимами через одну и две октавы.

Может возникнуть вопрос: для чего настройщику нужно знать количество биений, если он их все равно не считает? Действительно, настройщики редко применяют какие-либо приборы для отсчета времени или проверки частоты биений с помощью, например, метронома. Дело в том, что в процессе практики постепенно вырабатывается «узнавание» правильности настройки темперированного интервала путем запоминания характера тембра биений в тех или иных интервалах, сравнительным сопоставлением количества биений в разных интервалах, учетом закономерностей изменения числа биений в хроматических последовательностях одноименных и парах разноименных интервалов. Ситуация в этом случае аналогична процессу обучения телеграфиста азбуке Морзе: учатся не считать количество точек и тире в букве, а узнавать ритмический рисунок из этих точек и тире. Настройщик быстрее достигает мастерства, если будет иметь представление о закономерностях биений в разных интервалах, будет знать часто́ты биений и на основе этого сознательно планировать и управлять процессом настройки.

4. Факторы, влияющие на строй и настройку музыкального инструмента

Действительный строй музыкального инструмента в сильной степени зависит не только от качества настройки, но и от качества изготовления инструмента, от времени, прошедшего после настройки, от температурно-влажностных условий, окружающей среды, наконец, от игровой нагрузки на инструмент, способов игры и звукоизвлечения.

Неправильная, неточная настройка снижает звуковые свойства инструмента, не позволяет им полностью проявляться. Каким бы прекрасным ни был инструмент, при плохой настройке его высокие звуковые качества не будут раскрыты.

С точки зрения исполнителя, тот музыкальный инструмент настроен хорошо, который позволяет ему максимально реализовать свои представления в отношении интонации извлекаемых звуков. В одноголосной музыке у музыканта могут быть одни требования к высоте тонов, которые могут и не совпадать с какой-либо фиксированной

заранее шкалой звуковысотных соотношений; в многоголосной музыке исполнитель будет стремиться к чистым интервалам и к возможностям любых модуляций. В совместном звучании ансамбля инструментов появляются другие дополнительные требования к звуковысотным соотношениям музыкальных звуков. Мы видим, таким образом, очень разнообразные и нередко противоречивые требования к настройке инструментов, которые не позволяют свести настройку к какой-либо простой, однозначно установленной и всегда фиксированной системе частот.

Конечно, в разных видах музыкальных инструментов по-разному ставятся и решаются свои проблемы настройки. Так, в духовых инструментах исполнителю приходится считаться и с влиянием температуры на высоту тонов, и с необходимостью учитывать силу дутья, чтобы правильно интонировать нужный звук. Но одновременно музыкант-духовик располагает возможностью тончайшей корректировки высоты тонов, даже исправления некоторых фальшивых звуков, которые есть почти у каждого духового инструмента.

Для клавишных ударных инструментов с фиксированными частотами струн нет, естественно, тех проблем, которые существуют для духовых инструментов. Настройка фортепиано создается как некоторый компромисс взаимной настроенности разных струн, которая в целом тяготеет к равномерно-темперированному строю.

Смычковые инструменты имеют свои особенности настройки. Исполнитель имеет самую широкую возможность выбора любой требующейся ему высоты тонов. Проблемы могут здесь возникать в обеспечении правильных квинт и кварт при игре по всему диапазону в том случае, когда струны смычкового инструмента не обладают однородностью массы и жесткости по длине.

Начнем рассмотрение проблем с клавишных инструментов.

Успехи радиоэлектроники в создании приборов для точного измерения частоты позволили уже в 30-х годах нашего столетия провести целый ряд интересных экспериментов, которые существенно изменили взгляды на настройку музыкальных инструментов, бытовавшие до того времени. В 1937 году американский ученый О. Л. Рейлсбек опубликовал результаты своих измерений точности строя фортепиано, проделанных с помощью стробоскопа [14]. Он определил частоты тонов с точностью до одного цента (напомним, что 1 цент — одна сотая часть полутона). Большое число клавишных инструментов, в основном роялей и пианино фирмы Стейнвей, настроенных высококвалифицированными настройщиками, О. Л. Рейлсбек испытал сразу же после настройки. Цель измерений частоты состояла в том, чтобы установить, соответствует ли фактическая настройка фортепиано расчетным табличным значениям частот, полученным в предположении, что струны являются идеально гибкими, не обладающими жесткостью и дающими строго гармонический ряд частот. Например, подсчитаем частоты тонов *ля* субконтроктавы, контроктавы, большой и малой октав, а также 1—4-й октав. Используя соотношение частот в интервале октава (1:2), получим следующий ряд:

27,5, 55, 110, 220, 440, 880, 1760, 3520. Уже в 1937 году было установлено, что настройка фортепиано не согласуется с этим рядом частот, за исключением отправной частоты 440 Гц, которая может быть установлена очень точно. В хорошо настроенном инструменте частоты всех тонов, кроме тонов одной октавы, не соответствуют табличным значениям частот. Поэтому при внедрении в практику приборов для проверки строя необходимо учитывать особенности строя реальных инструментов и их отклонения от табличных частот. Каковы же особенности обнаруженного О. Л. Рейлсбеком несоответствия фактических и расчетных частот? Все интервалы клавишного инструмента расширяются от середины к краям звукового диапазона. При этом дискантовые тоны повышаются по частоте, а басовые, наоборот, понижаются. Например, частота *ля* четвертой октавы больше, чем 3520 Гц, а частота *ля* субконтроктавы меньше, чем 27,5 Гц.

Последующие работы в этом направлении проводились: для определения величины и характера отклонений в настройке, выполненной хорошим настройщиком, от расчетной шкалы частот, где каждый последующий полутон отличается от предыдущего на интервальный коэффициент 1,05946, а соотношение частот в октаве точно соответствует 1:2; для определения природы расширения октав и влияния субъективного фактора в настройке, т. е. применяемый метод настройки, психофизиология слухового восприятия, индивидуальность художественного вкуса настройщика и музыканта и т. д.

Последующее изложение построено с учетом этих вопросов.

На схеме 15 изображен пример кривой Рейлсбека, представляющей измеренные отклонения основных тонов одного настроенного инструмента от темперации Веркмайстера. По горизонтали отложены обозначения нот (не полностью) и частоты нот *ля* всех октав, по вертикали — отклонения в центах. Если бы отклонений не было, то настройка представлялась бы прямой горизонтальной линией.

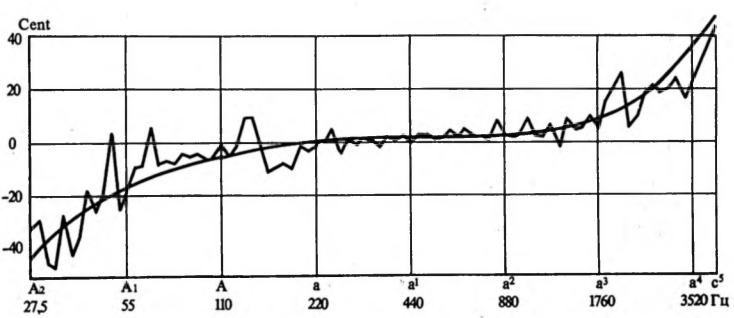


Схема 15. Кривая настройки пианино и ее сглаженная форма

Рассмотрим некоторые характерные особенности кривой Рейлсбека, присущие клавишным, язычковым и струнным (смычковым) инструментам /14, 15, 16/. Рассмотрим кривую для роялей и пианино. С некоторым приближением к темперации Веркмайстера согласуется участок среднего регистра от *ля* малой октавы до *ля* второй октавы. Этот участок может быть и несколько больше и несколько меньше. Как правило, отклонения увеличиваются к краям диапазона в сторону расширения интервалов (то есть дискант повышается, а бас понижается).

Для пианино кривая Рейлсбека начинает резко подниматься в дискант и опускается в басу, в то время как для роялей, особенно больших концертных, она представляет почти прямую, несколько наклоненную к абсциссе. Но иногда басовые тоны занижаются, а дискантовые завышаются на меньшую величину, чем обычно, иногда встречается кривая, лежащая почти горизонтально. Однако такие исключения составляют 5—10% всех проверенных инструментов. В хороших роялях настройка близко подходит к слегка наклоненной прямой, так что с каждой октавой отклонения в частоте составляют приблизительно 3 цента. В среднем же полутоновые интервалы по сравнению с темперированными интервалами Веркмайстера имеют тенденцию к расширению от 0 до 0,5 цента в теноровом регистре и от 0,25 до 2 центов в басовом и дискантовом. В пересчете на октаву это составляет от 0 до $\pm$ 6 центов в середине и от $\pm$ 3 до $\pm$ 24 центов к краям диапазона. Максимальные отклонения достигают в малогабаритных инструментах до 40—50 центов /16/.

Расширение октав в больших роялях на 3 цента на каждую октаву означает, что октава уже не имеет точного соотношения частот 2:1. Подсчет показывает, что в этом случае соотношение немного больше и равно примерно 2,001735:1. Темперированная квинта в такой расширенной октаве также несколько расширяется, примерно на 2 цента, но в то же время если темперированную квинту расширить на 2 цента, то соотношение ее частот будет почти соответствовать 3:2. Исходя из этого был сделан вывод, что в хорошо настроенном клавишном инструменте интервалы так расширяются, что вместо темперированных квинт получаются практически чистые квинты. Работа зарубежного ученого, в которой был получен такой вывод, очевидно, дала повод некоторым нашим настройщикам выступить с предложением настраивать клавишные инструменты чистыми, а не темперированными квинтами.

Однако какую квинту следует назвать чистой? Ту ли, в которой соотношение частот идеально совпадает с соотношением кратных чисел 3:2, или ту, которая звучит без биений? Вопрос лишен смысла, если струна идеальная и ее гармоники составляют гармонический ряд частот, например 440, 880, 1320, 1760 Гц и т. д. Но вопрос далеко не лишен смысла в случае негармоничности обертонов струн, имеющей место на практике во всех струнах в реальных музыкальных инструментах. Дело в том, что даже в субъективно чисто (без биений) настроенной октаве частота верхнего тона более чем в два раза больше частоты нижнего тона, а в субъективно чисто настроенной

квинте соотношение частот больше, чем 3:2. Иначе говоря, чистые без биений октава и квинта являются расширенными. Таким образом, вопрос оценки частоты интервала зависит от метода, которым мы эту оценку производим. Если с помощью прецизионного частотомера мы установим, что соотношение частот в данной октаве равно точно 2:1, а в квинте 3:2, то мы сделаем вывод, что интервалы чистые, и... ошибемся, поскольку, если эти интервалы получены на струнах, они будут звучать с биениями и настройщик скажет, что интервалы настроены нечисто. Наоборот, сделав интервалы чистыми уже с точки зрения настройщика, мы должны будем квалифицировать их как темперированные, поскольку частоты, измеренные частотомером, не будут иметь точных отношений 2:1 или 3:2. Любопытно, что расширения октав для настройщиков не существует, если на слух октавы настраиваются точно, без биений, и это является азбучным правилом настройки. Растянутая настройка в соответствии с кривой Рейлсбека обнаруживается только точным частотомером, но ни в коем случае не обнаруживается ухом, если, конечно, оно не вооружено для сравнения набором эталонных частот. Поэтому неудивительно, что все разговоры об этом явлении в присутствии опытных настройщиков вызывают скептические замечания с их стороны.

Обычно тот, кто настраивает, не знает, что кривая Рейлсбека получена с помощью частотомера, а тот, кто исследует точность настройки с помощью частотомера, не знает или не отдает себе отчета в том, что получившееся объективное отклонение настройки от существующих рассчитанных частот равномерно-темперированного строя на слух производит впечатление гармоничной и совершенной настройки.

Следовательно, ни о какой настройке фортепиано чистыми квинтами во всем диапазоне говорить не приходится. Нет также оснований для вывода о несоблюдении основных принципов равномерного темперирования, заложенных Веркмайстером,— равномерного темперирования квинт и кварт до 1 и 1,4 биений в секунду в середине диапазона.

В связи с этим рассмотрим причины негармоничности обертонов в звуках, например, клавишных инструментов. Негармоничность обертонов зарождается в струне из-за ее жесткости. Чем больше жесткость, тем больше отклонение обертонов, растущее пропорционально квадрату номера обертона. Жесткость определяется через диаметр, длину, модуль упругости и натяжение струны. Чем больше диаметр и модуль упругости, тем больше негармоничность. При бóльшей длине и бóльшем натяжении негармоничность уменьшается. При бóльшей жесткости скорость распространения поперечных волн увеличивается с частотой и это вызывает отклонение частот обертонов от гармонического ряда. Следует иметь в виду, что зависимость жесткости от перечисленных факторов имеет сложный вид, а не просто следует закону прямой или обратной пропорциональности.

Поэтому теоретически (что подтверждается и измерениями) негармоничность слегка повышается для самых толстых и гладких теноро-

вых струн, натянутых относительно слабее соседних участков; она повышается также, и довольно существенно, к самому верхнему дискантовому регистру, где струны имеют повышенную жесткость.

Значение этих особенностей мензуры струн фортепиано — в их влиянии на общий характер поведения настроечной кривой (кривой Рейлсбека). На фактические отклонения частот струн влияют множество других, в том числе случайных, трудноучитываемых факторов.

От жесткости струны зависит ее способность удлиняться при настройке, что влияет на точность настройки. При большой жесткости струны и при большом модуле упругости материала частота струны значительно изменяется от небольшого поворота вирбеля, что осложняет процесс настройки. Напротив, относительно медленное изменение высоты струны при определенном повороте вирбеля позволяет легко получить требуемую частоту, то есть чем больше удлинение струны, тем качественнее настройка. Поэтому не следует стремиться к высокому модулю упругости материала струны, так как это увеличивает расстройку обертонов и снижает способность струны к удлинению*.

Вообще степень интервального расширения зависит от конструкции инструмента. У малых пианино с короткими толстыми басовыми струнами расширение октав басового регистра значительно больше, чем у роялей с длинными и относительно более гибкими басовыми струнами. Негармоничность во многом зависит также от конструкции и технологии изготовления инструмента, от чего, в свою очередь, зависит и точность настройки. Например, при поворачивании вирбеля рывками трудно достичь точности настройки. Кроме того, большой угол излома струны на клангштабике, каподастре, аграфах, штеговых штифтах, особенно при острых отсечках струны на этих опорах, препятствует перемещению струны при настройке, последняя при изменении натяжения сдвигается скачком со своего места. Отклонения частот гармоник вызываются и в том случае, когда угол излома струны на опоре, ограничивающей рабочую часть, напротив, слишком мал, и при больших амплитудах может несколько изменяться длина струны из-за смещения точки отсечки. Нежестко установленный штифт на штеге — тоже одна из причин неудовлетворительной настройки.

Часто наблюдается и такой дефект клавишного инструмента: трудно точно настроить хор из двух или трех струн в унисон. Это происходит из-за неравномерного распределения массы по длине струны, овальности керна, наличия в одном хоре струн различных диаметров, различия длин рабочих частей струн хора, вызванного погрешностями в расположении штеговых штифтов, различия струн кернов хора, и наконец, в том случае, когда из-за неровной поверхности молотка струны в хоре возбуждаются с разной амплитудой, поскольку частота струны при сильных колебаниях выше частоты той же струны при небольших колебаниях. В этом случае можно

* Упругое удлинение струны не следует путать с релаксацией — деформацией (вытягиванием) струны во времени.

достигнуть унисона, сильно ударяя по клавише, но по мере затухания звука в унисоне могут появиться биения. Трудно перечислить все факторы конструктивного и технологического порядка, влияющие на настройку.

Кривые настройки клавишных инструментов полезны во многих отношениях. Они дают наглядную картину точности строя инструментов, точности настройки унисонов в хорах, дают возможность проследить изменения этих параметров под влиянием транспортировки, изменений температуры и влажности окружающей среды, степени игровой нагрузки. Но главное — настроечные кривые показывают прежде всего недостатки самого инструмента. Если опорные конструкции инструмента слабые, то измерения настройки позволят обнаружить неравномерность расстройки различных регистров. Наконец, характер кривых настройки может стать объективным критерием профессионализма того или иного настройщика, его квалификационного уровня.

Неточности настройки отдельных тонов выражаются на кривой Рейлсбека (см. схему 15) степенью изломанности самой кривой настройки, как бы случайным разбросом частот около какого-то среднего значения (на схеме 15 обозначено сглаженной линией). Негармоничность обертонов сказывается на общей закономерности в ходе кривой, ее наклоне к оси абсцисс, характере настройки на краях диапазона. Связь негармоничности обертонов и расширения настройки не очень ясна с первого взгляда, поэтому рассмотрим ее подробнее.

Вспомним, как настраивается октава. Допустим, нужно настроить верхний звук октавы. В этом случае верхнюю струну натягивают до тех пор, пока частота ее основной гармоники не сравняется с частотой второй гармоники нижнего звука. Момент точной настройки в унисон этих гармоник определится по отсутствию биений между ними. Если после настройки вторая гармоника нижнего звука из-за негармоничности будет иметь частоту несколько выше, чем это полагается для идеальной гармоничной струны, то и первая гармоника верхнего звука также будет завышена. Так, вторая гармоника тона *ля*^{1} не равна точно 880 Гц, а отклоняется в сторону завышения примерно на 2 цента, что составляет для этой частоты 1 Гц, следовательно, она будет равна 881 Гц. На эту же частоту будет настроена и первая гармоника *ля*^{2}.

При настройке следующей октавы ситуация повторяется с той лишь разницей, что на частоту основной гармоники *ля*^{3} влияет негармоничность вторых гармоник *ля*^{1} и *ля*^{2}, то есть происходит накопление ошибок или прогрессирующее завышение строя.

Все сказанное по отношению к октаве относится также и к другим интервалам, в которых биения являются отправным моментом в настройке. Так, в квинте, образованной звуками негармоничных струн, вторую гармонику верхнего звука подстраивают с одним биением в сторону сужения к третьей гармонике нижнего звука. Поскольку же частота третьей гармоники нижнего звука выше частоты третьей гармоники идеальной струны, то и вторую гармо-

нику верхнего звука приходится искусственно завышать, а вместе с ней и первую гармонику. Вот откуда получается почти точное соответствие отношения частот первых гармоник отношению чистой или натуральной квинты 3:2. Однако, несмотря на то что соотношение первых гармоник равно 3:2, такая квинта — темперированная, поскольку в ней слышно одно биение в секунду, заданное настройщиком.

Иногда «растянутую» настройку приписывают целиком вкусам настройщиков, так как различные настройщики по-разному расширяют октавы, но при этом забывают о различии в акустике инструментов, вызываемом различием в мензурах. Растянутая настройка — естественный результат негармоничности обертонов струн фортепиано, и она просто необходима, если желать соответствия настройки тонов инструмента по отношению друг к другу, причем каждая мензура, каждый отдельный инструмент требует своей, только ему присущей степени расширения октав.

Мы убедились, что расширение интервалов определено объективной причиной — негармоничностью струн. Разберем теперь влияние субъективного фактора — индивидуальности настройщика.

После работы Рейлсбека и его последователей, выявивших роль негармоничности обертонов в расширении настройки октав, казалось, что причина этого явления полностью раскрыта однозначно. Однако примерно в 40—50-е годы нашего столетия обнаружили расширение октав при настройке таких интервалов, звуки которых не были негармоничными, то есть их обертоны имели отношения частот натурального ряда чисел. Расширение наблюдалось и при настройке звуков, вообще лишенных обертонов. Одно из элементарных объяснений заключалось в том, что настройщики клавишных инструментов привыкли завышать дискантовые струны для предотвращения их последующей расстройки — бóльшей, нежели у струн остальных регистров.

Другое, более глубокое объяснение основывается на психофизиологических особенностях восприятия музыки человеком.

Настройка музыкальных инструментов должна учитывать тот факт, что мелодические интервалы отличаются в интонационном отношении от одноименных гармонических интервалов.

Исследования позволили установить следующее: последовательность музыкальных тонов (мелодическая последовательность) только тогда воспринимается правильно интонированной, когда высокие тона настроены с небольшим завышением, а низкие тона с небольшим занижением. В этом проявляется одна из особенностей слухового восприятия музыкальных звуков. Слуховое требование расширенных интервалов при мелодическом звучании не совпадает с требованием к чистоте звучания гармонических интервалов. Исполнение мелодии и сопровождения в одном регистре при расширенной настройке дает фальшивое звучание, и в аккордах прослушиваются биения. В целом мелодические интервалы тяготеют к расширению, в то время как гармонические интервалы при нефиксированных звукорядах музыкальных инструментов стремятся к чистым. В инструмен-

тах с фиксированным звукорядом предпочтительней считается нормальная настройка (без искусственного расширения интервалов), которая обеспечивает минимум биений. Хотя здесь также существуют отклонения от общего правила, объясняемые всем тем, что относится к эффектам «живости» и «блеска» в музыкальном исполнении. Некоторые незначительные отклонения от «стандартного» исполнения всегда были присущи творчеству музыкантов, а для слушателей они являются необходимым фактором наслаждения музыкой. Более того, определенная доля «шероховатости» необходима для выразительности музыкального звука. Поэтому, как показали наблюдения лаборатории музыкальной акустики Московской консерватории /13/, некоторые музыканты иногда сознательно предлагают определенные изменения в настройке для создания специфических эффектов при исполнении отдельных произведений. Суть подобных изменений настройки фортепиано чаще всего заключается в сознательном расширении октав до появления в них незначительной доли биений. И действительно, как показали исследования, верхний звук в слегка расширенной октаве, который при точной настройке маскировался более сильным нижним звуком, приобретает «свой голос», становится субъективно несколько ярче и громче. Для оживления звучания практикуется также незначительная расстройка унисонов.

Однако расширение октав с целью получения большего «блеска» — не самая важная причина растянутой настройки. Большую роль здесь играет все же негармоничность обертонов, то есть объективный фактор.

Как соотносится зонная природа звуковысотного слуха, исследованная в 40—50-е годы музыкантом и акустиком Н. А. Гарбузовым, с практикой настройки музыкальных инструментов? На этом хотелось бы остановиться подробнее, поскольку, на наш взгляд, бытуют совершенно неправильные представления о роли зон для настройки. Скажем сразу, что зону Гарбузова, в пределах которой, как считают музыканты, звуки и интервалы при всех количественных изменениях сохраняют одно и то же качество и носят поэтому одно и то же название (например, малая терция, чистая квинта),— нельзя заложить в настройку клавишного инструмента. Ведь зона — это отклонение высоты звука отдельного или в интервале от той высоты, которая должна быть, чтобы интервал не имел большее число биений, чем у него должно быть при правильной на слух настройке. Если сделать, например, квинту шире, чем она должна быть, то хотя в пределах зоны Гарбузова мелодический интервал и звучал бы сносно, но при гармоническом звучании такая квинта будет совершенно фальшивой, и более того, один неверно настроенный для данной квинты звук даст фальшивое звучание другим гармоническим интервалам, в которые он входит нижним или верхним тоном. Часто формальное перенесение понятия зоны на настройку музыкального инструмента приводит к абсурду. Например, самый простой параметр: точность настройки унисона тона *ля*^{1}=440 Гц. В соответствии с зонным представлением даже для абсолютного слуха звук *ля*

первой октавы воспринимается и тогда, когда музыкант слышит звук с частотой 439 Гц, 438 Гц... 435 Гц и когда звук *ля*^{1} имеет частоту 441, 442... 448 Гц. Давайте так и поступим: одну струну *ля*^{1} настроим на 435 Гц, вторую на 440 Гц, а третью на 448 Гц. Все это будет в пределах зоны... Но то, что такая настройка невозможна и недопустима для нормального качества настройки фортепиано, объяснять даже не нужно. Разница частот крайних струн, как неточность настройки, будет равна 448—435=13 Гц, что в 13:0,2=65 раз превышает допустимую погрешность настройки унисона.

Часто забывают, что зоны Гарбузова относятся к художественному исполнению на инструментах со свободной или полусвободной интонацией, когда сам музыкант по желанию в процессе игры может менять интонацию звуков, причем делает это всегда с учетом мелодических и гармонических связей звуков. Рекомендовать зону, то есть слишком большие отклонения настройки в инструментах с фиксированным звукорядом, когда музыкант не в состоянии как-либо менять высоту звуков по желанию, просто абсурдно.

Логическое рассмотрение звуковысотных зон Гарбузова приведет нас к тому, что и инструменты со свободной интонацией не могут настраиваться по зонам. Так, струны скрипки должны быть настроены по чистым квинтам, и каждый музыкант так и делает. Но в соответствии с зоной можно было бы какую-либо открытую струну скрипки настроить примерно с отклонением на треть полутона вверх или вниз (по ширине зоны). Музыкант наверняка такую настройку забракует, так как ему нужна не зона сама по себе, а возможность свободно интонировать в пределах этой зоны.

Проведенные обсуждения зонной природы звуковысотного слуха, с точки зрения применимости к настройке музыкальных инструментов, направлены не против теории зонной природы звука как таковой, а против необдуманного ее перенесения на настройку, с чем приходится иногда встречаться. И когда Н. А. Гарбузов вводит понятие «зонный строй», то это строй исполняемой музыки, но не музыкального инструмента. В выводах в работе «Зонная природа звуковысотного слуха» Н. А. Гарбузов пишет: «12-звуковой равномерно-темперированный строй представляет собой частный случай 12-зонного строя». На наш взгляд, понятие двенадцатиступенного равномерно-темперированного строя именно есть частный случай, индивидуальный случай настройки инструмента, для которого настройка может быть только своя, только со своими индивидуальными отклонениями от идеализированных расчетных частот, и в настройке каждого конкретного инструмента не могут быть сделаны такие отклонения в пределах какой-либо зоны, которые, может быть, имеются в других инструментах. Понятие зоны в настройке просто не работает. Поясним это на примере общей высоты строя. Допустим, частота тона *ля*^{1} в реальной практике может доходить до 445—450 Гц. Это примерно верхняя граница «зоны» разброса частоты данного тона. Такая частота встречается на практике, но значит ли это, что настройщик свободно, как вздумается, может устанавливать высоту тона, допустим, 450 Гц? В нормальных условиях такую высоту тона

ля[1] специально не делают. Любые другие звуки инструмента не могут настраиваться в пределах широких зон, которые реально могут наблюдаться у разных инструментов. Настройка в том и заключается, что устанавливаются определенные, присущие только данному инструменту соотношения частот колебаний струн, язычков и т. д.

Звуковысотные зоны есть и у настройщика. Во-первых, темперированные интервалы должны иметь определенные отклонения от чистых, и настройщик старается их правильно установить. Во-вторых, настройщик не может идеально настроить из-за ограничений точности слуха, его разрешающей способности; в-третьих, могут быть отклонения в настройке, обусловленные требованиями художественного вкуса музыканта. Например, для многих музыкантов предпочтительной оказывается октава слегка расширенная, особенно в дискантовом регистре. В целом можно было бы говорить и о звуковысотной зоне слуха настройщика. Однако если зоны Гарбузова в большей степени результат художественных, эстетических требований к исполнению «живой» музыки и в меньшей степени связаны с погрешностями в процессе интонирования самого исполнителя (хотя это также имеет место), то зоны настройщика — это просто зоны случайных отклонений от правильной настройки, зависящие от квалификации настройщика, техники настройки и лишь в меньшей степени результат художественных требований. И когда говорят, что настройка — искусство, это правильно; в конечном счете оно направлено на настройку интервалов так, как это наиболее приемлемо для слуха. Для музыкального же уха, мы знаем (и исследования это доказывают), что правильным, например, унисон струн будет только в том случае, когда в нем отсутствуют биения чаще, чем одно биение за 4—5 с. Точнее унисон настроить можно, и музыкант вряд ли такой забракует, хотя не многие могут сказать, что им больше нравится слегка расстроенный унисон. Но никто из них не назовет правильным унисон с одним биением в секунду. Это однозначно.

Мы не хотим здесь пока вдаваться в тонкости настройки унисонов крайних дискантовых струн — там звучание струн продолжается всего несколько десятых долей секунды, и по этой причине, а также по некоторым другим (в том числе и связанным с недостатками конструкции фортепиано в верхнем регистре и с понижением чувствительности человеческого уха на высоких частотах) расстройка струн в унисонах здесь значительно более грубая. Но и здесь существуют пределы, за которые отклонения не могут выходить, если требовать правильности настройки.

Подобные соображения могут быть высказаны применительно к точности настройки других интервалов.

Общий вывод наш таков: то, что позволительно в звуковысотном интонировании исполнителю, то недопустимо для настройщика, в противном случае ни о какой художественной интонации не может быть речи.

Сам Н. А. Гарбузов говорит только о способности музыканта

запоминать, узнавать и воспроизводить звуки, и нигде в своих трудах не говорит о настройке инструментов с отклонениями, равными ширине звуковысотных зон. Сама зона — это отклонение от какого-то номинала вверх-вниз, плюс-минус. Но струна или язычок, или трубка духового инструмента не могут быть сразу настроены и на плюс и на минус. Поэтому попытки применить теорию зонной природы звуковысотного слуха к настройке музыкальных инструментов, для которых она и не предназначалась, являются, на наш взгляд, несостоятельными.

Ю. Н. Рагс в комментарии к работе Н. А. Гарбузова «Внутризонный интонационный слух и методы его развития» [17] фактически прямо говорит о неприменимости зонной теории к настройке фортепиано: «...„Точность интонационного слуха у профессиональных настройщиков"... не имеет прямого отношения к теории зонной природы звуковысотного слуха...» Кавычками внутри цитаты отмечено название раздела, данного Н. А. Гарбузовым в приложении к шестой главе вышеуказанной работы. И далее комментатор убедительно показывает сущность вопроса о взаимоотношениях зонной теории и практики настройки: «.. следует отметить постоянно встречающееся противоречие между нашим обобщенным понятием о равномерно-темперированном строе, основанным на различных примерах реализации его в каждом конкретном случае настройки инструментов типа фортепиано (статичный, в принципе точечный характер настройки каждого инструмента и вместе с тем — постоянное, неизбежное «варьирование» этого строя в разных инструментах), и живыми, динамичными слуховыми представлениями-предслышаниями, наполненными гибкими ладовыми, ритмическими и иными подобными связями между звуками в музыкальном произведении» *[17, 242]*.

По существу, Ю. Н. Рагс говорит здесь о неприменимости звуковысотных зон к настройке каждого конкретного, данного инструмента, имеющего «в принципе точечный характер настройки», а зона появляется только при рассмотрении отклонений у разных инструментов, у разных настройщиков или у одного инструмента, но в разных временных реализациях настройки. В такой трактовке понятие звуковысотной зоны применимо только как обобщенное философское понятие, абстракция.

Конечно, качество настройки зависит от квалификации настройщика, применяемых технических приемов, умения преодолевать встречающиеся затруднения. Так, крайние басовые струны и крайние дискантовые струны (т. е. самые толстые и самые тонкие) настраивать трудно по многим причинам: к краям звукового диапазона снижается чувствительность человеческого уха к колебаниям таких частот, в басовых струнах слабы основные гармоники и в то же время слышны разные биения между совпадающими гармониками настраиваемых интервалов; в дисканте звучание струн короткое, биения в унисонах и октавах слышны намного хуже, чем они слышны в среднем регистре, частота струны резко зависит от малейших перемещений вирбеля, намного изменяясь при самых незначитель-

ных усилиях на настроечном ключе; как правило, часть струн сама по себе имеет биения и их легко спутать с биениями, возникающими при совместном звучании струн унисона или октавы.

По отношению к басовому регистру закономерно поставить вопрос: какие же биения слушает настройщик, например, при настройке октавы? До сих пор говорилось, что в этом интервале сравниваются вторая гармоника нижнего звука и первая гармоника верхнего звука. Но в басовых звуках фортепиано, например, первые гармоники почти полностью отсутствуют или заглушаются более сильными высокими гармониками. Значит, настройщик по необходимости должен вслушиваться в биения, образующиеся между четвертой гармоникой нижнего звука и второй гармоникой верхнего звука октавы. Так как число слышимых гармоник басовых струн доходит до сорока, возможны биения и между другими совпадающими по частоте парами гармоник, например между 6-й и 3-й; 8-й и 4-й; 10-й и 5-й гармониками нижнего и верхнего звуков соответственно. А так как негармоничность обертонов следует нелинейной зависимости от порядковых номеров этих обертонов, то одновременно исключить биения между всеми парами гармоник невозможно. Допустим, исключим биения между 6-й и 3-й гармониками, но биения между 8-й и 4-й и 10-й — 5-й гармониками останутся. Таким образом, возникает неопределенность выбора пары гармоник, биения в которых требуется устранить. Если добиваться устранения в октаве басового регистра наиболее сильных биений, то тогда пары гармоник с нулевыми биениями каждый раз могут быть разными, поскольку в зависимости от конструкции инструмента и технологии его изготовления номера гармоник с максимальными амплитудами различны: это, очевидно, сказывается на степени расширения октавы при настройке. По мнению Г. Фукса и К. Феннера [18], настройщик просто обеспечивает суммарный минимум биений в звучании октавы, и может оказаться, что ни для одной пары не достигается нулевое биение, поскольку в этом случае могут быть сильно заметными биения в других парах. По нашему мнению, в большинстве октав по звуковому диапазону, начиная от большой октавы вверх, амплитуды первых гармоник существенно больше амплитуд более высоких гармоник. А это значит, что наиболее сильные биения в указанном диапазоне имеет все же первая пара совпадающих гармоник — вторая нижнего тона и первая верхнего. Но для самой нижней октавы точка зрения зарубежных исследователей представляется справедливой. Правда, есть одно соображение, позволяющее предполагать, что даже при слабости первых гармоник басовых струн настройка идет с их «неслышимым» участием. Из исследований слухового восприятия музыкальных звуков известно, что если в звуке, богатом гармониками, искусственно «удалить» первую гармонику (основной тон), то субъективно высота этого звука не изменится — основной тон «восстановится» как разностный тон в любой паре последовательных гармоник [5]. Таким образом, ухо все же воспринимает основную гармонику и, значит, настройщик может слышать биения в самой нижней паре совпадающих гармоник звуков октавы.

Теперь коснемся влияния метода настройки и контроля на расширение интервалов. Прежде всего остановимся на выборе области темперирования. На схеме 15 видно, что наибольшее приближение к нулевой линии наблюдается в области октавы *ля — ля*^{1}. Если мы начали бы темперацию с участка, например, *фа — фа*^{1}, то наибольшее приближение к нулевой линии точной настройки мы получили бы на большую терцию ниже. В зависимости от выбора области темперирования в одном и том же инструменте края диапазона будут настроены с различной степенью отклонения от нулевой линии. Учет этого обстоятельства может оказаться целесообразным при настройке клавишного инструмента, специально подготавливаемого для концертного исполнения каких-либо своеобразных музыкальных произведений.

Некоторые настройщики практикуют настройку всего диапазона и особенно темперацию терциями и секстами, а не обычными квинтами, квартами с привлечением также терций и других интервалов. Возражение здесь сводится к тому, что, во-первых, в терциях и секстах биения дают более высокие, а следовательно, и более слабые по амплитуде гармоники, их биения слышны относительно хуже. Но главное в другом. Более высокие гармоники имеют и бóльшую величину негармоничности обертонов, они больше отклоняются, причем без особой регулярности, то есть случайным образом, и если выравнивать биения в таких интервалах, прогрессивно их увеличивая с повышением положения интервалов, то мы можем получить нерегулярное увеличение биений в последовательностях квинт и кварт, биения в которых гораздо лучше слышны. Следовательно, настраивая только терциями и секстами, обязательно будем получать хорошо заметные на слух нерегулярности в последовательностях квинт и кварт. Целесообразнее оставлять нерегулярности в терциях и секстах (естественно, стремясь свести их к минимуму), отдавая предпочтение сохранению регулярности изменения биений в последовательностях квинт и кварт.

Степень расширения интервалов при настройке зависит от метода их контроля. Предположим, что в качестве контрольного теста используется двойная октава. Настройщик должен устранить биения между четвертой гармоникой нижнего звука и первой гармоникой верхнего звука. Но четвертая гармоника нижнего звука имеет бóльшую негармоничность, чем вторая гармоника звука, лежащего на октаву вверх. Это следует из того, что негармоничность пропорциональна квадрату номера гармоники. Поэтому при настройке двойной октавой верхний звук завышается в большей степени, нежели в том случае, когда тот же звук настраивается по звучанию одной октавы.

Частота звука клавишного, да практически и любого другого музыкального инструмента зависит в незначительной степени от амплитуды колебаний источника звука. Как правило, частота при больших амплитудах колеблющейся струны больше частоты малых колебаний струны. Поэтому настройка с использованием сильных ударов молотка по струне и с контролем биений именно в перво-

начальный момент времени сразу же после удара объективно ведет к большему расширению интервалов, к большему изгибу кривой настройки к краям диапазона, чем настройка того же самого инструмента слабыми ударами. Готовых правил при выборе силы звукоизвлечения при настройке дать нельзя. Можно лишь рекомендовать придерживаться при настройке одного инструмента либо сильных ударов по клавишам, либо слабых, но ни в коем случае не делать ненужного, непоследовательного изменения силы удара.

При большой негармоничности струн трудно обеспечить точность настройки двойных и тройных октав, если настройка ведется одинарными октавами. Наоборот, устраняя биения в двойных октавах, рискуем услышать биения в одинарных октавах. Существуют инструменты, в которых просто невозможно одновременно получить чистые октавы, чистые двойные и тройные октавы. Настройщику остается какой-то средний путь, чтобы не получить слишком большой фальши в тех или других интервалах. Для подобных инструментов удобнее использовать в настройке слабые удары, чтобы излишне «не растянуть» и без того слишком деформированный строй.

Приступая к настройке незнакомого инструмента, настройщик не знает степени негармоничности обертонов в его звуках. В то же время негармоничность должна учитываться при выборе методов настройки, для этого ее надо предварительно как-то оценить.

Вообще степень негармоничности зависит от габаритов инструмента, его мензуры, и это уже может дать определенные сведения по рассматриваемому вопросу. Но есть и более прямые методы. Так, если настроить тоны $ля^1$, $ля^2$, $ля^3$ и $ля^4$ интервалами в одну октаву и затем прослушать биения в двойных и тройных октавах $ля^1$ — $ля^3$, $ля^2$ — $ля^4$, $ля^1$ — $ля^4$, то чем чаще будут при прочих равных условиях биения в этих октавах, тем бо́льшую растянутость настройки имеет данный инструмент.

До сих пор мы рассматривали расширение октав в клавишных инструментах. Существует ли подобное явление в других группах музыкальных инструментов? Согласно известным исследованиям язычковых и смычковых инструментов /15/, хорошо настроенные аккордеоны, фисгармонии и язычковые органы имеют частоты нот, приближающиеся к расчетной шкале темперации Веркмайстера; их кривые настроек, типа кривой Рейлсбека для фортепиано, более или менее параллельны горизонтальной оси, а это означает малую степень влияния негармоничности обертонов язычков. Возможно, она не настолько велика по сравнению с негармоничностью струн и практически не проявляется в настройке. Искусственное расширение интервалов, как показали эксперименты, приводит к заметной фальши в аккордах и поэтому нецелесообразно. Таким образом, точная настройка на слух с исключением биений в октавах приводит к прогрессивному завышению в верхах и занижению в низах в клавишном инструменте и к параллельной горизонтальной оси кривой настройки в язычковом инструменте.

В смычковых инструментах нет строгого и полностью фиксированного строя из-за отсутствия разбивки грифа ладовыми пластин-

ками. Здесь настройка определяется чистыми квартами и квинтами, по которым настраиваются струны. Остальные интервалы здесь зависят от исполнителя, то есть строй носит «плавающий» характер. При сольном исполнении скрипач обычно берет чистые интервалы по всему звуковому диапазону, поскольку в музыкальном отношении чистые квинты, кварты и терции предпочтительнее темперированных и их музыканту просто легче исполнить. Правда, чистота интервалов оценивается по отсутствию в них биений, поэтому из-за присущей струнам негармоничности обертонов частоты обертонов первых гармоник в чистых интервалах на скрипке не имеют точно кратных соотношений. В целом при игре соло использование чистых интервалов приводит к расширению строя.

Завышение строя в смычковых инструментах — приблизительно 3 цента на каждую октаву. По величине оно почти такое же, как и в концертных роялях, но следует помнить, что завышение в смычковых инструментах получается на чистых квинтах, а в роялях — на темперированных (с биениями) квинтах. Мы назвали строй скрипки «плавающим» потому, что при ансамблевом исполнении в паре с инструментом, имеющим фиксированный звукоряд, скрипач старается играть в соответствии со строем этого инструмента (например, рояля). В противном случае скрипач рискует услышать недопустимые диссонансы.

В заключение раздела рассмотрим точность настройки инструментов. Точность настройки — это степень взаимного соответствия частот совпадающих гармоник в интервалах музыкального строя. Критерии и показатели точности различны для чистого и равномерно-темперированного строев.

Точность настройки музыкального инструмента может быть характеризована обратной ей величиной — погрешностью настройки, которая, в свою очередь, может быть определена через следующие четыре основных параметра:

1) отклонение общей высоты строя от стандартной высоты, определяемой тоном *ля*^{1} с частотой 440 Гц;

2) отклонение частот тонов средней октавы тенорового регистра от расчетных значений (по таблицам равномерно-темперированного и чистого строев). Этот параметр можно сопоставить с равноценным другим параметром — величиной отклонений расчетной частоты биений в квинтах и квартах (в частности, в чистом строе частота биений в квинтах и квартах будет близкой к нулю);

3) отклонение в настройке унисонов;

4) отклонение в настройке октав.

Данные параметры могут использоваться как для характеристики погрешности настройки в равномерно-темперированном, так и в чистом строях. Подчеркнем также, что первый параметр относится только к одному тону, второй — к тонам одной средней октавы тенорового регистра (обычно это *ля* — *ля*^{1} или *фа* — *фа*^{1} для струнных клавишных инструментов, *ми*^{1} — *ми*^{2} для язычковых инструментов), третий и четвертый параметры относятся ко всему диапазону инструмента. Люди, дилетантски подходящие к проблеме точности строя

и настройки музыкального инструмента, считают, что достаточно измерить лишь отклонения отдельных тонов от расчетных табличных значений (например, шкалы равномерно-темперированных частот), и проблема оценки настройки будет решена.

Несостоятельность подобного подхода понятна любому, кто практически музицирует на музыкальном инструменте или настраивает его, кто даст себе труд разобраться в том предмете, о котором он собирается судить.

Мы подчеркнули, что речь идет о четырех основных параметрах погрешности настройки. Можно указать и другие параметры — степень расширения октав, величина завышения дискантов и занижения басов и т. д. Но это все производные параметры от вышеперечисленных и они представляют второстепенные, не первоопределяющие слуховое качество настройки характеристики. Для разных видов инструментов значимость параметров может быть различной. Так, для одноголосных инструментов нельзя измерять настройку унисонов, их там нет. Но зато можно нормировать величину отклонений частоты от шкалы равномерной температации во всем звуковом диапазоне (пример — духовые инструменты).

Оценим теперь возможную точность установки частоты 440 Гц в случае настройки ее в унисон по камертону. Среднее используемое для настройки время звучания обычного камертона составляет 5—10 с. Конечно, есть камертоны, имеющие в 2—3 раза большее время звучания (при достаточной громкости). Но есть и плохо сделанные камертоны, быстро затухающие, поэтому с помощью большинства рядовых камертонов можно обнаружить не реже одного биения за 5—10 с. Это означает, что по камертону нельзя настроить точнее, чем $\pm 0{,}1$—0,2 Гц (0,4—0,8 цента). Если бы настройщики реализовали такую высокую, но реально достижимую точность, то не было бы практически заметной разницы в высоте строя разных инструментов. По результатам замеров высоты строя различных оркестровых музыкальных инструментов было обнаружено довольно большое отклонение от стандарта 440 Гц, достигающее нескольких Гц /19/. Особенно большие отклонения наблюдаются у духовых инструментов, меньшие — у клавишных и язычковых.

Каковы причины погрешности установки высоты строя и можно ли в принципе обеспечить точность в $\pm 0{,}1$—0,2 Гц?

Во-первых, погрешности настройки заложены в самих эталонах — камертонах, частота колебаний которых может отличаться от стандарта на доли герца и даже герцы. На частоту колебаний камертонов оказывает влияние температура, она может измениться также и в результате небрежного обращения с камертоном. Во-вторых, величина погрешности зависит от чувствительности человеческого уха и тщательности настройки. Все эти причины поддаются учету, их общее влияние на точность можно ограничить несколькими десятыми долями герца, но даже в этом случае бесполезно в музыкальных инструментах добиваться подобной точности, и не столько бесполезно, сколько невозможно эту точность обеспечить. Дело в том, что сами музыкальные инструменты не дают стабильного по частоте звука,

если оценивать эту стабильность десятыми долями герца. Частота тонов инструмента зависит от условий возбуждения колебаний источника звука, от температуры и влажности окружающей среды и, наконец, в некоторых случаях от самого музыканта. Во многих музыкальных инструментах изменение частоты связано с изменением амплитуды колебаний источника звука, и следовательно, все, что вызывает изменение амплитуды, можно считать причиной нестабильности частоты.

Так, в клавишных инструментах разница по частоте между звуками, вызванными сильным и слабым ударом по клавише, в среднем регистре достигает 0,3 Гц (1 цент), в язычковых инструментах в зависимости от величины давления воздуха, действующего на язычки, разница достигает 3 Гц (12 центов), но самая большая нестабильность частоты присуща духовым инструментам. Даже при постоянной температуре и влажности инструмента, в зависимости только от условий звукоизвлечения, область нестабильности частоты достигает у гобоя 8 Гц (32—34 цента), у кларнета, саксофона, трубы и валторны — до 11 Гц (40—48 центов), у флейты и фагота до 17 Гц (68—70 центов).

В новом пианино наблюдается и такое явление, когда после настройки отдельные участки струн понижают свою частоту, что вполне понятно и закономерно, но отдельные участки, наоборот, после некоторого времени, примерно после 8—10 дней, повышают частоту. Это относится к относительно менее натянутым толстым теноровым струнам на переходе к басовому регистру. Объяснение здесь достаточно логичное: новые струны подвержены заметным процессам релаксации напряжений, поэтому уменьшение напряжения басовых и дискантовых струн снимает часть давления на резонансную деку, приложенного к крайним участкам деки. Последняя в результате такого ослабления давления снова выгибается вверх и как бы подтягивает, увеличивая частоту, наименее натянутые средние теноровые струны. Эти процессы полезно учитывать настройщику и музыканту при настройке новых инструментов.

С наступлением влажного сезона (весной и осенью) древесина вирбельбанка набирает из воздуха влагу, разбухает и вирбели лучше держат строй. С наступлением сухих периодов древесина вирбельбанка усыхает, трение в гнездах уменьшается и нередко можно слышать в тишине своеобразные «выстрелы», когда из-за ослабления вирбелей струны скачком перескакивают через порожки, то есть смещаются, стремясь выравнять натяжение между рабочей и нерабочими частями. Подобный же эффект возникает и в новом инструменте, в котором еще продолжается релаксация струн, хотя прочность посадки вирбелей сохраняется высокой.

Р. В. Янг (Young) проводил исследования влияния изменений влажности воздуха на строй пианино в течение года в Г. Сан-Диего (США) /20/. Он отметил, что строй понижается во время сухих периодов года и повышается с наступлением влажных. Высота строя изменяется примерно через неделю после установившегося изменения влажности. С каждым изменением влажности на 10% настройка

изменяется на 5 центов (примерно на 1,25 Гц в среднем регистре). Во время больших перепадов влажности (20—70%) строй пианино в течение двух недель менялся на 20—25 центов. Для среднего регистра это составляет 5—6 Гц.

Янг установил, что в июне, июле, августе и сентябре строй остается почти стабильным, а в январе, феврале и марте незначительно изменяется.

Процессы деформирования опорных конструкций фортепиано с изменением влажности окружающего воздуха, когда вирбели хорошо держат строй, могут привести к такому интересному явлению. По собственным наблюдениям и по наблюдениям других авторов, клавишный инструмент может самопроизвольно расстроиться с изменением сезона в течение полугода, что вполне логично, и потом также самопроизвольно в течение остального полугодия настроиться.

Изменения строя, вызванные колебаниями влажности, таковы, что при игре в ансамбле с другими инструментами становится заметной взаимная ненастроенность инструментов. Чтобы этого избежать и излишне часто не настраивать клавишный инструмент, целесообразно придерживаться следующих рекомендаций, позволяющих обеспечить изменение настройки не более 8 центов, допускаемых при совместной игре двух музыкальных инструментов. Основная рекомендация: фортепиано необходимо настраивать при перемене времен года, то есть примерно в апреле и ноябре по стандарту. Такая двухразовая настройка будет давать отклонения в высоте от стандарта больше 8 центов, поэтому Р. В. Янг рекомендует производить настройку четыре раза в год. Настройка в декабре держится до апреля, когда влажность повышается. В апреле настройку делают с понижением строя, так как наступившая влажность повышает строй. Эта настройка будет держаться до мая-июня. В этот период настройку можно повторить и следующую сделать в середине сентября. Таким образом, схема настроек, по Р. В. Янгу, такова: первая настройка — ноябрь-декабрь, вторая — апрель, третья — июнь-июль и четвертая — сентябрь. Эту схему следует считать ориентировочной, требующей уточнения применительно к специфике температурно-влажностных условий в месте нахождения фортепиано.

Игровая нагрузка тоже вызывает расстройку клавишного инструмента, и имеются экспериментальные исследования этого вопроса.

По данным Е. Либера /21/, концертный рояль после игры по полной концертной программе снижает высоту строя примерно на 1,2 цента в среднем, со среднеквадратическим отклонением $\pm$ 1,99 цента и с разбросом отклонений от —7 до +6 центов. Несколько удивительным может быть повышение частоты струн после игры на инструменте.

Однако не надо забывать о сложности перераспределения напряжений в опорных конструкциях и струнах, когда ослабление натяжения одних струн может вызывать увеличение натяжения других. Последнее наблюдается и после механического обыгрывания инструментов в процессе производства для ускорения релаксации струн. Причем для новых инструментов и положительные и отрица-

тельные отклонения частоты струн могут достигать нескольких десятков центов.

Теперь, после рассмотрения некоторых факторов, вызывающих нестабильность строя музыкальных инструментов, нам ясно, что обеспечить постоянство высоты строя в несколько десятых долей Герца практически невозможно, если, конечно, не требовать невозможного: создать постоянные температурно-влажностные условия эксплуатации инструментов, играть на инструментах только с одной постоянной громкостью, применять одни и те же игровые приемы при возбуждении звуков и т. п. Клавишные инструменты чаще настраивают с завышением строя, которое может доходить до 1—3 Гц (встречается и большее завышение). Видимо, учитывая влияние влажности окружающей среды, в качестве ориентировочных границ можно рекомендовать точность установки строя фортепиано в пределах $\pm 0{,}5$ Гц. Оговоримся здесь сразу, что введение подобных норм в силу закона потребует нормирования условий испытаний: силы удара по клавише, отрезка звукового сигнала, на котором будет измеряться частота, и т. п.

Для язычковых инструментов точность установки строя должна находиться в пределах $\pm 0{,}8$ Гц, что следует из работ В. Х. Майнеля /19/ по изучению настройки аккордеонов. Что же касается духовых инструментов, то точность установки высоты их строя намного ниже, чем клавишных и язычковых.

Обратимся теперь к точности настройки унисонов. Если точность установки строя допускает довольно существенные отклонения, то в унисонах фактически получаемые настройщиками отклонения несравненно меньше.

Приведем мнение авторитетов по точности настройки унисонов. Так, в своем труде /15/ Г. Майнель указывает на высокую точность настройки хоров роялей квалифицированными настройщиками, допускающими отклонения в настройке унисонов не более 0,5 цента. Для области темперирования полцента означают ошибку настройки в 0,12 Гц. Еще большую точность дает американский настройщик Г. Ф. Харкер /22/, который считает, что в области *ля*^{1} можно слышать одно биение за 15 с, что обеспечивает ошибку настройки унисона всего в 0,066 Гц.

Метод настройки по биениям является не только чрезвычайно чувствительным, он может считаться фактически объективным методом, независимым от какой-либо субъективной оценки интервалов.

В среднем регистре клавишные инструменты допускают возможность сопоставления звучания струн в унисонах примерно 10—15 с. За это время возможно прослушать одно биение. Следовательно, получаемая при этом ошибка настройки должна достигать не более 0,1 Гц (или 0,4 цента). Как на практике реализуется эта возможность? Опытный квалифицированный настройщик вполне может обеспечить точность настройки в области темперирования в 0,1 Гц, то есть одно биение за 10 с. Фактически найденные отклонения в унисонах в среднем регистре нормально звучащих фортепиано достигают ± 1—2 цента. При большей расстройке унисонов звучание стано-

вится неспокойным, неровным, с дрожанием, обусловленным заметными биениями, и не удовлетворяет требованиям музыкантов.

Последнее не относится к дискантам. Самые крайние два-три дискантовых тона иногда целесообразно слегка расстроить с расширением в октавах и в унисонах, когда при точной настройке последние струны звучат чрезмерно глухо и неясно.

Казалось бы, при настройке унисонов с большей точностью, то есть при разнице частот меньше 1 цента, качество их настройки должно быть выше, но, ввиду ограниченной чувствительности уха к малым изменениям частоты, заметного улучшения качества звучания при этом не обнаруживается. Иначе говоря, с точки зрения музыканта, унисон, настроенный с погрешностью меньше 1 цента, ничего не выигрывает в музыкальном отношении (следует помнить, что здесь речь идет только о среднем регистре фортепиано). Этот вывод был получен на основе исследований музыкального качества унисонов с различной степенью расстройки: в 0, 1, 2, 4 и в 6 центов [11, 23].

Результат был получен следующий: наиболее предпочтительно настроенным в музыкальном отношении оказался хор из трех струн с разницей по частоте между струнами в 1 или 2 цента. Если снова пересчитать разницу в герцах, то для тона *ля*[1] мы получим оптимум расстройки 0,25 Гц или одно биение за 4 с, а недопустимую величину расстройки — более 0,5 Гц или одно биение за две с. Одно из преимуществ унисонов с небольшой степенью расстройки — «оживление» звучания при одновременном сохранении чистоты субъективно воспринимаемого унисона.

При нормальной настройке точность соблюдения полутоновых интервалов в среднем регистре составляет ± 2—4 цента и увеличение расстройки к краям достигает ± 3—5 центов. Точность настройки других интервалов примерно та же.

Что можно сказать по точности настройки унисонов язычковых инструментов? Можно полагать, что точность настройки унисонов язычковых инструментов в регистрах без специального розлива* должна быть выше, чем для фортепиано. Небольшая расстройка унисонов в клавишном инструменте как бы обеспечивает бóльшую продолжительность жизни затухающему тону, в то время как в язычковом инструменте звук не является затухающим и в случае продолжительных аккордов более заметна неточность настройки унисонов.

По исследованиям Г. Майнеля, лучшие настройщики аккордеонов добиваются точности настройки унисонов с ошибкой менее чем $\pm 0{,}5$ цента, во всяком случае большинство отклонений настройки находилось именно в этих пределах. По-видимому, следует говорить о точности не ниже $\pm 0{,}4$—0,5 цента для унисонов язычковых инструментов (1 биение за 8—10 с).

Необходимо сделать еще одно замечание. Как правило, точность настройки области темперирования существенно выше точности

---

* Розлив — это настройка язычков с биениями.

настройки краев диапазона клавишного и язычкового инструментов. В отдельных случаях ошибки в настройке интервалов области темперирования не превышают ± 0,5 цента.

5. Вибрато и розлив в музыкальном инструменте

Характер большинства музыкальных звуков непостоянен во времени; эти звуки, как говорят, нестационарны. Изменяться в процессе звучания могут частота звука, его интенсивность и спектральный состав. Изменения этих параметров могут быть как непериодическими (например, затухание звука), так и периодическими, которые в музыкальном исполнительстве называются «вибрато» и особенно ярко проявляются в звучании певческого голоса, смычковых, а также язычковых инструментов.

Значение хорошего вибрато для голоса певца и звука смычкового инструмента не вызывает никаких сомнений. В то же время розлив язычкового инструмента иногда рассматривается как дань примитивному, невысокому художественному вкусу. Вероятно, такое мнение однобоко — нужны аккордеоны и баяны с розливом и без него. В подтверждение сказанному можно привести результаты исследования вибрато голоса и звука смычковых инструментов.

Установлено, что вибрато делает голос приятнее, придает ему живость и одухотворенность, без вибрато он безжизнен и невыразителен. Вибрато оживляет также звучание смычкового инструмента, делает его более выразительным в художественном и эмоциональном отношении, повышает динамичность исполнения, скрывает ощущение «гнусавости» звука, то есть как бы улучшает тембр. Звуки с вибрато лучше слышатся в шуме, а также способны покрывать бóльшие расстояния, чем звуки без вибрато, потому что человеческий слух особо чувствителен к изменяющимся во времени звукам. Поэтому опытные музыканты и певцы сознательно используют вибрато. Розлив иногда намеренно создается в фортепиано (известно, что П. И. Чайковский любил играть на рояле с розливом) [24].

Вибрато опытного исполнителя воспринимается как тембровая окраска звука, причем слух не улавливает ни изменения высоты, ни изменения тембра. Считают, что наиболее благоприятное впечатление производит вибрато с частотой 6—8 колебаний в секунду [25]. Если вибрато более редкое, то создается ощущение «качания» звука, а если частое — «дрожания». Эти рассуждения относятся к области первой и второй октав — середине воспринимаемого звукового диапазона.

Если рассматривать четкость слуховых ощущений, то, как отмечает исследователь электромузыкальных инструментов А. А. Володин [26], область частот вблизи 400—1000 Гц является самой благоприятной в этом смысле, причем максимальная разрешающая способность уха приходится на область 500 Гц. Логично увязать эту область максимальной разрешающей способности с частотой вибрато, наилучшей в музыкальном отношении. Слуховые ощущения

менее детализированы вне указанной примечательной области, и, очевидно, нельзя выдерживать вибрато постоянным во всем звуковом диапазоне от большой до четвертой октавы. Обоснование этому обстоятельству будет дано ниже.

С другой стороны, нежелательно и значительное отклонение частоты вибрато от средних значений — 6—8 колебаний в секунду. По-видимому, уменьшение или увеличение частоты вибрато более чем в два-три раза будет неблагоприятным для качества тембра.

Далее мы рассмотрим вибрато — розлив по отношению к язычковому инструменту, поскольку в этом виде инструмента он связан с настройкой язычков, в то время как вибрато в смычковых инструментах не связано с настройкой; оно управляется самим музыкантом. Розлив создается в результате сложения колебаний язычков при их небольшой относительной расстройке. Результат сложения проявляется в виде биений. Розлив рекомендуется создавать в основном за счет повышения частоты одного из пары язычков. Если б каждый из этих двух язычков создавал только одно простое гармоническое колебание — простой тон, то при равенстве амплитуд колебаний язычков биения были бы заметны очень отчетливо: амплитуда суммарного звука изменялась бы от нуля до удвоенного значения. Практически этого не происходит из-за сложности спектрального состава звука, амплитуда при биениях язычков уменьшается не до нуля, а до некоторого минимума. Чем больше различие в спектре звуков двух близких по основной частоте язычков, тем меньше должна быть выражена амплитудная модуляция суммарного тона.

Биения с частотой от 20—30 до 60 в секунду придают звуку резкую степень диссонанса, для розлива в язычковом инструменте они неприемлемы. Нижний диапазон биений от 0 до 20 можно было бы полностью рекомендовать для розлива. Однако, учитывая биения между сильными первыми обертонами, частота которых попадает в область диссонанса, нужно ограничить верхний предел допустимых для розлива биений в 2—3 раза, по крайней мере, не выше 15 биений в секунду.

Нижнюю границу биений для розлива можно установить, исходя из чувствительности уха к изменению частоты тона. Частота суммарного тона изменяется около среднего значения на некоторую величину. Известно, что на частотах ниже 500 Гц дифференциальный порог ощущения изменения частоты составляет примерно 1,5—1,8 Гц и почти не зависит от скорости изменения частоты [27]. Из сказанного следует, что диапазон биений, допустимых в розливе язычкового инструмента, находится ориентировочно между 1,5 и 15 биениями в секунду. Но по какому закону должны изменяться биения при переходе от ноты к ноте, каково число биений в каждой ноте правого диапазона?

Закон изменения числа биений должен учитывать особенности человеческого слуха при восприятии минимальных изменений частоты в разных диапазонах. Один из законов розлива может быть связан с порогом чувствительности уха к разным частотам. Для каждой ноты выбирают определенное число биений, но так, что биения у всех

нот, взятые на пороге чувствительности, одинаково заметны на слух.

Для такого розлива, который для удобства назовем «тупым», характерно примерно одинаковое число биений — в среднем 1,5—2,5 биений в секунду в области частот меньше 500 Гц и возрастание биений почти пропорционально частоте выше 500 Гц.

В случае, соответствующем по нашему определению «острому» розливу максимальной разрешающей способности слуха (область 500 Гц), приведем в соответствие наиболее заметное число биений (4—6 в секунду).

Исходя из сказанного выше, можем изложить следующие требования к розливу:

биения в розливе должны быть от 1—1,5 и до 15 в секунду;

биения должны возрастать с частотой звука, изменяясь примерно по линейному закону до области 500 Гц; выше этой области возрастание биений более быстрое, примерно пропорционально частоте;

в области 500 Гц должно быть примерно 2—3 биения при «тупом» розливе и 4—6 при «остром» [28].

Изменение числа биений с частотой звука можно выразить в математической форме с помощью гиперболического тангенса [29], при этом получаются следующие формулы для частоты биений:

«острый» розлив $S_o = 4{,}25 \text{ th } (0{,}0407n - 0{,}5214) + 5{,}75$,

«тупой» розлив $S_t = 3{,}5 \text{ th } (0{,}0336n - 0{,}967) + 4{,}5$,

где S — частота биений,

n — число полутонов, отсчитываемых от *ля*[1], вверх по диапазону со знаком +, вниз — со знаком —.

Если известна частота f тона, для которого ищется розлив, то n находят по формуле:

$$n = 12 \log_2 \frac{f}{440} .$$

По эмпирическим формулам число биений легко подсчитать, и соответствующие числа биений для тонов имеются. Для простоты изложения приведем здесь только графики биений для «острого» и «тупого» розлива (см. схему 16 на с. 109), где плавные кривые соответствуют расчетным значениям, а ломаные — экспериментальным данным, полученным на аккордеонах двух известных фирм.

Вертикальная ось — чйсла биений, горизонтальная обозначает ноты правого полукорпуса инструмента. Видно довольно удачное совпадение предложенного расчетного розлива с розливом в инструментах, отличающихся хорошими звуковыми качествами. На обеих экспериментальных кривых заметно уменьшение точности настройки розлива к самым верхним и низким нотам. Формулы на основе гиперболического тангенса удобны тем, что при любом расширении звукового диапазона язычкового инструмента (в баянах до 64 и более полутонов) биения, рассчитанные по ним, не выходят в область, непригодную для использования из-за резкого диссонирования. Здесь выполняются все закономерности для «тупого» и «острого» розлива, о которых мы говорили до введения математических формул.

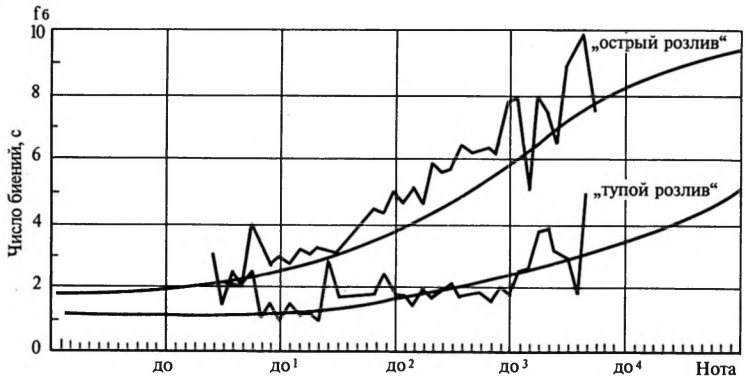


Схема 16. Законы «разлива» для язычкового инструмента

Существует также своеобразный французский розлив «мюзетт», при котором в каждом тоне один язычок настроен в номинальное значение, второй завышен на несколько герц, а третий занижен на несколько герц. Например, язычки могут иметь такие отклонения:

Номинальная частота язычка, Гц	a=220	a¹=440	a²=880	a³=1760
Отклонение верхнего язычка, Гц	+2,7	+4,5	+8	+14
Отклонение нижнего язычка, Гц	—1,5	—2,2	—4	—7

Звучание аккордеона с розливом «мюзетт» отличается живостью, яркостью, серебристостью, звук как бы искрится, и его уже не спутаешь ни с каким другим. На эстраде он незаменим.

IV. ТЕХНИКА НАСТРОЙКИ

Мастерству настройки учатся практически, им нельзя овладеть прочтя некоторое количество теоретических работ и практических руководств. Нужна кропотливая тренировка слуха и руки с ключом и другим рабочим инструментом. Однако овладение основами теории и приемами опытных настройщиков может значительно ускорить обучение этому уникальному мастерству.

В этой главе большое внимание будет уделено настройке клавишных инструментов. Музыканты, играющие на различных струнных инструментах, настраивают их самостоятельно, но не много найдется пианистов, которые способны настраивать свой инструмент, так как настройка фортепиано — сложная и квалифицированная работа. Одна из задач данной книги — способствовать расширению круга музыкантов, настраивающих пианино или рояль самостоятельно.

1. Настройка клавишных струнных инструментов

Состояние клавишных инструментов, которые приходится настраивать настройщикам, может быть различным по стабильности строя и по физической сохранности основных частей: опорных конструкций, механики, корпуса и т. д. Разумеется, настройщик должен учитывать это состояние, но во всех случаях, когда не требуется предварительный ремонт, то есть тогда, когда необходима работа именно настройщика, а не реставратора, должна быть проведена полная настройка, начиная с области темперирования и по всей шкале. Некоторые настройщики имеют вызывающую сожаление привычку настраивать инструмент на той высоте, на которой он находится к моменту настройки. Должно быть правилом, что первой операцией всегда является установка строя в камертон, проверенный и точно настроенный на тон *ля*[1] 440 Гц. Иногда ограничиваются выборочной настройкой отдельных хоров, а там, где наиболее заметны отклонения,— подчисткой отдельных интервалов, что тоже недопустимо. Если есть возможность, фортепиано следует настраивать по полной программе.

Основной инструмент для настройки: камертон (или несколько камертонов с разными частотами темперированной шкалы), настроечные ключи, различающиеся по диаметру гнезда под головку вирбеля (на нормальный и утолщенный вирбель) и по форме ручки

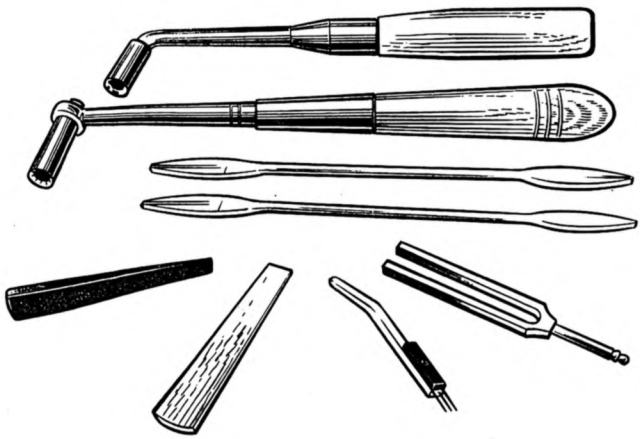


Рис. 1. Инструменты для настройки и интонировки

(Г- или Т-образной), клинки деревянные, оклеенные замшей, и резиновые клинки, интонировочные иглы (см. рис. 1). Кроме того, могут понадобиться отвертки, плоскогубцы, кусачки, хорейзен, крючок для подъема колец струны на вирбеле. Последние инструменты применяются при замене струн.

Настроечный ключ желательно иметь цельнометаллический, а не со съемной головкой. Любая сменная головка в конце концов разбалтывается, появляется люфт, что только затрудняет работу по точной установке высоты струн.

В продаже имеются язычковые камертоны, типа свистков. Нужно предостеречь от их применения для серьезных видов настройки. Такими камертонами можно пользоваться любителям при повседневной настройке смычковых и щипковых инструментов. Ни в коем случае их нельзя использовать для настройки клавишных инструментов, поскольку частота язычковых камертонов сильно зависит от температуры и влажности попадаемого на язычок воздуха и в процессе работы с язычковым камертоном частота его никогда не бывает постоянной. Даже вилочный камертон подвергается влиянию температуры, и настройщик должен знать об этом.

Заглушение струн производят с помощью резиновых или деревянных, обтянутых замшей, клинков. Деревянный клинок используют при настройке струн дисканта пианино, где из-за малой длины струн трудно вставлять резиновый клинок. Стержень деревянного клинка свободно проходит между гаммерштилями (стержнями) молоточков и вставляется между струнами одного хора или между соседними хорами.

Резиновый клинок вырезают из массивного куска достаточно твердой резины длиной примерно 70—100 мм, шириной 15—18 мм и

толщиной до 6 мм. Клинок вырезают сначала острым ножом и затем заглаживают неровности напильником или, что еще лучше, обрабатывают на шлифовальном круге.

Настраивать пианино настройщик должен стоя. Но мастера не всегда придерживаются этого правила и настраивают также и сидя, особенно когда пианино малогабаритное. Автору пришлось наблюдать настройщика высокого роста, который настраивал пианино, широко расставив ноги. По его утверждению, такая позиция дает надежную опору корпусу и рукам.

Камертон держат за рукоятку и резко, но не слишком сильно, ударяют им о какой-либо твердый предмет, покрытый тканью, сукном, резиной. Можно просто ударять вилкой камертона по согнутому суставу кисти свободной левой руки.

Настроечный ключ может быть посажен на головку вирбеля в восьми различных положениях. Какое из них предпочтительнее? Общая рекомендация: ручка ключа у рояля должна стоять правее, а у пианино несколько левее воображаемой линии продолжения струн.

Расположение рукоятки ключа справа от вирбеля (при настройке пианино) считается неправильным, хотя на практике можно встретить у некоторых настройщиков и такое положение ключа. При расположении рукоятки справа в момент повышения натяжения струны, на нижнюю часть гнезда вирбельбанка оказывается большое давление, которое сминает древесину. В конечном счете происходит расшатывание гнезда и ослабление посадки вирбеля в вильбербанке. Однако при настройке самых крайних струн басового и дискантового регистров приходится отступать от «правильного» положения ключа, так как иначе ключ там не поставишь на вирбель.

Получается как в известной ситуации: «Нельзя, но если очень необходимо, то можно». По нашему мнению, если не злоупотреблять слишком большим переносом рукоятки ключа вправо (в рояле — влево), то такое положение также может быть допустимым в практике. Что же касается излишнего давления на гнездо вирбельбанка, то оно действительно не желательно для беспанцирных чугунных рам инструментов, то есть таких инструментов, у которых чугунная рама имеет окно в области расположения вирбелей. В современных клавишных инструментах применены исключительно панцирные чугунные рамы, и в них давление выходной части вирбелей передается жесткой пластине панциря. Поэтому расположение рукоятки ключа и на стороне струны, и на противоположной стороне определяется в некоторых случаях только удобством работы с ключом и не должно иметь особого отрицательного влияния на прочность посадки вирбелей в панцирных инструментах с хорошим держанием строя. Но правое расположение рукоятки нежелательно для беспанцирных инструментов, если к тому же слаба посадка вирбелей в гнездах.

На первом этапе овладения работой с настроечным ключом необходимо усвоить правило: головка ключа всегда должна быть плотно, до упора установлена на вирбеле. В инструменте могут стоять и ремонтные утолщенные вирбели. Для них желательно иметь соответствующую головку настроечного ключа с бóльшим размером восьми-

гранного гнезда. Постановка нормальной головки на утолщенный вирбель может привести к порче квадрата вирбеля и к большому люфту при настройке.

Обычной ошибкой начинающего настройщика является постановка ключа не на тот вирбель, струна которого настраивается в данный момент. В верхнем регистре это часто является причиной перетяжки и обрыва струны, так как настройщик, не слыша изменения высоты настраиваемой струны, перетягивает другую струну до ее обрыва. Поэтому рекомендуется каждый раз сначала убедиться в правильности выбора вирбеля.

Цель настройки — получение правильно и устойчиво настроенных струн с точно выдержанными высотными соотношениями. Стабильность частоты звучания струны зависит от той техники настройки, которой владеет настройщик. Под устойчивостью частоты струны здесь следует понимать способность струны сохранять приданную ей частоту при воздействии сильных ударов по клавише. От данного понятия необходимо отличать стабильность строя инструмента, зависящую от длительности процессов релаксации струн и опорных конструкций, от прочности посадки вирбелей, изменений температурно-влажностных условий внешней среды. При высокой стабильности строя струна может быть настроена неустойчиво из-за неправильной техники настройки, и при первых же сильных ударах по клавише струна окажется фальшиво настроенной по отношению к другим струнам. При низкой стабильности строя струна даже при правильно выбранной технике не будет устойчивой продолжительное время.

Что же в таком случае определяет устойчивость частоты струны? Поведение струны в процессе настройки определяется двумя факторами, зависящими друг от друга: упругостью настраиваемой системы и трением в ней. Каждый из этих факторов имеет несколько составляющих. Если под понятием «настраиваемая система» подразумевать все, что закрепляет, натягивает и поддерживает струну в точках соприкосновения с ней, то в эту систему мы должны включить вирбель с вирбельбанком, струну и опоры струны: аграф* или кланг-штабик** с каподастром***, штифты на штеге и рамный штифт на чугунной раме. Вот эту всю систему в результате настройки необходимо оставить в таком состоянии напряженной устойчивости, которое наилучшим образом сохранит заданную частоту струны. Перечислим составляющие факторов упругости и трения. К первому надо отнести: упругость вирбеля, составленную, в свою очередь, из упругости самого вирбеля и упругости гнезда в вирбельбанке, упругость нерабочих частей струны, упругость рабочей части струны, упругость штега, связанную с упругостью деки, и упругость штеговых штифтов.

К фактору трения следует отнести трение вирбеля в гнезде вирбельбанка, трение в аграфе или на кланштабике, трение на штеге. Трение на штифте чугунной рамы мы не будем рассматривать, по-

---

* Аграф — винт с отверстием в головке, служащий для отсечки струны.

** Кланштабик — ребро отсечки струн на чугунной раме.

*** Каподастр — планка для прижима струны.

скольку оно, как правило, велико и практически исключает расстройку струны из-за сдвига ее около штифта.

Что происходит при натягивании струны в такой системе? Прежде всего натягивается участок струны между вирбелем и аграфом (каподастром и клангштабиком), далее натягивается ее рабочая часть и в последнюю очередь — нерабочая часть между штеговым штифтом и штифтом чугунной рамы. Поскольку существует трение в местах отсечек рабочей части струны, напряжение в керне струны на различных ее участках обычно неодинаково, и это создает одну из предпосылок неустойчивого положения струны. Действительно, напряжение в керне струны у вирбеля больше напряжения рабочей части струны, а последнее больше, чем напряжение нерабочей части струны у штифта чугунной рамы. При постепенном повышении силы удара молотка по струне и при условии, что величина трения приблизительно одинакова на местах отсечки рабочей части струны, сначала выравнивают напряжения в керне по обе стороны аграфа (клангштабика), затем можно выравнять напряжение в керне по обе стороны штеговых штифтов. Эти оба выравнивания напряжений поразному сказываются на частоте колебаний струны: сначала частота повышается, так как скачок струны на аграфе при первоначально большом напряжении в нерабочей части струны у вирбеля повышает напряжение в рабочей части, а с ним и частоту. Так как напряжение в нерабочем участке струны за штегом было ниже напряжения в остальных участках, то сдвиг струны по штегу вызовет уже понижение частоты рабочей части струны. Мы рассмотрели один вариант работы струны при определенном соотношении трений и упругостей элементов настраиваемой системы. В каждом индивидуальном случае каждому инструменту, струне будут свойственны конкретные соотношения величин трений в опорах и упругостей, которые заранее определить невозможно. Например, при большом трении на штеге напряжения в керне по обеим сторонам штега при сравнительно слабых ударах вообще не будут выравниваться. Поведение струны будет иным, если она предварительно была существенно перетянута и настроена с понижением напряжения верхнего нерабочего участка (у вирбеля). Величина трения на опорах может существенно меняться в разных струнах. В некоторых случаях трение может быть почти равным нулю, особенно на клангштабике, или достигать большого значения, когда соприкасающиеся участки струны и клангштабика покрыты ржавчиной или струна имеет в этом месте излом. Чтобы преодолеть подобные препятствия при настройке, рекомендуется предварительно ослабить струну [13]. Если же есть уверенность в том, что трение струны у аграфа или клангштабика достаточно мало, а необходимо снять «застойные» явления в струне на штеге, можно проделать следующее: слегка перетянуть струну и в момент этой перетяжки сильно ударить по клавише данной струны, что выровнит напряжение на штеге. При последующем понижении напряжения, поворачивая вирбель против часовой стрелки, одновременно ударяют по клавише, выравнивая напряжения уже по обеим сторонам аграфа. Допустим теперь, что напряжение на штеге достаточно

выровнено, а трение струны между штеговыми штифтами таково, что небольшие изменения напряжения в струне под воздействием вирбеля не дают возможности струне скользить по штегу. Возникает вопрос, каким должно быть направление движения нерабочей части струны у вирбеля, приводящее к точной настройке рабочей части струны? Очевидно, это последнее движение, вызываемое действием вирбеля, должно быть таковым, чтобы напряжения в керне струны по обеим сторонам аграфа или клангштабика были по возможности равными. Действительно, если заканчивать настройку струны так, что у вирбеля напряжение в струне будет больше, чем в рабочей части, то при сильных ударах струна может перескочить в сторону вирбеля и завысить свою частоту, то есть произойдет ее расстройка вверх. Если же настройку заканчивать при пониженном напряжении в керне нерабочей части струны у вирбеля по сравнению с напряжением рабочей части, то дальнейшая расстройка будет происходить с понижением частоты струны.

Если не принимать во внимание никаких других факторов, то следует признать, что более целесообразна настройка с поднятием высоты струны, то есть на повышение. В этом случае большое натяжение нерабочего участка будет стремиться повысить натяжение рабочей части струны. Но это повышение компенсируется вытяжкой струны и ослаблением натяжения из-за обыгрывания инструмента. Таким образом, два противоположных процесса взаимно нейтрализуются, что создает предпосылки для устойчивости, стабильности настройки.

При настройке с понижением оба вышеуказанных фактора (менее натянутый нерабочий участок, обыгрывание) воздействуют на рабочую часть только в одном направлении — уменьшения напряжения и, следовательно, снижения частоты колебаний струны.

Влияние на стабильность настройки оказывает также и окончательное положение вирбеля. Последним движением ключа вирбель может быть поставлен в трех положениях: 1) немного наклоненным вниз (у пианино), 2) в среднем нейтральном положении и 3) в верхнем положении. Очевидно, нейтральное и верхнее положения вирбеля хуже, по сравнению с небольшим наклоном в сторону струны. При сильных ударах по струне возникающее добавочное натяжение может изменить положение вирбеля во втором и в третьем случаях и, следовательно, изменится настройка струны. В первом же случае упругость вирбеля позволит ему сохранить заданную настройку струны. Таким образом, предварительно напряженный вирбель представляет для струны более надежную опору. В связи с этим возникает вопрос: можно или нельзя изгибать вирбель в процессе настройки, хорошо это или плохо, и почему?

Понаблюдайте за работой опытного настройщика. Вряд ли вы увидите настройку в чистом виде только с применением одного вращательного движения вирбеля. Здесь сам опыт говорит за себя. Тот, кто хотя бы один раз настраивал крайний дискант пианино, знает, что одним вращением вирбеля струну настроить почти невозможно. Сдвиг конца струны должен быть незначительным, так как даже

небольшой поворот вирбеля сильно повышает или понижает частоту. При вращении в вирбеле неизбежно создаются крутильные и изгибные деформации. Сильные воздействия на головку вирбеля вызывают как поворот, так и его изгиб. Малые усилия не сопровождаются поворотом, точнее, сдвигом вирбеля в вирбельбанке, но благодаря упругости вирбеля, противостоящего крутильным и изгибным напряжениям, создаваемым струной и настроечным ключом, удается получить весьма малые смещения конца струны, достаточные для точной установки высоты.

Если не применять небольших изгибающих усилий на вирбели в дисканте, то, в случае их плотной посадки, струны можно перетянуть на полутон, прежде чем начнется вращательное движение вирбеля. Как отмечал настройщик Московской консерватории Г. К. Богино, опытные настройщики умело используют крутильные и изгибные деформации вирбелей для более точной и устойчивой настройки [13]. Делать небольшие изгибы вирбелей требуется очень осторожно, чтобы не сломать вирбель и не расшатать от чрезмерного усердия гнездо в вирбельбанке. Настройщик должен чувствовать и уметь находить центральное положение оси вирбеля, от которого можно сделать небольшой изгиб. Если в результате неопытности настройщика вирбель уже чрезмерно согнут и его еще дополнительно изогнуть, то положение струны будет совершенно нестабильным, если вообще вирбель выдержит нагрузку. Поэтому все движения ключа, вызывающие изгиб вирбеля, необходимо применять осторожно. В идеальном случае изогнутое упругое положение вирбеля должно быть таким, чтобы после сильных ударов молотка и сдвига струны в аграфе или на клангштабике упругие усилия вирбеля немедленно возвращали бы струну в прежнее положение и таким образом ликвидировали кратковременную расстройку.

Теперь рассмотрим некоторые практические приемы работы с настроечным ключом, часть которых взята из рекомендаций Г. К. Богино [13].

Прежде всего надо позаботиться об устойчивом положении правой руки с ключом. Во время настройки кисть или локоть должны покоиться на близлежащей части корпуса рояля или пианино так, чтобы можно было точно контролировать движения ключа в любом направлении. В крайнем случае хотя бы большой палец должен упираться в раму (последнее только для рояля). Ни на один момент рука не должна покидать опору, кроме того случая, когда переставляется ключ. В то время как рука имеет твердую опору, пальцы руки и кисть совершают движения, которые должны быть достаточно сильными, но свободными. Для тренировки можно рекомендовать различные физические упражнения, развивающие кисть руки, ее мышцы: например, упражнения по поднятию кистью руки какого-либо груза (гантели) в разных направлениях, вращение груза по кругу только кистью, сжатие пальцами руки небольшого резинового мяча или ручного эспандера и т. п. Эти и подобные физические упражнения будут способствовать развитию силы мышц в руках, которые должны обеспечивать мощное и чуткое воздействие на ключ и вирбель. В про-

цессе настройки левая рука должна извлекать звуки интервалов, и здесь нелишними будут соответствующие игровые упражнения.

В современной настройке клавишных инструментов различают три основных рабочих приема, обеспечивающих воздействие ключа на вирбель: вращение вирбеля, его изгиб и вращение с одновременным изгибом вирбеля.

С помощью первого приема можно вызвать значительные изменения частоты струны, легко достичь большой вытяжки струны и почти невозможно получить мизерное удлинение, особенно необходимое для настройки дискантовых струн. С помощью только вращения настраивают басовые и часть теноровых струн. В дискант точная настройка вращением возможна только путем многочисленных движений ключом в обе стороны с большой затратой времени.

Второй прием — изгиб вирбеля — более тонкое средство настройки, о чем говорилось выше. Если первый прием обеспечивает более или менее грубую настройку, то второй позволяет получить микронные сдвиги струны и, следовательно, точно настроить дискантовые струны.

В отечественной литературе по настройке прием изгиба вирбеля считается «незаконным» и категорически запрещается. Основное возражение против такого приема заключается в утверждении, что изгиб вирбеля приводит к расшатыванию гнезда вирбельбанка и к поломке самого вирбеля. Но так же как вращение вирбеля в умелых руках не приводит к обрыву струны, так и изгиб вирбеля, выполненный умело и в меру, не приведет к поломке вирбеля и расшатыванию гнезда. В подтверждение сказанному можно сослаться на практику работы настройщиков Московской консерватории и данные зарубежной литературы [30].

Третий прием представляет собой по существу синтез первых двух приемов, но его можно считать самостоятельным, поскольку направление движения руки с ключом во всех трех приемах различно: в первом рука движется в плоскости вращения вирбеля, во втором — перпендикулярно плоскости вращения и в третьем — под острым углом к этой плоскости. Из разобранных основных трех приемов настройки возможны многочисленные сочетания воздействия ключа на вирбель, отличающиеся последовательностью чередования приемов, величиной усилий и т. д. Так, простое вращение вирбеля можно выполнить с постепенным плавным нарастанием усилия давления на ручку ключа, с короткими чередующимися плавными толчками и с полным или частичным снятием усилия, а также одним более или менее резким вращательным толчком. Наконец, как рекомендует Г. К. Богино, плавное вращательное усилие может сопровождаться частыми вибрациями руки и пальцев. При непрерывно нарастающем общем вращательном усилии вибрации позволяют получить довольно малый угол поворота вирбеля, ощущаемый в виде легкого щелчка, после которого надо моментально прекратить усилие.

Незначительный простой изгиб вирбеля может заканчивать настройку и может выглядеть просто как короткий слабый толчок ключом, и лучше всего с наклоном вирбеля в сторону струны, чем дости-

гается выравнивание напряжений в рабочей и нерабочей частях струны.

При повышении частоты струны толчок делается вправо и от себя, при понижении — влево и к себе. Толчки должны быть легкими, повторяющимися, если это необходимо, несколько раз. После каждого движения необходимо останавливать свое внимание на контроле полученного результата настройки. Если при больших отклонениях колебаний струн от требуемых для правильной настройки интервала ключ с вирбелем поворачивают, то при окончательно точной настройке применяют толчки.

Некоторые настройщики считают, что последнее движение, когда точность настройки достигается легким толчком рукоятки, может быть и от себя — вправо, и к себе — влево (при верхнем расположении рукоятки ключа при настройке пианино). Настройщики говорят при этом, что они умеют независимо от окончательного направления движения ключа придавать вирбелю устойчивое положение. В конечном счете последнее и является главным. Однако личный опыт автора убеждает (по крайней мере, самого автора) в другом: если не придерживаться строго определенного направления заключительного движения ключа для всех вирбелей, то настройка получается нестабильной и через некоторое время «расползается».

А вот как выглядит комбинированный прием Г. К. Богино, применяемый в тех случаях, когда вирбель имеет плотную посадку: сначала вирбель изгибают слегка в сторону струн, при нормальном положении ключа в рояле это происходит в момент опускания к струнам ручки ключа, а в пианино ручку в верхнем положении необходимо наклонить к себе. Почти одновременно с наклоном вирбель поворачивают на небольшой угол в сторону завышения. Затем направление изгиба вирбеля изменяют на противоположное, повышая частоту струны. Такое комбинированное движение повторяют несколько раз. Преимущество последнего приема, а также приема вращения ключа с вибрацией руки заключается в возможности малых, еле уловимых сдвигов вирбеля, обеспечивающих примерно в два раза бо́льшую точность настройки по сравнению с обычными приемами. Кроме того, указанные приемы щадят инструмент: гнездо вирбеля расшатывается меньше, когда вирбель движется микрошагами (небольшими сдвигами) к своему нужному положению, чем тогда, когда настройка получается после многократных макроперегонов (поворотов) вирбеля около этого положения.

Надо сказать, что вращение вирбелей ослабляет их посадку, поэтому любое бесцельное многократное проворачивание их недопустимо. Так, в новом вирбельбанке после пяти поворотов прочность посадки вирбелей снижалась на 30—50%.

Работу ключом производят с одновременным слуховым контролем результатов изменения высоты струн. Здесь нужна определенная координация следующих процессов: удара по клавише, слухового контроля биений и движения ключа. Бессмысленно делать движение ключа без слухового контроля, а слуховой контроль без удара по клавише, поэтому удар и должен быть первым в операции настройки.

Обычно после удара следует слуховой контроль и лишь затем работа ключом. В басовых и теноровых струнах длительность звучания достаточна для того, чтобы за время одного удара несколько раз поочередно подстраивать струну и в промежутках между поворотами вирбеля подключать слуховой контроль. Чем точнее настроены струны в унисон и октаву, тем реже поворачивают вирбель. По достижении почти точной настройки струны, когда в унисоне и октаве необходимо выждать одно биение за 8—10 с (или за 2—4 с), используется только один удар, одно движение ключом; остальное время занимает слуховой контроль. В дискантовом регистре из-за быстрого затухания струн вся настройка представляет собой чередования удара, контроля и движения ключом. Иногда рекомендуется после уяснения характера биений в интервале производить удар по клавише и движение ключом почти одновременно и затем контролировать изменение биений в интервале. Вообще говоря, такая последовательность достаточно целесообразна, во-первых, потому, что вибрации струны облегчают перемещение ее на опорах, как бы уменьшая трение, а во-вторых, настройка по биениям при малых амплитудах колебаний обеспечивает относительно меньшую растянутость октав, о чем говорилось раньше. Однако такая последовательность не во всех случаях возможна. Так, в случае заметно негармоничных струн, колеблющихся с биениями, бесполезно вслушиваться в затухающие колебания — биения в них в любом случае остаются. Негармоничные струны с заметными биениями лучше настраивать со слуховым контролем по максимальной громкости и только потом поворачивать ключ.

Заканчивать настройку струны рекомендуется проверкой ее устойчивости. Для этого надо достаточно сильно два-три раза ударить по клавише и вслушаться в биения. Если вирбель был поставлен в устойчивое положение, то частота биений останется в пределах, допустимых для данной ноты и данного интервала, и настройку можно считать стабильной. В противном случае настройку придется повторить. Вторая возможность проверки устойчивости струны заключается в проверке положения вирбеля легкими толчками по ручке ключа, направленными перпендикулярно плоскости вращения вирбеля. Слабые изгибающие усилия способствуют выявлению тех струн и вирбелей, положение которых после настройки стало неустойчивым. Кстати, такой способ проверки находится в противоречии с одним из требований, которое встречается в литературе: снимай ключ с колка осторожно, чтобы не сбить полученную настройку. На наш взгляд, это требование исключает какую-либо проверку устойчивости струны. Действительно, если вирбель при малейшем касании к нему способен изменить строй струны, то уж лучше на этой струне не играть, поскольку при сильном ударе по клавише расстройка неизбежно произойдет. Конечно, грубых и больших усилий при снятии ключа не должно быть и в этом смысле можно говорить об осторожности, которая вообще должна сопровождать в разумных пределах всю работу настройщика с инструментом.

Все сказанное выше относилось к работе правой руки, за исклю-

чением того, что левой руке отводилась задача звукоизвлечения. Но левая рука при настройке выполняет не такую уж простую работу, как удар по клавише. Роль левой руки настолько существенна, что ее работа может оказать влияние на характер настройки клавишного инструмента.

Прежде всего влияние левой руки проявляется через силу удара по клавишам, которую настройщик может варьировать в соответствии с необходимостью. Мы уже говорили раньше о том, что при различной силе удара, применяемой при настройке одного и того же инструмента, можно управлять в некоторой степени величиной расширения октав. Выбором силы удара по клавишам при настройке интервалов можно регулировать в небольших пределах четкость биений, их слышимость. Напомним, что биения наиболее заметны тогда, когда амплитуды близких по частоте звуков равны. При одинаковой силе удара по клавишам в каком-либо интервале совпадающие гармоники, между которыми образуются биения, в большинстве случаев не равны (по амплитуде). При большой разнице амплитуд биения слышны плохо. В теории музыкальной акустики это доказывается элементарно. Обычно амплитуды гармоник уменьшаются от басовых струн к дискантовым, исключая только несколько иную закономерность у самых крайних басовых струн, энергия первых гармоник которых незначительна. Как правило, совпадающая гармоника верхнего звука интервала будет меньше по амплитуде, чем соответствующая гармоника нижнего звука. Отсюда следует, что клавишу верхнего тона интервала надо ударять несколько сильнее, чем нижнюю, или сначала ударить клавишу нижнего тона, а потом верхнего. Тогда за небольшой промежуток времени амплитуда гармоники у нижнего тона уменьшится естественным путем и равенство амплитуд совпадающих гармоник будет точнее.

Но может случиться так, что общая закономерность распределения энергии гармоник для отдельных интервалов нарушена. В каких-то интервалах более сильной окажется гармоника верхнего звука, тогда сила удара по клавише нижнего тона должна быть больше. Конечно, соотношение амплитуд гармоник заранее неизвестно. И в том случае, когда амплитуды разнятся незначительно и, следовательно, биения слышны вполне удовлетворительно, нет необходимости с разной силой ударять по клавишам. Но вот встретился интервал, который обычно дает хорошо слышимые биения, но в данном конкретном инструменте этот интервал имеет едва улавливаемые биения. Тут надо попытаться улучшить слышимость биений подбором различных соотношений силы удара по клавишам интервала.

Силу удара следует также учитывать при проверке качества настройки последовательностями одноименных интервалов. Целесообразно прослушать такие ряды интервалов сначала при слабых и потом при сильных ударах, не меняя силу удара в одной последовательности. Интересно заметить при этом, насколько отличается характер интервалов при сильных и слабых ударах.

Сильные удары по клавишам нужны в настройке струн с повышенной негармоничностью, проявляющейся в биениях. Слабые удары

часто применяют в настройке басовых струн, поскольку амплитуды первых гармоник в них малы, а слабый удар позволяет относительно меньше возбуждать высокие гармоники, то есть как бы улучшать слышимость первых двух гармоник, необходимых при настройке октавы.

Частота ударов при настройке различна в разных регистрах: в басах удары по клавишам реже, в дискантах — чаще, чем в тенорах. Такое различие связано только с разной продолжительностью звучания струн в этих регистрах.

Нам осталось теперь рассмотреть последовательность настройки струн и регистров и перемещение клинков для глушения ненастраиваемых в хоре струн.

Последовательность настройки регистров в практике установлена следующая: 1) настройка области темперирования, 2) настройка басового регистра, 3) настройка дискантового регистра.

Такая очередность имеет свое обоснование. Средний участок звукоряда, в котором находится область темперирования, наиболее чувствителен для слуха, его проще настраивать технически; малейшие изменения частоты струн хорошо обнаруживаются по биениям, и повороты вирбелей достаточно велики, чтобы иметь возможность точной установки частоты. Струны басового регистра натягиваются каждая на 20—50% больше струн тенорового регистра и еще больше, чем струны дискантового регистра. Их общее суммарное натяжение существенно влияет на деформацию опорных конструкций. Поэтому если басовые струны настраивать после дискантовых, то деформация чугунной рамы собьет настройку дискантовых струн. Влияние же настройки дискантовых струн на настройку теноровых и басовых практически малозаметно. Однако есть одно исключение: настройку после непосредственной накладки струн в процессе производства или после ремонта производят в другом порядке — область темперирования, дискант, басы. Дело в том, что после первой цвиковки (грубой настройки) дискантовые струны сильно расстраиваются, садятся из-за резкой деформации опорных конструкций, обмятия петель струн, их релаксации и т. д. Поэтому порядок настройки струн на первой цвиковке не лимитируется соображениями сохранения натяжения дискантовых струн. Вторую цвиковку и последующие настройки выполняют в указанном выше порядке.

Последовательность настройки всех первых струн в области темперирования определяется выбранным планом настройки, а построение различных планов настройки и контроля было дано на с. 74—85. Поэтому здесь мы рассмотрим последовательность настройки струн в одном хоре и порядок их заглушения.

Начиная настройку хора *ля*[1] по камертону, мы сразу сталкиваемся с проблемой выбора струны в трехструнном хоре, которую необходимо настраивать в первую очередь. На первый взгляд неважно, какую из трех струн взять первой. С другой стороны, в известной книге Н. А. Дьяконова «Рояли и пианино» [31] рекомендуется прежде всего настраивать первую струну слева в хоре. Оба положения неправильны. Во-первых, для точности настройки выбор струны в хо-

ре небезразличен, а во-вторых, начинать настройку хоров с левых струн (в пианино) — значит выбирать нелучший вариант, так как левые струны хоров пианино закреплены на вирбелях, которые дальше отстоят от аграфа или клангштабика. Но чем больше нерабочая часть струны, тем при прочих равных условиях ее состояние неустойчивее, поскольку бóльшая деформация является предпосылкой большей нестабильности строя. Поэтому первой нужно настраивать струну, вирбель которой ближе расположен к отсечке струны на клангштабике или аграфе. А левой или правой она будет — это зависит от конструкции клавишного инструмента. Ниже мы приведем и другие соображения в пользу начала настройки хора со струны с коротким нерабочим участком у вирбеля.

Выбрав первую струну для настройки (в пианино это будет правая струна каждого хора), мы должны теперь заглушить остальные струны этого хора. Минимальное количество клинков, необходимое для настройки интервалов в области темперирования, равно двум. В процессе настройки новых хоров клинки непрерывно переставляются, на что тратится время. Лучше иметь сразу 13 клинков, вставляемых перед началом работы между второй и третьей струнами каждого хора. В этом случае все струны хоров области темперирования останутся свободными для настройки и не потребуется дополнительного времени на перестановку клинков. Вместо резиновых клинков, которые, кстати, могут быть причиной коррозии струн из-за содержания в резине серы, лучше использовать деревянные клинки, оклеенные замшей.

Интересен способ заглушения струн, применяемый американскими настройщиками [30]: длинную полоску войлока или фетра, смотанную в рулон, держат левой рукой, а отверткой в правой руке вталкивают полоску между струнами. При достаточной толщине войлока полоску можно вставить между струнами разных хоров, так что свободными останутся средние струны. После заглушения тем или иным способом двух струн хора *ля*^{1} свободную струну настраивают по камертону в унисон до полного исключения биений в течение слышимого звучания камертона и струны, то есть в течение примерно 10 с.

За первой струной можно настроить либо остальные струны хора, либо струны хора октавой ниже. Целесообразнее произвести настройку всех первых струн в области темперирования и только потом подстроить вторые и третьи струны хоров. Целесообразность такой последовательности заключается в том, что по одним первым струнам легче достичь необходимой точности настройки. Кроме того, с первого раза не всегда удается получить замкнутый квинтово-квартовый круг: неизбежно возникают и накапливаются ошибки. Поэтому одновременная настройка унисонов только удлинит всю работу; справившись же с темперацией на первых струнах хоров, можно быстро и точно настроить в унисон остальные струны этих хоров.

В хоре, две струны которого заглушались клинком, первый унисон настраивают, устанавливая клинок между третьей струной

настраиваемого хора и ближайшей к ней струной соседнего хора. На вирбель второй струны надевают ключ и натягивают ее до исчезновения биений при одновременном звучании с первой струной. Затем клинок освобождают от соприкосновения с третьей струной и настраивают ее в унисон с первыми двумя.

Выше уже приводились экспериментальные данные субъективного восприятия унисонов с различной степенью точности настройки. В музыкальном отношении в области темперирования лучше всего звучат унисоны с расстройкой 1,6—1,7 цента, то есть 1 биение за 2—4 с. По некоторым другим литературным источникам [31, 32, 33, 34] считается правильной настройка унисона с одним биением за 10—12 с.

Выбор той или иной точности настройки унисонов диктуется, во-первых, местонахождением унисона по диапазону: в среднем регистре унисоны настраивают точнее, чем в нижнем и верхнем регистрах. В дискант погрешность настройки может достигать нескольких биений в с. Во-вторых, точность зависит от вкуса настройщика и музыканта: кто-то любит чуть оживленный биениями унисон, кто-то этого не принимает.

Спорной, как говорилось, является и настройка октав: наряду со множеством мнений признанных авторитетов о том, что октавы должны настраиваться чисто, без биений, встречаются и мнения не менее признанных авторитетов, отстаивающих, по крайней мере в некоторых случаях, настройку октав с небольшими, вернее, редкими биениями в сторону расширения октав, хотя октавы и при настройке без биений получаются расширенными, как мы выяснили ранее. Если исполнитель не предъявляет особых требований к настройке, октавы следует настраивать без биений.

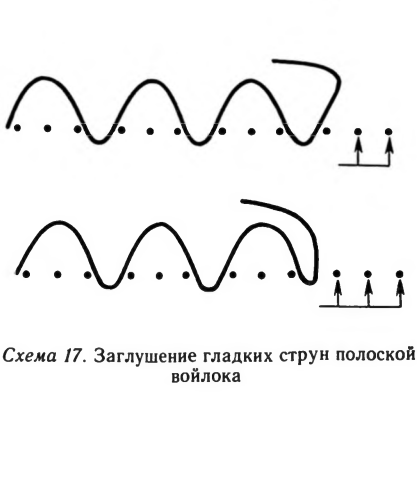


Схема 17. Заглушение гладких струн полоской войлока

Клинки, вставленные между струнами хоров при настройке области темперирования, постепенно вынимают, если их число равнялось числу хоров. Оперирование же только двумя клинками требует, как уже говорилось, большей затраты времени на их перестановку. Заглушение войлочной полоской представляет то преимущество, что по мере настройки струн эту полоску просто вынимают, постепенно освобождая новые струны (схема 17).

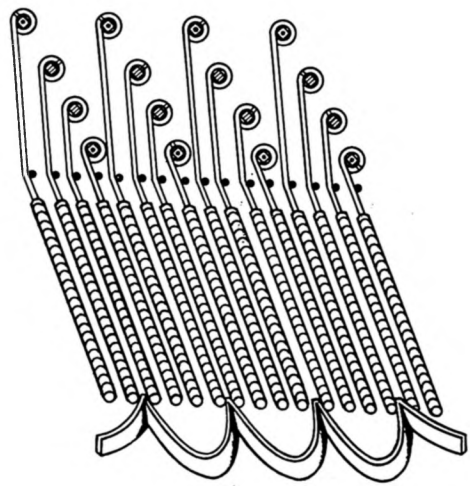


Схема 18. Заглушение обвитых струн полоской войлока

Очень удобно использовать войлочную полоску для настройки двухструнных хоров басового регистра (схема 18). В первом двухструнном хоре оставляют свободной правую струну и заглушают левую. Первая складка войлока будет глушить левую струну первого хора и правую струну второго хора. Затем полоска вставляется через четыре обвитых струны, так что останутся свободными левая струна второго хора и правая струна третьего. Еще через четыре струны новая следующая складка оставит свободной левую струну четвертого хора и правую струну пятого хора и т. д. В результате останутся незаглушенными только те струны, вирбели которых расположены в первом ряду, то есть непосредственно у штифтов басового клангштабика и струны, вирбели которых расположены в четвертом ряду. В середине же будут находиться два ряда вирбелей заглушенных струн. Таким образом, в каждом хоре после заглушения останется свободной только одна струна: правая первого хора, левая второго, правая третьего, левая четвертого, правая пятого, левая шестого и т. д. Дальнейшую настройку октав производят без

каких-либо операций заглушения — так, как будто в хоре одна струна. Перестановка ключа также требует особого внимания, так как ключ надо будет ставить поочередно то на вирбель нижнего ряда, то на вирбель верхнего. Настроив по одной струне в каждом хоре этой части басового регистра, вынимают полоску войлока и настраивают вторые струны, помня только, что ключ надо ставить поочередно на вирбели второго и третьего рядов. В зависимости от конкретного размещения вирбелей двухструнных хоров может оказаться возможной первоочередная настройка струн, соответствующих вирбелям второго и третьего рядов.

Настройку басового регистра заканчивают настройкой одинарных, самых низких обвитых струн, для которых не нужны клинки.

Порядок заглушения и настройки струн дискантового регистра в принципе не отличается от порядка работы со струнами среднего (тенорового) регистра, но для заглушения применяют деревянные с замшей клинки в виде длинных (примерно с карандаш) стержней с вилочкой на одном конце и с лопаточкой на другом, которые удобно просовывать между гаммерштилями, и либо обхватывать вилочкой одну струну, либо вставлять лопаточку, заглушая сразу две струны.

Басовые струны рояля позволяют осуществлять один вид настройки, в принципе возможный, но неудобный для пианино. Это — настройка по флажолетам. Заглушение струны на середине ее рабочей части удаляет из спектра звучания первую гармонику и облегчает настройку по второй гармонике. Поэтому, найдя линию, на которой лежат точки деления струны на две равные части, можно для облегчения настройки басового регистра проложить войлочную полоску между струнами по этой линии.

Нижний регистр рояля, и особенно пианино, трудно настраивать по двум причинам: ухо малочувствительно к низким частотам, и амплитуды первых гармоник басовых тонов незначительны. Кроме того, из-за большого количества гармоник в басовых тонах (до сорока) и их негармоничности при настройке октав отчетливо слышатся несколько биений разных частот. Настройщик устраняет биения между одной парой гармоник, а они становятся более частыми у другой пары. Правильной настройке басовых струн способствует внимательное вслушивание в характер звучания октавных интервалов, контроль изменений в тембре настраиваемой октавы. Поясним это на примере несколько неожиданной аналогии.

Многим приходилось наблюдать работу какого-либо механизма с двигателем. Плавно работающая при нормальных условиях машина начинает обычно издавать характерное громыхание, похожее на резкий звук *р-р-р,* если частота вращения двигателя приближается к резонансной частоте корпуса машины. Что-то подобное можно обнаружить при настройке басов: правильно настроенная октава в этом регистре издает своеобразное «рычание», особенно заметное при точной настройке октавы.

Надо сказать, что тембр других интервалов также различен в зависимости от того, насколько они точно настроены. Опытные мас-

тера в своей работе руководствуются не только числом биений, но и тембром созвучия. Это позволяет точнее и быстрее настраивать интервалы. Начинающему настройщику необходимо стремиться запомнить тембр звучания настроенных интервалов в различных октавах, чтобы достичь настоящего профессионального мастерства.

Если инструмент давно не настраивался и потребовалось повышение строя, то неизбежно потребуется и повторение корректировки интервалов. При настройке с поднятием строя после первой настройки необходимо сделать перерыв в один-два дня, после чего повторить работу. Существенное повышение строя инструмента старой конструкции следует вести осторожно, в два-три этапа с промежуточной выдержкой до 5—7 дней.

В некоторых случаях общий порядок настройки целесообразно изменить и применить так называемую секционную настройку [35]. Ее используют тогда, когда фортепиано долгое время не настраивалось, когда строй сильно завышен или, наоборот, занижен, а также в том случае, если инструмент новый, в котором еще заметны процессы релаксации струн и опорных конструкций. Сущность секционной настройки заключается в следующем. Настраивают, как обычно, область темперирования на стандартную высоту по камертону. Дальше идет настройка по всему диапазону секциями.

Первая секция: *до — ми — соль-диез.* В первом шаге настраивают октавами все тона *до* сначала вниз от зоны темперирования (т. е. к басам), потом все тона *до* вверх; в той же последовательности настраивают все тона *ми*, потом и все тона *соль-диез.* В первой секции при пониженном строе фортепиано делают небольшое завышение в каждой октаве на одно-два биения в сравнении со стандартной высотой.

Вторая секция: *ре — фа-диез — ля-диез.* Третья секция: *до-диез — фа — ля.* Четвертая секция: *ре-диез — соль — си.* Последовательность октавных настроек в этих секциях такая же, как и в первой секции. Настраивать рекомендуется с первого же раза возможно точнее. Так как в секционной настройке неизбежно накопление ошибок, то в заключение необходима и чистовая настройка. Выгода секционной настройки в том, что при обычной затрате времени на настройку (час или два) получим долговременую стабильность настройки. При обычном же порядке настройки тех инструментов, о которых говорилось выше, повторная настройка потребуется уже через несколько дней.

Нечто подобное упрощенной секционной настройке используют и наши настройщики. Предварительно в каждом хоре одна струна резко завышается (перетягивается) без точной ее настройки. Увеличение натяжения всех струн происходит более или менее равномерно по всему диапазону, после чего подъем остальных струн в хорах уже не будет вызывать резких перераспределений напряжений в опорных конструкциях — чугунной и деревянной рамах и связанной с этим нестабильности настройки. В некоторых роялях в хорах среднего и верхнего регистров имеются четвертые аликвотные струны, резонирующие на колебания струн основных хоров.

Настройку аликвотных струн среднего регистра ведут после выполнения основной настройки, настраивая их на октаву выше.

В верхнем регистре аликвотные струны настраивают в унисон с основным хором. Колебания аликвотных струн возбуждают защипыванием медиатором.

2. Настройка язычковых инструментов

Частота колебаний язычка в некоторой степени зависит от силы воздушного потока, действующего на язычок. В тех пределах, в которых изменяется давление воздуха в меховой камере инструмента, часто́ты язычков могут изменяться до 12 центов, точность же настройки, которой достигают квалифицированные мастера,— единицы центов. Поэтому язычковые инструменты настраивают при строго постоянном давлении воздуха, близком к нормальному среднему давлению воздуха в меховой камере инструмента, соответствующему средней громкости звучания.

Минимальная разница в давлении воздуха по обе стороны язычка, при которой в нем могут возбудиться колебания, так называемый порог возбуждения язычка, равен в среднем 4—25 мм вод. ст.* и увеличивается от низких нот к высоким [36].

Минимальность порогов возбуждения — один из показателей высоких звуковых качеств язычковых инструментов. Различие порогов возбуждения соседних тонов не должно быть заметно на слух.

Слишком высокое давление воздуха на язычок приводит к срыву его колебаний. В хороших инструментах порог срыва колебаний составляет 210—250 мм вод. ст.

Настройка при средней величине давления воздуха в камере приводит к тому, что при достижении пороговых значений давлений частота колебаний язычка будет отклоняться от среднего значения на 1—1,5 Гц. Общая величина изменения частоты язычка при изменении давления воздуха от порога возбуждения до порога срыва колебаний — показатель стабильности строя.

Высотное положение области темперирования в язычковом инструменте несколько иное, чем в фортепиано,— обычно это октава *ми*^{1} — *ми*^{2}.

Это объясняется тем, что октава *ми*^{1} — *ми*^{2} находится практически посредине диапазона мелодии язычкового инструмента, в ней хорошо прослушиваются биения в настраиваемых квинтах и квартах. Принципы построения планов настройки такие же, как описанные нами ранее для фортепиано.

Общее количество настроек язычкового инструмента меньше, чем у фортепиано. Различают черновую настройку язычков с точностью примерно $^1/_2$ полутона, предварительную настройку голосовых

* Миллиметр водяного столба (мм. вод. ст.) — единица давления, применяемая в технике.

планок с точностью $^1/_{12}$ — $^1/_{16}$ полутона и окончательную настройку голосовых планок уже в корпусе инструмента с точностью $^1/_{32}$ полутона.

Устанавливают частоту язычка механической шлифовкой слоя металла в различных местах по длине язычка. В любом случае снятие слоя металла (на предварительной настройке — от 20 до 200 мкм*, на окончательной — от 10 до 80 мкм) у свободного конца язычка повышает частоту его собственных колебаний, а снятие слоя металла у закрепленного конца понижает ее. Частота колебаний любой системы пропорциональна корню квадратному из отношения жесткости системы к ее колеблющейся массе. Поэтому при шлифовке металла язычка частота изменяется в зависимости от того параметра, который больше изменился в результате данной операции.

При шлифовке в любом месте язычка одновременно меняются и его масса, и жесткость. Однако степень этого изменения различна в зависимости от места обработки. Обработка основания язычка уменьшает отношение жесткости к массе, так как изменяет жесткость в большей степени, чем массу. Поэтому при такой обработке частота колебаний язычка уменьшается. Аналогично рассуждая, легко понять, что при обработке вершины язычка частота его собственных колебаний увеличивается.

Инструмент для настройки язычков несложен. Это шаберы круглого сечения, надфили (с мелкой бархатной насечкой), тонкая стальная пластинка-подголосник (иногда называемая голосником, стройником), поддерживающая язычок при его обработке, крючки для подъема внутренних язычков. Иногда могут понадобиться наковальня, молоток, плоскогубцы, нож и ножницы. На предварительной настройке, когда снимается достаточно толстый слой металла, применяется абразивный круг, приводимый в движение небольшим электродвигателем с помощью гибкого вала. В фабричных условиях настройку производят в специальной заглушенной кабине, которая оборудована воздуходувкой — устройством для создания необходимого перепада давлений воздуха по обе стороны язычка (за счет разрежения воздуха). Стол воздуходувки снабжен специальным приспособлением для зажима голосовой планки. Установив голосовую планку, ее сначала возбуждают щипком с помощью подголосника. Предварительную настройку производят в унисон по контрольным (эталонным) язычкам.

При подкладывании подголосника под внутренний язычок надо следить за тем, чтобы язычок не заклинивался и не деформировался.

Высота звучания язычка изменяется в процессе его механической обработки, которая создает в теле язычка напряжения. Их релаксация приводит к последующему изменению жесткости в месте крепления язычка и, как следствие, к изменению высоты звука. При обработке язычок нагревается, и в процессе остывания в нем также изменяются напряжение и высота звука. В результате явлений

* Микрометр: 1 мкм = 10^{-3} мм.

релаксации звук, издаваемый язычком, повышается довольно быстро после окончания его настройки; для разных язычков это повышение различно [36].

Приклейка лайки вызывает противоположное изменение частоты — понижение звука. Эта операция в какой-то мере компенсирует завышение звука, вызываемое релаксацией механических напряжений. Точную настройку проводят уже после приклейки лайки.

Если настройку язычков производят по слуху, то пользуются контролем частоты биений, которая для настроенных интервалов та же, что и для фортепиано.

В настоящее время существуют специальные приборы, которые существенно облегчают процесс предварительной настройки в производственных условиях. В этом случае часто́ты язычков сравниваются с эталонными частотами, вырабатываемыми электронным генератором, а контроль степени настройки осуществляется визуально по экрану электронно-лучевой трубки.

На высоту тона язычков влияют резонаторы и корпус инструмента, поэтому окончательная, чистовая настройка производится только в корпусе того инструмента, в котором будут установлены данные резонаторы. Необходимо здесь проверить состояние и качество приклейки лайковых клапанов на планках, влияющих на настройку.

На точность настройки язычка на голосовой планке влияет даже плотность установки планки на резонаторе и надежность герметизации планки по периметру канифольно-восковой мастикой. При неплотной установке и разгерметизации планка сама начинает вибрировать вместе с язычком, давая биения в звуке. Инструмент и оборудование, применяемые при окончательной настройке, в принципе не отличаются от инструментов для предварительной настройки, но метод настройки в большинстве случаев слуховой, по биениям, который пока позволяет достичь большей точности.

Трудностью в настройке квинт и кварт в клавишных и язычковых инструментах является определение направления темперации: одно биение в квинте может быть и в сторону сужения и в сторону расширения интервала. В клавишном инструменте направление темперации устанавливают, сопоставляя направление вращения ключа и частоты биений. Установление направления темпераций язычка путем его перестройки — методом проб и ошибок — вредно для него, так как приводит к необратимому уменьшению его массы и жесткости, что, в свою очередь, ухудшает звуковые качества язычка. Поэтому здесь иная методика определения направления темперации [36].

Основание язычка плотно зажимается каким-либо металлическим ребром, при этом повышается жесткость язычка, а его собственная частота увеличивается. Допустим, мы проверяем нижний язычок интервала, направление темперации которого должны определить. Прижатие основания повышает частоту нижнего звука, и это повышение либо увеличивает число биений в данном интервале, либо уменьшает. Увеличение числа биений говорит о том, что интервал

был настроен в зоне сужения интервала, уменьшение числа биений — о том, что интервал был настроен в зоне расширения.

В многоголосых инструментах (современные аккордеоны и баяны) область темперирования настраивают по какой-либо одной паре язычков на сжим и разжим меха. Язычки на других голосовых планках закрывают пластинкой с мягкой прокладкой (например, лайкой).

Планки области темперирования, оставшиеся открытыми, называют строевыми. После настройки области темперирования настраивают все остальные строевые планки, находящиеся в том же ряду. Дальнейший порядок настройки планок мелодии и аккомпанемента может быть выбран следующий [37]:

язычки басовой части большой октавы (октавными интервалами по язычкам мелодии, принятым за строевые);

язычки басовой части малой октавы (октавными интервалами по язычкам большой октавы баса);

язычки контроктавы (октавными интервалами по язычкам большой октавы баса);

язычки первой октавы аккомпанемента (в унисон с язычками мелодии);

язычки малой октавы аккомпанемента (в октаву с язычками первой октавы аккомпанемента);

язычки нестроевых планок мелодии (в унисон с язычками строевых планок мелодии).

В многоголосых инструментах третьи и четвертые ряды язычков настраивают в октаву и в розлив с язычками строевых планок, возможен также и пятый ряд язычков, который настраивают на октаву выше.

Опиливание язычков в процессе настройки требует высокой тщательности и аккуратности. Поспешность приводит к многократному снятию слоя металла то у основания, то у вершины. Многократное подпиливание язычка ухудшает его свойства: снижается стабильность частоты при изменении воздушного давления, понижается порог срыва колебаний, уменьшается громкость, ухудшается тембр — он становится гнусавым, неглубоким. Единственное улучшение — понижение порога возбуждения — не оправдывается на фоне прочих нежелательных изменений звуковых свойств.

Бывают язычки другого рода — слишком жесткие. Недостатки таких язычков: повышенный порог возбуждения, необходимость большого расхода воздуха, громкий, крикливый тембр.

Качество настройки язычкового инструмента необходимо постоянно контролировать. Каждый вновь настраиваемый ряд голосовых планок нужно проверять по возможно большему числу ранее настроенных рядов интервалами в унисон и октаву. Требуется обязательная сверка язычков мелодии, баса и аккомпанемента. Целесообразно проверить последовательность одноименных интервалов и обратить внимание на равномерность изменения частоты биений в соседних интервалах. Если инструмент имеет розлив, то его тембральная окраска также должна равномерно изменяться от тона

к тону. Заканчивают проверку строя контролем правильности звучания аккордов в мелодии и басах, а также проверкой одновременно звучащих аккордов мелодии и аккомпанемента. Существенный момент проверки настройки: окончательный контроль должен выполняться не реже, чем через сутки после последней настройки, то есть когда будет практически закончен процесс релаксации механических напряжений и строй станет устойчивым.

3. Настройка щипковых и смычковых струнных инструментов

Рассмотрим настройку наиболее распространенных щипковых и смычковых инструментов. В отличие от фортепиано, здесь не нужно настраивать каждый отдельный звук диапазона инструмента, необходимо настроить только открытые струны, а остальные звуки при правильной разбивке ладов и точной установке подставки получают правильную настройку автоматически. Метод контроля биений при настройке интервалов, рассмотренный ранее, полностью применим к щипковым и смычковым инструментам. Для настройки щипковых инструментов, как правило, используют унисоны, а для смычковых — кварты, квинты. Отметим следующую особенность настройки струнных инструментов: в смычковых интервалы между звуками отдельных открытых струн (большая терция, квинта или кварта) являются чистыми, то есть настраиваются без биений. В щипковых инструментах, у которых на грифе имеются лады, их положение определяют в соответствии с темперированной шкалой частот. В смычковых инструментах звуки закрытых (прижатых) струн можно брать либо ближе к чистому строю, либо к темперированному — в зависимости от сольного или ансамблевого исполнения.

Настройка щипкового (или смычкового) инструмента должна начинаться с установки или проверки положения подставки на деке. Так как струна, прижатая на 12-м ладу, должна давать звук октавой выше открытой струны, то теоретически на 12-м ладу длина рабочей части струны должна делиться пополам. Но, прижимая струну к грифу, мы натягиваем ее и тем самым вызываем дополнительное повышение звука, которое можно компенсировать, дополнительно увеличив длину струны за счет удаления подставки от порожка. Чтобы это удаление не было слишком большим, струны стараются располагать как можно ближе к грифу. Техническими нормами предусматривается следующее расстояние от струны до ладовых пластин у 1-го и 12-го ладов [38]: в гитаре — 0,8 и 3,5 мм; в балалайке — 0,7 и 3 мм; в мандолине — 0,7 и 2,5 мм соответственно.

Подчеркнем здесь необходимость правильной установки струн по высоте над грифом, поскольку от этого параметра также зависит правильность строя струнных инструментов.

Обычно расстояние от порожка до подставки должно равняться удвоенному расстоянию от порожка до ладовой пластины 12-го лада

плюс примерно 2,5—3 мм в гитаре, 1,5 мм в мандолине и 1,5—2 мм в балалайке. Тщательная настройка требует индивидуальной регулировки положения подставки в каждом инструменте. Поскольку толстые струны больше повышают звучание при прижатии, басовый край подставки дальше от порожка, чем дискантовый. Расположение подставки на инструменте должно быть таким, чтобы обеспечивалась чистота настройки унисона, октав, квинт и кварт, взятых на разных струнах; обычно достаточно убедиться в правильности настройки унисонов и октав. Если октавы получаются с биениями, необходимо проверить и уточнить положение подставки.

Правильность установки подставки и правильность октавы 12-го лада можно проверить сравнением тона открытой струны и флажолетного тона, получаемого прикосновением пальца к струне над 12-м ладом. Если флажолетная октава завышена, то подставку сдвигают в сторону резонаторного отверстия; если же флажолетная октава занижена, по сравнению с тоном открытой струны, то подставку отодвигают от резонаторного отверстия. И в том и в другом случае корректируется высота тона открытой струны.
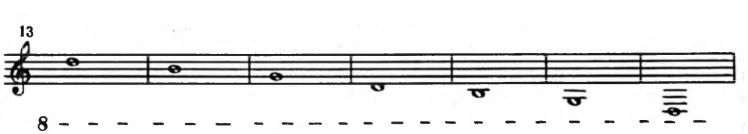
Правильность установки подставки несколько под углом к струнам при увеличении длины басовых струн, сравнительно с дискантовыми гладкими струнами, в гитарах должна обеспечиваться в производственных условиях (поскольку подставка гитары приклеивается), а положение подставок балалаек, домр, мандолин регулируется самим музыкантом в процессе настройки.

Ниже приведены планы настройки щипковых и смычковых инструментов. Цифры в таблицах (нижние 2 ряда) обозначают номера струн (первой считается самая тонкая струна) и номера ладов, на которых необходимо прижать струну, чтобы настроить ее в унисон с открытой струной, номер которой указан в верхнем ряду.

Гитара

Гитара семиструнная
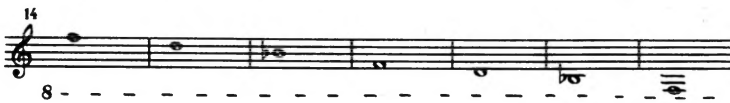
Частота камертона и номер открытой струны, по которым идет настройка в унисон		440 Гц	1	2	3	4	5	6
Струна, настраиваемая в унисон	Номер струны	1	2	3	4	5	6	7
	Номер лада	7	3	4	5	3	4	5



Строй гитары-примы семиструнной

Последовательность настройки других видов семиструнных гитар аналогична изложенной выше, за исключением того, что нота *ля*[1], настраиваемая по камертону, у терцовых гитар извлекается на четвертом ладу 1-й струны, у квартовых — на втором ладу 1-й струны и у квинтовых — на открытой 1-й струне.

14



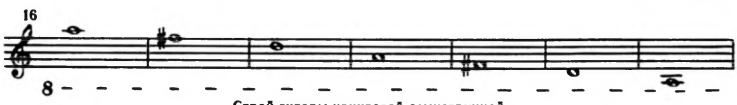
Строй гитары терцовой семиструнной

15



Строй гитары квартовой семиструнной

16
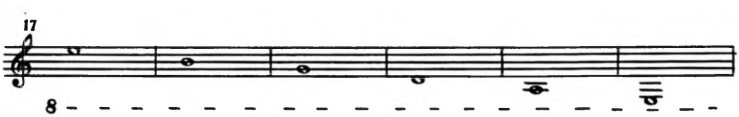


Строй гитары квинтовой семиструнной

Гитара шестиструнная
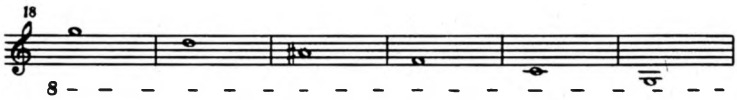
Частота камертона и номер открытой струны, по которым идет настройка в унисон		440 Гц	1	2	3	4	5
Струна, настраиваемая в унисон	Номер струны	1	2	3	4	5	6
	Номер лада	5	5	4	5	5	5

17
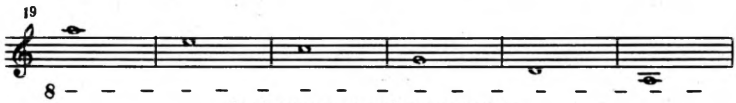


Строй гитары-примы шестиструнной

В других видах шестиструнных гитар нота *ля*[1] находится на втором ладу 1-й струны терцовой гитары, на открытой 1-й струне квартовой гитары, на третьем ладу 2-й струны квинтовой гитары и на пятом ладу 1-й струны гавайской гитары. Эти гитары имеют следующие строи:
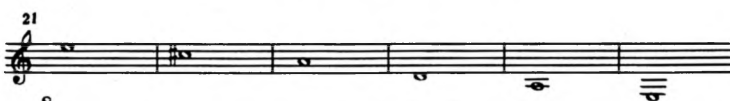


Строй гитары терцовой шестиструнной



Строй гитары квартовой шестиструнной



Строй гитары квинтовой шестиструнной
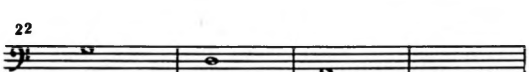


Строй гитары гавайской

Электрогитара-бас

В таблице для электрогитары-баса настройка первой струны производится либо в унисон по камертону с частотой 220 Гц, либо в октаву по камертону с частотой 440 Гц.

Частота камертона и номер открытой струны, по которым идет настройка в унисон		220 Гц (или октава от 440 Гц)	1	2	3
Струна, настраиваемая в унисон	Номер струны	1	2	3	4
	Номер лада	2	5	5	5



Строй электрогитары-баса

Гитара двенадцатиструнная

Гитара — один из таких инструментов, настройку струн которых можно варьировать по желанию самого гитариста для облегчения исполнения некоторых игровых приемов, для создания каких-либо

особых музыкальных эффектов. Это относится и к акустической, и к электрической гитаре, как для сольного, так и ансамблевого исполнительства. Для преодоления различных игровых затруднений музыканты применяют разные способы настройки струн.

Издавна распространена настройка шестиструнной и двенадцатиструнной гитары, основанная на квартовых интервалах между открытыми струнами. В двенадцатиструнной гитаре парные струны настраивают в октаву, исключая настройку в унисон двух тонких пар струн. Эта система настройки была распространена в конце XVIII столетия в Италии и Испании. В статье [39] описаны три разновидности систем настройки двенадцатиструнной гитары. Первая система настройки представлена на схеме 19. Ее особенность — четыре настроенные в унисон струны Ре. В этой системе можно настраивать и шестиструнную гитару, без октавных струн. Для такой настройки необходимы толстые струны, чтобы нижнее До сохранило свою глубокую окраску звука. Если применены тонкие струны, то гитару настраивают на целый тон выше, чем это показано на схеме 19,I. Как указывает автор статьи [39], первая система настройки в настоящее время используется редко, хотя некоторое время назад ее широко применяли многие гитаристы-профессионалы. Большое распространение получила другая система настройки (см. схему 19,II). Это так называемая мажорная настройка, применяемая в тех случаях, когда мелодию играют с установленным мажорным аккордом. Как интересный вариант 7-ю и 8-ю струны Ре можно перестроить на Фа. В целом данная система близка к нормальной настройке, и здесь не возникает проблемы подбора струн.

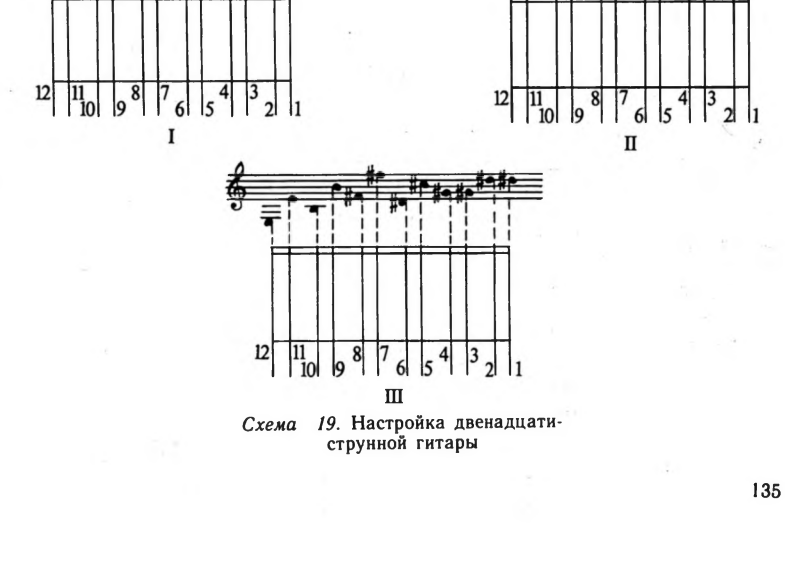


Схема 19. Настройка двенадцатиструнной гитары

Интересна настройка, базирующаяся на квинте (см. схему 19,III). Для достижения ровного звучания на место 5-й и 6-й струн ставят струны Ре, что обычно и делают в двенадцатиструнной гитаре, а на месте 3-й и 4-й струн может быть установлена струна Си. Третья система настройки обеспечивает оригинальное звучание инструмента.

Конечно, при любом изменении системы настройки изменяется техника игры, аппликатура аккордов, и музыкант должен привыкнуть к новой системе. Однако для творчески работающего музыканта новые системы настройки создают возможность повышения выразительности исполнения музыки благодаря необычности и оригинальности звучания инструмента.

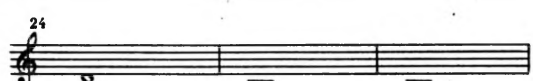
Балалайка

Частота камертона и номер открытой струны, по которым идет настройка в унисон		440 Гц	1	1
Струна, настраиваемая в унисон	Номер струны	1	2	3
	Номер лада	0	5	5



Строй балалайки-примы

Последовательность настройки других видов балалаек аналогична, исключая балалайку-бас и балалайку-контрабас. Нота *ля*[1] находится на 1-й струне на седьмом ладу в балалайке-секунде и на 1-й струне на двенадцатом ладу в балалайке-альте.

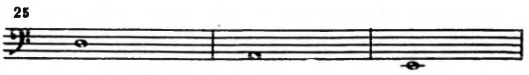


Строй балалайки-секунды

Строй балалайки-альта на октаву ниже строя балалайки-примы.

Балалайка-бас

Частота камертона и номер открытой струны, по которым идет настройка в унисон		220 Гц (или октава от 440 Гц)	1	2
Струна, настраиваемая в унисон	Номер струны	1	2	3
	Номер лада	7	5	5



Строй балалайки-баса
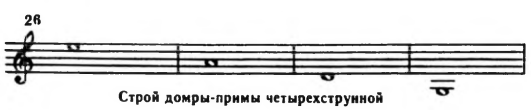
Строй балалайки-контрабаса на октаву ниже строя балалайки-баса.

Домра

Домра четырехструнная

У всех четырехструнных домр, кроме домры-контрабаса, открытые струны настраивают квинтовыми интервалами; струны контрабаса настраивают по квартам.
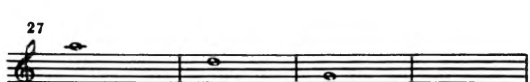
Частота камертона и номер открытой струны, по которым идет настройка в унисон		880 Гц (или октава выше 440 Гц)	1	2	3
Струна настраиваемая в унисон	Номер струны	1	2	3	4
	Номер лада	7	7	7	7



Строй домры-примы четырехструнной

Домру-приму можно начать настраивать и со 2-й струны в унисон по камертону с частотой 440 Гц, после чего подстроить 1-ю открытую струну в унисон со 2-й струной, прижатой на седьмом ладу. В любом случае сохраняется соответствие унисонов, указанных в таблице для домры-примы.

Аналогичны способы настроек и для других видов четырехструнных домр, кроме домры-контрабаса, но первые струны настраиваются по-разному: в домре-пикколо первая открытая струна звучит на октаву выше камертона с частотой 440 Гц, в домре-альте 1-я открытая струна звучит в унисон, в домре-теноре 1-я струна, прижатая на седьмом ладу, звучит в унисон с камертоном, и в домре-басе 1-я открытая струна звучит на октаву ниже камертона.



Строй домры-пикколо четырехструнной

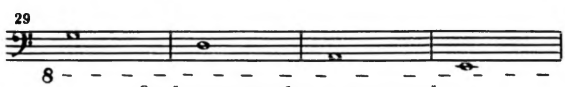


Строй домры-альта четырехструнной

Строй домры-тенора на октаву ниже строя домры-примы. Строй домры-баса на октаву ниже строя домры-альта.

Домра-контрабас

Частота камертона и номер открытой струны, по которым идет настройка в унисон		100 Гц (или на 2 октавы ниже 440 Гц)	1	2	3
Струна, настраиваемая в унисон	Номер струны	1	2	3	4
	Номер лада	2	5	5	5
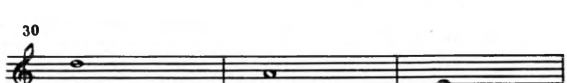


Строй домры-контрабаса четырехструнной

Домра трехструнная

У всех трехструнных домр открытые струны настраивают квартовыми интервалами.

Частота камертона и номер открытой струны, по которым идет настройка в унисон		880 Гц (или на октаву выше 440 Гц)	1	2
Струна, настраиваемая в унисон	Номер струны	1	2	3
	Номер лада	7	5	5



Строй домры-примы трехструнной

Домру-приму можно настраивать и со 2-й струны в унисон по камертону с частотой 440 Гц, после чего 1-ю открытую струну подстраивают в унисон со 2-й струной, прижатой на пятом ладу. Номера ладов и струн сохраняются действительными для других видов трехструнных домр. Различается только настройка первых струн: в домре-пикколо открытая струна звучит октавой выше камертона с частотой 440 Гц, в домре-альте 1-я струна, прижатая на седьмом ладу, звучит в унисон с камертоном, в домре-теноре 1-я открытая струна звучит на октаву ниже камертона, и в домре-басе 1-я струна, прижатая на седьмом ладу, звучит октавой ниже камертона.



Строй домры-пикколо трехструнной
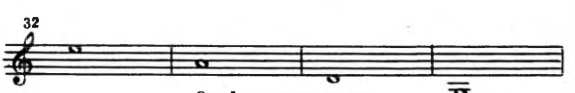
Строй домры-альта на октаву ниже строя домры-примы, строй домры-тенора на две октавы ниже строя домры-пикколо, а строй домры-баса на две октавы ниже строя домры-примы.

Мандолина

Интервалы между струнами мандолин — квинты, кроме мандолины-контрабаса, настраиваемой по квартам.
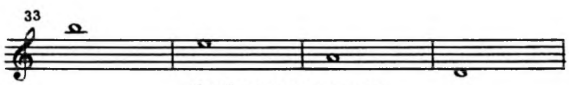
Частота камертона и номер открытой струны, по которым идет настройка в унисон		880 Гц (или на октаву выше 440 Гц)	1	2	3
Струна, настраиваемая в унисон	Номер струны	1	2	3	4
	Номер лада	7	7	7	7

Строй мандолины-примы



Строй мандолины-примы

Мандолину-приму можно начать настраивать и со 2-й струны в унисон по камертону с частотой 440 Гц, после чего настроить 1-ю струну в унисон со 2-й струной, прижатой на седьмом ладу. Номера ладов и струн, указанные для мандолины-примы, действительны и для мандолин других видов (кроме мандолины-контрабаса). В мандолине-пикколо по камертону с частотой 440 Гц настраивают третью струну, в мандолине-мандоле 1-я струна, прижатая на седьмом ладу, должна звучать в унисон с камертоном, в мандолине-люте 1-я открытая струна звучит на октаву ниже камертона.



Строй мандолины-пикколо



Строй мандолины-люты

Строй мандолины-мандолы на октаву ниже строя мандолины-примы. Мандолина-контрабас имеет строй, аналогичный строю четырехструнной домры-контрабаса.

Особенность мандолины (кроме мандолины-контрабаса) — парные струны, настраиваемые в унисон.

Перейдем к настройке смычковых инструментов, из группы которых возьмем самые распространенные.

Скрипка, альт, виолончель и контрабас

Скрипку, альт и виолончель настраивают по чистым квинтам, контрабас — по чистым квартам. Отсутствие ладов в этих инструментах не позволяет, как в щипковых, настраивать унисонами и октавами — наиболее легкими для настройки интервалами. Настроив одну из струн в унисон или октаву по камертону, музыкант настраивает квинту сначала мелодически, а уточняет настройку с помощью контроля частоты биений.
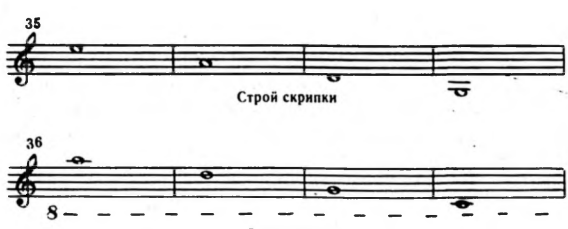
Вот как происходит процесс настройки струн скрипки. Так как обе руки скрипача при настройке заняты (левая рука держит корпус скрипки, большой палец левой руки защипывает струну, а правая рука вращает соответствующий колок до тех пор, пока струна Ля не будет настроена точно в камертон, то есть пока не исчезнут биения), лучше использовать постоянно звучащий камертон, например язычковый. Чтобы убедиться в правильности настройки, необходимо возбудить струну Ля смычком и на более продолжительном звучании выявить наличие биений. Вторым приемом обычно настраивают
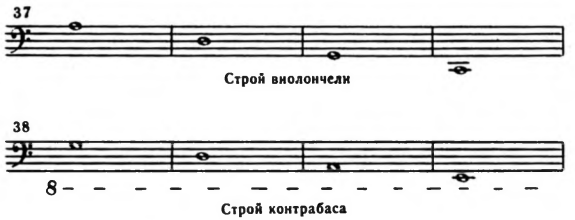
струну Ре. После мелодической настройки квинты переходят к одновременному возбуждению струн Ля и Ре, прислушиваясь к биениям и добиваясь их устранения. Окончательную проверку чистоты настройки квинты *ля*^{1} — *ре*^{1} делают, проводя смычком по струнам.

Аналогичным путем настраивают квинты *соль* — *ре*^{1} и *ля*^{1} — *ми*^{2}. Затруднения вызывает обычно настройка струны Ми, частота которой резко меняется даже от небольших сдвигов колка. Иногда для этой струны на скрипке имеется специальное настроечное приспособление с винтом, позволяющим очень тонко изменять натяжение струны. Это приспособление укрепляется на подгрифке.

В некоторых случаях струны скрипки, настроенные чистыми квинтами, дают неверные интервалы при обычных позициях пальцев на грифе. Причина здесь чаще всего заключается в самих струнах: они могут быть овальными в сечении, различаться по диаметру на разных концах и т. д. Чаще всего подобные дефекты имеют жильные струны, у которых узлы и пучности в процессе колебания струны смещаются в ту или другую сторону и при обычном положении пальца не дают правильной высоты ноты. Синтетические и металлические струны имеют меньше различных отклонений в распределении массы по длине струны и поэтому позволяют получать правильные интервалы в любых позициях левой руки.

Альт настраивают на квинту ниже скрипки, первая открытая струна соответствует ноте *ля*^{1} и настраивается по камертону. Виолончель звучит октавой ниже альта, и, следовательно, ее первую открытую струну настраивают на октаву ниже камертона с частотой 440 Гц. Часто́ты струн контрабаса находятся в контроктаве и большой октаве, то есть далеко от эталона частоты камертона. Контрабасисты облегчают процесс настройки своего инструмента тем, что пользуются флажолетами, получаемыми при легком прикосновении к струнам на $^1/_2$, $^1/_3$ и $^1/_4$ длины струны от подставки. Указанные точки деления дают октаву, квинту и двойную октаву от тона открытой струны соответственно. Получающиеся при этом делении флажолеты носят название октавного, квинтового и квартового флажолетов, поскольку именно эти интервалы образуются при нажатии струны в соответствующих местах [40]. Звук квартового флажолета третьей струны образует двойную октаву основного тона, то есть ноту *ля* малой октавы, которую и можно настраивать по камертону. Флажолеты контрабаса звучат отлично.





Как сказывается настройка открытых струн смычковых инструментов по чистым интервалам пифагорейского строя на интонации других интервалов? Следует сказать, что открытые струны создают высотный ориентир для остальных интервалов по всему диапазону инструмента, и исполнители придерживаются этого ориентира. Даже если скрипач должен темперировать интервалы в случае сопровождения фортепиано, необходимость учитывать настройку открытых струн оказывает свое влияние на интонирование тонов всего диапазона.

Арфа

Арфа относится к группе струнных щипковых инструментов. Она содержит 45—47 струн, настроенных диатонически в до-бемоль мажоре. Хроматические звуки также извлекаются на арфе, для чего имеется педальный механизм двойного действия, позволяющий повышать или понижать струны на полтона. Все струны До — красного цвета, все струны Фа — синего цвета. Цвет струн помогает арфистке ориентироваться при игре.. Диапазон арфы при 47 струнах: *до* контроктавы — *соль* четвертой октавы. Счет октав в арфе не совпадает с принятым для фортепиано. Самая верхняя октава — нулевая (2 струны), затем в нисходящем движении идут первая, вторая, третья, четвертая, пятая, шестая и седьмая октавы. Настраивают арфу чистыми квинтами, но при желании ее можно настроить по роялю. Один из планов настройки арфы может быть таким [41]: тон *ля* третьей октавы, соответствующий *ля*[1] на фортепианной клавиатуре, настраивается по камертону с частотой 440 Гц при положении педали Ля на первой «зарубке». Остальные тоны настраивают последовательностью интервалов: октава вниз — *ля*, квинта вверх — *ми*, еще квинта вверх — *си*, октава вниз — *си*; последний тон *си* перестраивается с помощью педали на *си-бемоль*, от которого берется квинта вверх — *фа*, еще квинта вверх — *до*, октава вниз — *до*, квинта вверх — *соль*, еще квинта вверх — *ре*, октава вниз — *ре*. Последним интервалом настраивается тон *ре*, который надо проверить по ранее настроенному тону *ля*. Все квинты и октавы настраивают чисто, и если в процессе настройки не было ошибок,

последний интервал также должен получиться чистым, без биений. Это схематично выглядит так:



План настройки арфы

От настроенной области интервалами в октаву и квинту настраивают струны нижнего и верхнего регистров. Контроль настройки арфы осуществляется в принципе так же, как и контроль настройки фортепиано: последовательностями одноименных интервалов — октав, квинт, больших терций, двойных октав, децим.

4. Точность строя и настройка духовых инструментов

Рассмотрим основные факторы, влияющие на музыкально-акустические свойства духового инструмента. Под такими свойствами для духовых инструментов следует прежде всего понимать точность строя, качество звука (тембр) и легкость звукоизвлечения. Весомость или значимость данных свойств у разных инструментов различна, но для духовых инструментов главный интерес представляет именно точность строя. Безукоризненная настройка — вот что требуется от высококачественного духового инструмента. Если для других видов музыкальных инструментов легко осуществить настройку каждого отдельного тона независимо от других тонов, то в настройке духовых инструментов, точность строя которых заложена конструкцией (а именно характером изменения диаметра поперечного сечения по длине трубки), последующая корректировка возможна только в ограниченной степени, а независимая настройка отдельного тона, не затрагивающая другие тона, вообще невозможна. Эта взаимозависимость настройки отдельных тонов и трудность ее корректировки проясняют то значение, которое настройка, точность строя духового инструмента имеют для музыканта. Точность строя или точность настройки для разных групп музыкальных инструментов определяются по-разному. Показатели точности строя выбираются в зависимости от вида строя, в котором настраивается инструмент (чистый или равномерно-темперированный), мелодического или гармонического склада звучания (одноголосный или многоголосный), характера и степени негармоничности обертонов (степени растянутости настройки). Не вдаваясь в детальные доказательства, будем считать точностью строя духовых инструментов степень соответствия частот основных тонов частотам равномерно-темперированного

строя. (Заметим, что в таком определении точности строя оно непригодно для инструментов с многоголосным звучанием и растянутой настройкой, как, например, у фортепиано).

При измерении частоты тонов, извлекаемых музыкантом на духовом инструменте, возникает специфическая трудность: частота тона зависит не только от инструмента, но также и от исполнителя, от техники последнего. Опытный музыкант в соответствии со своей многолетней практикой привыкает корректировать отдельные тона по высоте, если они звучат неправильно. Музыкант стремится играть правильно на любом инструменте, даже с плохим по точности звукорядом.

Но, кроме того, привыкнув к своему инструменту, в котором он компенсирует исполнительской техникой погрешности строя, на «чужом» инструменте исполнитель рефлекторно, по привычке, делает такую же корректировку, не давая себе отчета в том, что при такой корректировке он может дать неверную настройку инструмента. В идеальном случае музыкант должен без кооректировки выдавать такие звуки, часто́ты которых зависят только от инструмента. Это требование, однако, невыполнимо даже для квалифицированного музыканта, и повторяемость результатов измерений при подобном методе определения точности строя низка.

Так, отклонение частоты отдельных тонов при игре одного музыканта на одном и том же инструменте в разные дни колеблется между 5 и 35 центами. Если же на одном и том же инструменте играют разные исполнители, то разброс тонов по частоте достигает еще больших величин: от 25 до 60 центов. Можно усреднить результаты измерений, полученных с различными музыкантами, и тогда усредненная кривая настройки по закону больших чисел может считаться оптимальным представлением строя проверяемого инструмента.

Кривая настройки, полученная подобным образом, имеет хорошую воспроизводимость, то есть она повторяется при измерении с другой достаточно большой группой музыкантов. Усредненная кривая настройки позволяет объективно выявлять недостатки строя духового инструмента.

Эти недостатки проявляются в виде значительных отклонений частоты тонов натуральных звукорядов инструмента. Например, у оркестровой трубы может быть завышение 6, 8, 9-го натуральных тонов и занижение 3-го, у валторны иногда чрезмерно занижены 5-й и 10-й тона. Музыканты отмечают также неправильность ширины самого нижнего извлекаемого интервала. Так, у тубы нижний интервал несколько у́же, а у трубы, например, несколько шире номинальных значений. В качестве примера приведем взятые из работы [42] результаты измерений частоты шести натуральных звуков тромбона: 41; 115; 175; 236; 299; 361 Гц. Если выразить соотношения частот соседних тонов, то нетрудно убедиться, что эти соотношения не являются точно кратными отношениями интервалов чистого строя: 1:2,8; 2:3,04; 3:4,05; 4:5,06. Особенно сильно нарушено отношение в нижнем интервале между первым и вторым натураль-

ными звуками, которые значительно шире октавы (1:2). Остальные интервалы хотя и не имеют таких больших отклонений, но все же они отличаются в той или иной степени от гармонических соотношений. Во всех духовых инструментах наблюдаются бóльшие или меньшие отклонения интервальных соотношений от гармонических кратных соотношений.

В чем причины нарушений гармонических натуральных звуков и вообще отклонений гармонического звукоряда от шкалы равномерно-темперированных частот?

Существует группа факторов конструктивного порядка, от которых зависит частота натуральных звуков: акустический тип трубки, длина и диаметр основного канала, т. е. мензура, длина и диаметр дополнительных трубок в медных инструментах и диаметр и положение отверстий в деревянных инструментах, физико-механические характеристики мундштука и трости. Правильность или неправильность выбора конструктивных параметров в конечном счете сказывается на степени акустической согласованности разных частей музыкального инструмента между собой. Очевидно, что существуют еще, по крайней мере, две группы самостоятельных факторов, которые влияют на частоту тонов. Это вторая группа факторов, связанная с качеством изготовления инструментов, включающая, например, гладкость (или неровность) внутренних стенок канала трубок, плавность перехода сечений от одной части трубки к другой, качество обработки боковых отверстий, герметичность голосовой машинки и т. п. Третья группа связана с факторами, отражающими влияние самого музыканта (характеристики его амбушюра, носоглотки, легких и т. д.), температуры инструмента и проч.

Рассмотрим влияние отдельных факторов на точность строя духового инструмента. Факторы, зависящие от конструкции, естественно, будут различными для деревянных и медных инструментов.

В группе деревянных инструментов первостепенное значение имеет размер и положение боковых отверстий. Иногда полагают, что открывание отверстия равносильно укорачиванию трубки по месту отверстия. Однако открывание отверстия эквивалентно в акустическом отношении укорачиванию трубки только в том случае, если диаметр отверстия равен диаметру самого канала трубки, чего, как известно, не бывает в действительности. В этом случае, когда отверстие столь велико, что конец трубки может отвалиться, частота излучаемого тона такая же, как и у трубки, длина которой равна расстоянию от мундштука до этого отверстия. С другой стороны, если отверстие в трубке очень мало, например, диаметром в десятую долю миллиметра, то ясно, что такое отверстие практически не скажется на частоте основного натурального тона инструмента. Из рассмотрения этих крайних случаев большого и маленького отверстий следует логический вывод: с уменьшением максимально возможного диаметра отверстия эффективная длина трубки увеличивается и, значит, основной тон понижается [43]:

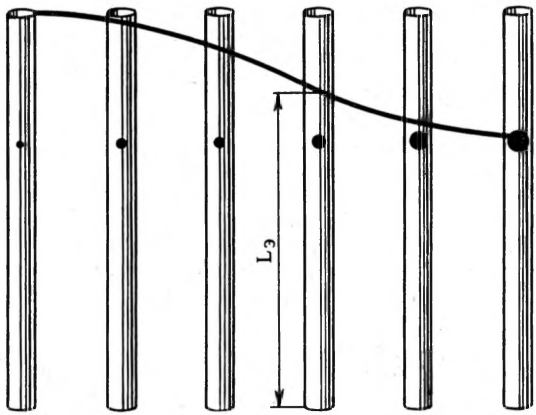


Схема 20. Связь диаметра бокового отверстия и эффективной длины $L_э$ трубки

Отсюда ясно происхождение практического правила корректировки высоты тона, зависящего от данного отверстия: в определенных границах уменьшение диаметра отверстия понижает высоту тона, а увеличение диаметра — соответственно повышает тон. Практическим путем замечено также, что степень влияния отверстия на частоту звука зависит от положения отверстия по длине трубки: маленькое отверстие, расположенное вблизи мундштука, может дать ту же ноту, что и большое отверстие, находящееся ближе к выходному концу трубки. Таким образом, корректировка строя деревянного инструмента при наличии нескольких неправильно настроенных тонов возможна путем изменения или положения, или диаметра бокового отверстия.

Роль боковых отверстий заключается не только в том, чтобы получить правильный хроматический звукоряд. Размер и положение боковых отверстий, как и форма канала трубки, решающим образом влияют на акустические свойства музыкального инструмента. Если отверстия открыты, то они наряду с раструбом участвуют в излучении звука, воздействующего на слушателя. Закрытые же отверстия превращают гладкие внутренние стенки трубки в бугорчатый звукопровод, в канал с серией чередующихся впадин и возвышенностей, что не может не сказаться на колебательном процессе в трубке. В литературе [43] описан эксперимент по выявлению влияния отверстий на тембр звука, издаваемого пластмассовой трубкой. Пластмассовая трубка, снабженная кларнетным мундштуком, издавала тупой звук, схожий со звуком водопроводной трубы, который слушатели не могли классифицировать как музыкальный. Но стоило ту же самую трубку снабдить рядом боковых отверстий, часть из ко-

торых была закрыта, а часть открыта (как при игре на обычном духовом инструменте), и тембр звука становился поразительно схожим со звуком кларнета.

В течение многих столетий музыкальные мастера эмпирическим путем устанавливали правильное размещение отверстий в деревянных инструментах. В последние несколько десятилетий появились и теоретические работы, которые содержат практические рекомендации к конструированию духовых инструментов. Так, например, автор работы [43] дает такую рекомендацию: отношение объема воздуха, содержащегося в прикрытом отверстии, к объему воздуха, содержащегося в отрезке трубки между соседними отверстиями, должно быть одним и тем же на всем протяжении канала трубки. По мнению автора, выполнение данной рекомендации способствует достижению высоких тембровых свойств и точности строя деревянных инструментов.

Наконец, необходимо сказать и еще об одной роли отверстий в связи с процессом передувания*. Граничные акустические условия на концах трубки должны оставаться одними и теми же как на основном тоне, так и на передуваемых тонах. Для облегчения передувания необходимо обеспечить минимальное давление воздуха в том месте по длине трубки, где стоячая волна имеет узел. С этой целью на начальном участке трубки делают маленькое отверстие (обычно с нижней стороны трубки) — октавный или дуодецимный клапан. Такое маленькое отверстие почти не изменяет эффективную длину трубки, но способствует получению устойчивых тонов передувания.

В медных духовых инструментах одним из факторов, влияющих на точность строя, является правильный выбор длины дополнительных трубок голосовой машинки. Умелым изменением длин трубок каждого из вентилей можно добиться сведения к минимуму отклонений по всему диапазону духового инструмента. Конкретные рекомендации по степени понижения тонов отдельных вентилей у разных авторов различны. На основе эмпирического метода проб и ошибок Дж. Редфилд [44] еще в 30-х годах нашего столетия рекомендовал вентильные трубки делать по длине такими, чтобы они давали понижение:

2-й вентиль	на	212 центов
1-й —″—	″	116 центов
3-й —″—	″	321 цент

П. Н. Зимин [45] на основе своих опытных исследований считал правильным несколько другие понижения вентилей:

2-й вентиль	на	205 центов
1-й —″—	″	105 центов
3-й —″—	″	320 центов.

---

* Передувание — способ извлечения различных по высоте звуков в духовых инструментах путем изменения скорости вдуваемой исполнителем струи воздуха.

Как видим, эти рекомендации достаточно близки, особенно для третьего вентиля. Р. В. Янг [44] теоретическим путем рассчитал необходимое понижение вентилей, исходя из требования минимизации ошибок настройки по полному диапазону. Для корнетов и труб при нормальной комнатной температуре хорошая настройка может быть получена при завышении основного тона трубки на 1 цент и понижении:

2-й вентиль	на	200	центов
1-й —″—	″	106	центов
3-й —″—	″	318	центов.

Сравнивая рекомендации П. Н. Зимина и Р. В. Янга, нетрудно убедиться в их близости. Такая настройка вентилей, как утверждает Р. В. Янг, дает для вторых натуральных тонов, получаемых комбинацией трех вентилей, завышение в среднем не более 20 центов. Для баритона и баса, температура которых при игре повышается в незначительной степени, хорошая компенсация получается при настройке основной трубки выше на 1 цент и следующем понижении:

2-й вентиль	на	200	центов
1-й —″—	″	107	центов
3-й —″—	″	325	центов.

Давно замечено, что местные, то есть относящиеся к определенному месту, нерегулярности изменения диаметра канала трубки воздействуют на высоту звуков духовых инструментов. Речь идет о местных сужениях и расширениях диаметра. Очевидно, что увеличение поперечного сечения по своему воздействию на частоту противоположно уменьшению его в том же самом месте. В случае цилиндрической трубки деревянного инструмента расширение канала около пучности стоячей волны какого-либо натурального тона повышает частоту и, наоборот, понижает частоту тона, если расширение расположено в области узла стоячей волны. Аналогичное наблюдение приводит в своей работе В. Крюгер применительно к медным инструментам [46]: увеличение диаметра сечения трубки на месте узла (пучности давления) вызывает понижение соответствующего тона, а увеличение диаметра на месте пучности (узла давления) повышает тон. Подобные же закономерности влияния местных изменений диаметра трубки на частоту, отличающиеся некоторыми деталями, приводит П. Н. Зимин: а) если наблюдается местное сужение канала, то звуки, пучности колебаний которых находятся в начале области сужения, понижаются, а звуки, пучности колебаний которых находятся в конце области сужения, повышаются против нормы; б) если, наоборот, имеется местное расширение мензуры, то звуки, пучности колебаний которых попадают в начало расширения, повышаются, а звуки, пучности колебаний которых попадают в конце расширенного участка, понижаются против нормы [45, *156*].

Непостоянство диаметра канала трубки влияет, таким образом, на частоту отдельных тонов инструмента. Но поскольку узлы и пучности различных натуральных тонов расположены в разных местах,

то в конечном счете изменение диаметра канала в одном месте по-разному влияет на частоту натуральных звуков и является одной из причин негармоничности тонов передувания. Если нерегулярность диаметра канала находится вблизи пучности, когда звучит, например, основной тон, то при передувании на вторую гармонику, когда воздушный столб делится пополам, нерегулярность диаметра попадет уже на узел второго тона. Из-за различного воздействия нерегулярности диаметра на частоту основного тона (влияние на пучность) и частоту первого тона передувания (влияние на узел) создается негармоничность второй гармоники по отношению к основному тону. Учитывая вышеприведенную связь изменения диаметра канала и частоты натурального звука, можно целенаправленно осуществлять желаемую корректировку настройки духового инструмента. Эта возможность настройки духового инструмента не ускользнула от внимания мастеров и исследователей, которые делают многочисленные попытки регулировки относительной настройки тонов натурального звукоряда путем сужения, расширения или придания формы конуса внутреннему каналу в соответствующих местах трубки [46, 47]. Мастера-флейтисты в особенности используют способ расширения канала инструмента в предопределенных местах. Так как указанные способы по-разному влияют на частоту звуков, то это неизбежно должно отразиться на конструктивных параметрах духовых инструментов: для группы деревянных инструментов это может выразиться в различии положения отверстий и их диаметров, что приведет, в свою очередь, к различной аппликатуре (расположению пальцев) на некоторых конструкциях деревянных инструментов; для группы медных инструментов это скажется прежде всего на различной конструктивной длине дополнительных трубок вентилей.

Из сказанного следует, что форма канала хорошо настроенного духового инструмента далека от простой геометрической формы (цилиндрической или конической), которую имеют в виду при упрощенном теоретическом анализе.

До сих пор мы рассматривали плавное, не скачкообразное изменение диаметра канала трубок. Однако обследование некоторых старинных деревянных духовых инструментов XVIII — начала XX столетия показало, что среди них не так уж редко встречаются инструменты со ступенчатым скачкообразным изменением диаметра, особенно в местах соединений отдельных секций. С физической точки зрения, ступенчатое изменение диаметра эквивалентно увеличению эффективной длины трубки. Таким образом, для получения звуков той же высоты требуется укорачивание трубки: «Без большой ошибки можно сказать, что общий эффект «ступени» в некоторых старинных деревянных инструментах эквивалентен габаритному укорачиванию трубки, не говоря уже о селективности фильтрации отдельных гармоник, которое также может иметь место» [47, *410*]. В последнем замечании речь идет фактически об изменении тембра звука инструмента. О подобном же эффекте у медных инструментов говорит П. Н. Зимин: «...порог у мундштука в носке инструмента, т. е. внезапное резкое расширение диаметра канала при переходе

из мундштука в носок, также нарушает правильность звукоряда инструмента. Опыт натурального инструмента — трубки, имевшей нарочно сделанное такое искажение мензуры в ее носке, показал, что ее вторая гармоника приблизительно на полтона понизилась, в то время как остальные, более высокие гармоники, остались на нормальной высоте» [45, *617*].

Сложным образом изменяет частоту натуральных звуков расширение раструба медных инструментов. Имеющиеся в технической литературе данные в некоторой степени противоречивы. По Крюгеру, «расширение поперечного сечения непосредственно за плоскостью раструба понижает высокие гармоники больше, чем низкие. Дело в том, что эти места для высоких тонов находятся в области пучности давления, в то время как для низких тонов эти места практически находятся в области узлов давления» [46, *461*]. П. Н. Зимин приходил к несколько иному выводу: «...не в меру расширяющийся воронкой раструб инструмента влияет резко повышающим образом на звуки второй, а иногда и третьей гармоники, при понижении общей высоты звуков инструмента, связанном с увеличением поправки на открытый конец трубки» [45, *156*].

Несовпадение выводов вполне может быть объяснено различием конструкций конкретно обследованных авторами инструментов. В конструкции современных духовых инструментов преобладает тенденция исключения резких перепадов сечения по длине трубок, начиная с мундштука и кончая раструбом в обеих группах духовых инструментов. Это также объясняется требованиями технологичности изготовления инструментов в машинном производстве. Что же касается равномерного изменения диаметра по всей длине трубки, то в пределах $\pm 0{,}5$ — 1% это изменение не влияет заметно на акустические свойства духового инструмента. Если же в указанных пределах изменение диаметра по длине трубки будет неравномерно, то это в ту или иную сторону сдвинет частоты гармоник.

Частота излучаемого звука зависит от резонансных свойств системы «воздушный столб — генератор звука», поэтому определенное влияние на высоту строя оказывают элементы, входящие в состав генератора колебаний (возбудителя колебаний). В деревянных духовых инструментах это трость. Толстая, жесткая трость повышает строй, причем для низких тонов несколько больше, чем для высоких. Тонкая трость позволяет музыканту в большей мере, по сравнению с толстой, регулировать высоту звуков [48].

В медных инструментах на высоту излучаемого тона влияет амбушюр музыканта и индивидуально подобранный по своим размерам мундштук. Губы исполнителя могут приспособиться к разным мундштукам, но все же опытный музыкант выбирает мундштук по своему амбушюру. Удачным подбором можно повысить точность строя инструмента. Вообще говоря, настройка, высота отдельных тонов, получаемых при игре на «своем» и «чужом» мундштуке, несколько различны, но это различие статистически не значимо, в среднем не существенно. Опытный музыкант и с «чужим» мундштуком старается играть правильно, добиваясь нужной интонации звуков.

Конечно, неправильный подбор мундштука повышает утомляемость исполнителя.

На частоту тона при прочих равных условиях влияет диаметр чашки мундштука. Для одной и той же степени напряжения амбушюра мундштук с большим диаметром даст более низкий звук. В этом случае понижение тона вызывается большей массой и площадью губ, участвующих в вибрации. И наоборот: при меньшем диаметре чашки мундштука — меньше масса и площадь губ, что при одинаковом напряжении губ дает более высокий звук.

Рассмотрим теперь более подробно исполнительский аппарат музыканта, который участвует в процессе игры на инструменте. В этом случае генератор звуковых колебаний (амбушюр и мундштук, трость) механически и акустически подключен, с одной стороны, к воздушному объему, заключенному в горле и грудной клетке музыканта, а с другой стороны — к воздушному резонатору в трубке инструмента. Воздух в этих плоскостях и объемах также приводится в колебательное движение, как и воздух в трубке инструмента. Таким образом, с акустической точки зрения, исполнитель-музыкант со своим инструментом образует связанную систему из трех элементов. Отсюда следует, что часто́ты тонов, извлекаемых на инструменте, с физической стороны являются собственными часто́тами системы трех элементов:

1) воздушного резонатора грудной клетки, полостей горла и головы;
2) губ с мундштуком или тростью, как генератора звуковых колебаний;
3) резонирующего столба воздуха в трубке инструмента.

Каждый из этих связанных элементов управляется музыкантом в той или иной мере, что сказывается на частоте колебаний всей системы: музыкант может менять размеры резонирующего столба воздуха в инструменте с помощью пальцев, закрывая и открывая отверстия или подключая дополнительные трубки, может управлять генератором звука, изменяя напряжение губ и скорость потока воздуха, и, наконец, может изменять форму и объем воздушных полостей горла и грудной клетки с помощью мускулатуры.

По мнению некоторых исследователей, главную роль в системе «музыкант-инструмент» играет музыкант. Действительно, высота и качество тона, возникающего при игре на инструменте, зависят как от анатомических, физиологических особенностей играющего — объемов грудной клетки, легких, размеров горла, носоглоточной полости, строения и массы губного аппарата, лицевой мускулатуры, так и от навыков игровых приемов: способа складывания губ на мундштуке, характера атаки звука, силы вдувания воздуха и прочего. Эти «человеческие факторы» имеют большое значение для художественности исполнения, но ни в коем случае не сводятся к простому процессу «дутья» и являются причиной того, что многие музыканты требуют «персональной» подгонки («для себя») своего инструмента. Персональная подгонка духового инструмента необходима, поскольку особенности музыканта, его амбушюр сугубо индивидуальны и фактически не поддаются точному учету. Однако воз-

можность исполнителя влиять и контролировать высоту и тембровые свойства тонов является скорее достоинством, нежели недостатком. Например, усиливая вдувание, можно несколько повышать фальшиво-низкие звуки инструмента. Подчеркивая роль музыканта в исполнении музыки, нельзя принижать роль второго элемента системы — музыкального инструмента. В противном случае не было бы проблемы хороших и плохих музыкальных инструментов.

На частоту тонов духового инструмента влияет также температура воздуха в трубке. Дело в том, что частота колебаний прямо зависит от скорости распространения звуковой волны. А так как скорость звука в воздухе зависит от температуры, то и резонансная частота воздушного столба изменяется при изменении температуры. Для скорости звука в воздухе в зависимости от температуры существует определенная формула (t° дана в градусах Цельсия):

$$C=331{,}7\ (1+0{,}0018t°)\ \text{м/с}.$$

Отсюда следует, что температура воздуха, находящегося в инструменте, оказывает большое влияние на фактическую частоту тонов. Если бы температура воздуха внутри инструмента изменялась одинаково во всех его частях, то под влиянием изменения температуры инструмент расстраивался бы равномерно во всем диапазоне. Однако необходимо принять во внимание, что инструмент в процессе игры находится в руках исполнителя, а каждый музыкант может иметь свой, отличный от других способ держания инструмента и свою индивидуальную температуру рук. Отсюда следует, что невозможно точно рассчитать температурный режим внутри инструмента, в котором могут быть по-разному распределены нагретые участки, которые, соответственно, по-разному и неопределенным образом влияют на высоту отдельных тонов.

Ориентировочные теоретические расчеты дают повышение тонов на 3 цента с каждым увеличением температуры на 1°С. Однако при экспериментальном определении влияния изменения температуры воздуха на частоту тонов исследователи дают меньшие значения поправки. Так, по данным [47], при повышении температуры окружающей среды на 1°С частота тона различных инструментов медной группы увеличивается на 0,8 — 1,6 цента. Например, для трубы это повышение составляет 1,2 цента, тромбона — 1,3 цента. Среднее изменение строя в зависимости от температуры окружающего воздуха для инструментов деревянной группы (флейты, гобоя, кларнета, фагота, скасофона) лежит в пределах 0,8 — 1,9 цента на 1°С. Как видим, реакция на изменение температуры воздуха повышением строя практически одинакова в обеих группах инструментов.

По сравнению с инструментами старых систем, современные духовые инструменты более совершенны по конструкции, они дают возможность музыканту лучше интонировать звучание, правильно устанавливать высоту исполняемых тонов. Однако фальшивое звучание инструментов массового производства не такая уж редкость и сейчас: практически каждый духовой инструмент имеет отдельные нестройные звуки, то есть исполнитель должен применять специаль-

ные приемы для правильного интонирования отдельных натуральных звуков, и это не всегда удается.

Укажем вначале общие причины погрешности строя духовых инструментов:

— несовершенство конструкции, объясняемое невозможностью создания идеального, с акустической точки зрения, инструмента, сюда же отнесем и ошибки самого проектирования;

— качество изготовления и подготовки инструмента к игре — правильность настройки и регулировки;

— несовершенство техники интонирования музыканта (т. е. квалификация музыканта);

— влияние температурного режима.

1. Несовершенство конструкции с акустической точки зрения. Здесь отметим несколько факторов. Каждый духовой инструмент позволяет получить несколько (от 2 до 12 и более) натуральных звукорядов. Частота одноименных тонов в разных звукорядах теоретически не может совпадать точно. Это приводит к расхождению соотношений частот между звуками одних и тех же порядковых номеров, находящихся в разных натуральных звукорядах. Все это вызывает различные отклонения частот натуральных тонов от частот равномерно-темперированного строя. Тона передувания в идеальном инструменте следуют интервалам чистого строя, в то время как размеры трубок инструмента выбирают из расчета получения тонов равномерно-темперированного строя.

Отклонения высоты звуков вызывают также особенности конструкции инструментов: в большинстве случаев духовой инструмент имеет участки с разной формой канала — цилиндрической и конической, акустическое поведение которых, собственные их частоты различны. Кроме того, длина цилиндрической части изменяется в процессе игры (включение дополнительных трубок, выдвижение кулисы). С увеличением цилиндрической части происходит прогрессивное расширение частот с ростом номера натурального звука. В группе медных инструментов источником ошибок настройки является также компромиссный выбор длины дополнительных трубок, особенно применение трубки третьего вентиля, в котором уже конструкционно заложена погрешность интонирования. Таким образом, сама конструкция деревянных и медных инструментов теоретически не может избежать акустической неточности строя из-за нарушений звуковысотных соотношений тонов натуральных звукорядов.

2. Качество изготовления и подготовки духового инструмента к игре. Точность строя духовых инструментов существенно зависит от точности соблюдения конструктивных параметров. Погрешности строя вызываются несоблюдением правильной длины трубок (в том числе и дополнительных), диаметра и формы внутреннего канала, диаметров и положений боковых отверстий. К нарушениям строя приводят и резкие переходы диаметра сечений от одной части инструмента к другой, в том числе несоответствие внутреннего диаметра мундштука, канала бочонка диаметру основной трубки инструмента.

Для точности строя имеет значение соблюдение внутренних и внешних размеров и конфигурации мундштука (например, положение выступов внутри мундштука кларнета), диаметра штифта трости (у гобоя), размеров, формы и физико-механических параметров самой трости. Погрешности строя появляются и из-за неправильных размеров и положения (подгонки) бочонка, головки, трости, мундштука, эса, подмундштучной трубки. Различия в точности изготовления являются причиной разных кривых настройки инструментов даже одной и той же модели.

Специфическая причина погрешности строя духовых инструментов возникает при регулировке общей высоты строя, взаимного расположения их регистров по высоте. Выдвижение крона общего строя дает разную величину понижения звуков разных регистров: большее понижение высоты для звуков с коротким столбом воздуха (меньшей длиной волны) и меньшее понижение для звуков с длинным столбом воздуха (большей длиной волны). У флейты может быть неправильным соотношение высоты разных регистров из-за неверного положения выдвижной пробки в головке. Погрешность интонации вызывает неточная сборка и регулировка игрового механизма: повышенные зазоры из-за неплотности соединения движущихся частей голосовой машинки и вследствие этого утечка воздуха (медные инструменты), неправильная высота подъема клапанов, несоответствие подушечек чашечкам клапанов и гнездам звуковых отверстий в деревянных инструментах. Наконец, увеличивают погрешности строя: наплывы пайки, грязь, слизь внутреннего канала, повреждения (вмятины) корпуса инструмента.

3. Несовершенство техники интонирования. К общим причинам появления погрешностей строя следует отнести неточность интонирования звуков самим музыкантом. На это влияют квалификация исполнителя, степень развитости слуха, техника работы дыхательного аппарата, амбушюра, приемы игры, аппликатура, умение правильно настроить инструмент и разогреть его и т. д. Влияет на строй правильность выбора мундштука, трости для данного исполнителя и данного инструмента. Отклонения в настройке проявляются и с изменением динамики звучания: увеличение уровня интенсивности звука изменяет высоту звуков.

Существует еще один источник отклонения интонирования, который в общем нельзя отнести к погрешностям звукоизвлечения,— это задачи художественного исполнения музыкального произведения, индивидуальность его интерпретации музыкантом, учет ладовых взаимосвязей. Эти последние факторы могут привести к тому, что один и тот же звук или интервал в разном музыкальном контексте формально будет иметь разную высоту или разную ширину, но здесь неправомерно говорить о погрешности интонации.

4. Влияние температурного режима. О характере влияния температуры и подготовки к игре самого музыканта хорошо сказал профессор Московской консерватории, доктор искусствоведения Б. Диков: «При тщательной настройке... необходимо учитывать и такие важные факторы, влияющие на строй духовых инструментов,

как температурные условия, состояние исполнительского аппарата играющего, качественное состояние музыкальных инструментов и др. Известно, например, что духовые инструменты, в силу различия их формы, объема и конструкции, по-разному реагируют на изменения температурных условий. Более массивные духовые инструменты (туба, баритон, тромбон, фагот, бас-кларнет) дольше согреваются и значительно медленнее остывают, чем инструменты меньших размеров. Отсюда ясно, что трубачу и тубисту или флейтисту и фаготисту перед настройкой оркестра необходимо затратить разное количество времени для „разогревания" или „опробования" своего инструмента. Предварительное разыгрывание на инструменте является обязательным перед коллективной настройкой, потому что губной аппарат (амбушюр) исполнителя также требует соответствующей „настройки". Не „разогрев" мышцы губ, не „провентилировав" свой дыхательный аппарат, музыкант-духовик не сможет извлечь качественный звук, пригодный стать эталоном при настройке оркестра» [48,*15*].

Рассмотренные причины, вызывающие погрешности строя духовых инструментов, серьезны и многочисленны, так что не будет преувеличением сказать, что все без исключения духовые инструменты в той или иной степени не строят. Можно утверждать даже, что абсолютно точную и стабильную высоту звуков или интервалов на духовом инструменте получить вообще невозможно. И все же музыкант-духовик имеет в своем распоряжении богатый арсенал приемов, которые позволяют ему добиваться той точности интонирования, которая удовлетворяет требованиям музыкального слуха.

Настройка медных духовых инструментов

Музыкант-духовик стремится так настроить свой инструмент, чтобы в определенном смысле настройка была оптимальной, например, стараясь свести к минимуму отклонения высоты тех звуков, которые наиболее часто используются при игре. Добиваться высокой точности строя можно двумя путями: 1) настройкой и регулировкой самого инструмента и 2) с помощью игровых исполнительских приемов.

Прежде всего необходимо сказать о норме общей высоты строя. Несмотря на то что существует стандартный эталон высоты тона *ля*[1], равный 440 Гц, инструменты духового оркестра имеют тенденцию к завышению строя. Музыканты духовых оркестров завышают строй до частоты *ля*[1] —443—445 Гц. Объяснения этого имеются разные: более высокий строй духовых инструментов дает возможность регулировать настройку как в сторону повышения, так и в сторону понижения строя, когда необходимо компенсировать влияние низкой или, наоборот, высокой температуры окружающей среды. Более высокий строй в процессе игры обеспечивает более чистую интонацию, инструменты с несколько повышенным строем звучат более ярко и выразительно. Может быть, эти доводы и не являются достаточно убедительными, но факт повышенного строя современных оркестров

как у нас в стране, так и за рубежом остается фактом. Настройщикам фортепиано также приходится учитывать завышенную настройку, когда, например, рояль должен звучать вместе с оркестром.

Основным приемом изменения общей высоты строя служит укорачивание или удлинение трубки духового инструмента двумя способами: регулировкой крона общего строя и изменением глубины посадки мундштука. Первый способ позволяет изменять общий строй в более широких пределах, по сравнению со вторым способом. Если данных способов недостаточно, то инструмент требует серьезной переделки в производственных условиях. При этом корректируются длины различных участков духового инструмента: трубки либо укорачивают, либо удлиняют. Исправление настройки сводится к установлению правильных размеров трубок.

Ход расчетов длин основной и дополнительных трубок медных духовых инструментов в принципе достаточно прост [49]:

1) Задается частота основного тона инструмента (например, частота тона *Ля*: f=110,12 Гц);

2) Рассчитывается длина волны соответствующего тона $\lambda = c/f = 340/110{,}12 = 3{,}0875$ м;

3) Определяется длина полуволны 3,0875 : 2=1,5438 м;

4) Определяется поправка на открытый конец трубки (например, если поправка составляет 6,5 %, то она будет равна 0,1003 м);

5) Определяется итоговая длина трубки L=1,5438—0,1003=1,4435 м.

В эту расчетную длину трубки входит также и длина выступающей части мундштука. Выполняя подобные расчеты для разных комбинаций основной трубки и сочетаний дополнительных трубок (кронов), находим длины последних. Обратным пересчетом по найденным размерам трубок проверим теоретически частоту натуральных звуков, допуская отклонение от частот равномерно-темперированного строя не более 3—6 Гц. При этом худшие допускаемые отклонения должны связываться с включением дополнительной трубки третьего вентиля, который относительно реже употребляется в игре. Полезно учесть также, что для понижения звуков на равномерно-темперированный полутон необходимо удлинение трубки инструмента примерно на 1/15—1/18 часть ее длины.

Регулировка высоты строя медных духовых инструментов кроном общего строя дает неравномерное изменение высоты отдельных тонов по диапазону. Так, при выдвижении крона общего строя на 10—12 мм отклонения тонов по диапазону изменяются в пределах ± 10 центов. При выдвижении крона общего строя больше чем на 20 мм происходит более серьезное рассогласование звуков разных регистров инструмента, о чем уже говорилось выше. Для сохранения правильных интервальных соотношений высоких и низких звуков при выдвижении крона общего строя необходимо выдвигать на определенную величину и кроны дополнительных трубок, что необходимо для сохранения пропорциональных соотношений длин основного и дополнительных каналов. Правильного соотношения регистров инструмента по высоте в определенной степени можно добиться выбором мундштука по внутренним его размерам. Так, применение мундштука с незна-

чительно увеличенным диаметром устья заметно повышает интонацию натуральных звуков верхнего регистра; применение мундштука с бóльшим объемом чашечки дает понижение тонов среднего и верхнего регистров при относительно меньшем понижении тонов нижнего регистра [50].

В процессе корректировки общей высоты строя и взаимного согласования регистров музыкант проверяет высоту не только основного тона, но и тонов передувания. Если руководствоваться принципом минимума отклонений частоты натуральных звуков, то необходимо, чтобы возможно большая часть натуральных звуков совпадала со шкалой равномерно-темперированных частот, часть была ниже, а часть — выше ее (поскольку нулевых отклонений достичь все равно не удается). Практически в большинстве инструментов медной группы (труба, валторна, туба и т. д.) завышенные 3-й и 6-й натуральные звуки понижают кроном общего строя, стараясь, чтобы 4-й звук соответствовал темперированной шкале частот, а заниженный 5-й натуральный звук повышают игровыми приемами (см. далее).

В инструментах с большим числом натуральных звуков (например, валторна) проверяется правильность высоты еще и других тонов: 7-го, 10-го и 12-го. При настройке тромбона проверяется правильность, точность интонации 3-го, 4-го и 5-го натуральных звуков в первой позиции. Если эти звуки выстроены с минимальными отклонениями, то натуральные звуки других позиций будут иметь правильную интонацию.

Настройка деревянных духовых инструментов

В группе деревянных инструментов, как и в группе медных, необходимо правильно установить общую высоту строя, согласовать разные регистры между собой и подстроить отдельные тона, имеющие по каким-либо причинам большие отклонения по частоте.

Высоту общего строя деревянных инструментов устанавливают соответствующей посадкой составных частей: изменением положения, например, трости (гобоя, фагота), эса (гобоя), бочонка (кларнета), мундштука или подмундштучной трубки (саксофона).

Рассмотрим регулировку общего строя по отдельным инструментам.

Общий строй у флейты понижается раздвижением головки инструмента и повышается более глубокой посадкой головки. Общий строй кларнета устанавливают изменением положения бочонка: выдвижение понижает строй, а опускание (задвижка) бочонка повышает строй. Если бочонок задвинут, а строй все же занижен, то ставят более короткий бочонок или укорачивают имеющийся.

На общую высоту строя влияет положение выступов внутри мундштука. Если они находятся ближе к окну мундштука — строй в целом ниже, если дальше — строй выше. Также влияют на строй и выступы мундштука саксофона.

Повышение или понижение общего строя гобоя производится меньшей или большей глубиной задвижения или выдвижения трости: чем глубже задвигается штифт трости в гобой, тем выше строй, и наоборот. Штифт трости гобоя можно рассматривать как продолжение канала инструмента, и в некоторых пределах с его помощью также можно менять высоту звуков. Если внутренний диаметр штифта у́же диаметра основного канала гобоя, строй повышается, если шире — строй понижается.

Для изменения общей высоты строя фагота музыканты используют набор металлических трубок — эсов разных длин. Короткий эс (№ 1) несколько повышает строй, и самый длинный (№ 3) — понижает его. Общую высоту строя фагота можно менять и за счет толщины резиновой прокладки в двойном соединительном колене. Более толстая прокладка, естественно, понижает строй, более тонкая повышает его. В небольшой степени изменяет строй фагота разная глубина посадки трости на эсе: выдвижение трости понижает строй, более глубокая посадка повышает его.

Общий строй саксофона регулируется положением мундштучной трубки (эса) и глубиной насадки самого мундштука. При выдвижении мундштучной трубки и менее глубокой насадке мундштука строй саксофона понижается. Наоборот, более глубокая насадка мундштучной трубки и мундштука повышает общее звучание.

Как и в группе медных инструментов, изменение общей высоты строя инструментов деревянной группы больше влияет на натуральные звуки с более коротким столбом воздуха, чем на звуки с более длинным столбом воздуха. Поэтому и здесь возникает задача взаимной регулировки положения нижнего и верхнего регистров. У флейты взаимная настройка регистров осуществляется передвижением пробки в головке инструмента. Изменение положения пробки влияет главным образом на звуки верхнего регистра: чем ближе пробка выдвигается к основанию головки, тем ниже звучание верхних звуков, и чем глубже пробка задвигается в ствол головки, тем выше звучание этого регистра.

Правильная настройка звукоряда кларнета предусматривает установку специального кольца во внутреннюю часть раздвинутого бочонка (для заполнения пустоты). Необходимо знать также, что если внутренний диаметр мундштука у́же канала бочонка, то звуки верхнего регистра будут завышены; если диаметр мундштука шире, то занижены. Для относительного понижения звуков фагота, извлекаемых при длинных столбах воздуха, иногда выдвигают обе трубки из двойного соединительного колена инструмента. Взаимное положение регистров деревянных духовых инструментов в некоторой степени возможно регулировать подбором тростей. Более тонкие и легкие трости кларнета, гобоя, фагота и саксофона понижают звуки, особенно в верхнем регистре. Толстые тяжелые трости дают некоторое повышение высоты, больше на низких, чем на высоких звуках.

После того как установлена правильная высота строя и отрегулировано взаимное положение регистров, может оказаться, что большие отклонения от правильной высоты имеют отдельные звуки по

диапазону. Какие приемы существуют для корректировки таких звуков? В зависимости от знака отклонения высоты (выше или ниже нормы) прибегают к следующим приемам. Понижают высоту звука: 1) уменьшением диаметра звукового отверстия, для чего стенки отверстия смазывают клеем, шеллаком или вставляют тонкую втулочку, например из пластмассы; 2) установкой более толстой подушечки клапана; 3) уменьшением высоты подъема клапана. Повышают высоту звука: 1) увеличением диаметра звукового отверстия; 2) установкой более тонкой подушечки; 3) увеличением подъема клапана.

Те или иные способы корректировки строя деревянных инструментов по-разному влияют на общую высоту строя и на высоту отдельных звуков, то есть так или иначе изменяют характер кривой настройки инструментов. Поэтому в процессе настройки необходимо контролировать ее по звукам лада, по правильности высоты звуков верхнего регистра (звуков с коротким столбом воздуха), по правильности соотношения одноименных звуков в разных регистрах, по минимальным (в среднем) отклонениям наиболее фальшивых звуков.

Зная рассмотренные выше закономерности и правила настройки тонов, умело пользуясь ими, музыкант-духовик может оптимальным образом настроить свой инструмент.

Как правило, духовые инструменты чаще используются в ансамблевой игре, в оркестрах, и поэтому нужно выполнять взаимную настройку инструментов. Укажем только, что в качестве общих эталонов настройки берут инструменты высокой или средней тесситуры, имеющие более низкий строй: низкая флейта, низкий гобой или кларнет. Настройка производится на основе системы натуральных звуков, расположенных, например, по квинтам.

Как мы уже говорили раньше, идеально точно настроить духовой инструмент невозможно. Дальнейшей повышенной точности настройки музыкант добивается уже разными игровыми приемами. Мы их здесь только кратко охарактеризуем.

Вспомогательная аппликатура дает дополнительную возможность музыканту улучшать интонацию при игре. В группе деревянных инструментов вспомогательная аппликатура образуется либо заменой одной пальцевой комбинации другой, либо путем добавления к основной комбинации других закрытых или открытых отверстий. Открывание отверстий рядом с основной аппликатурной комбинацией повышает звучание, а неполное или полное прикрывание пальцами или клапанами отверстий, наряду с основной аппликатурной комбинацией, понижает звук.

В группе медных духовых инструментов также используется вспомогательная аппликатура для исправления дефектов настройки и улучшения интонации отдельных звуков. Вспомогательная аппликатура образуется понижением не ближайшего, а последующего натурального звука. В этом случае комбинация с бóльшим количеством вентилей даст повышение тона и комбинация с меньшим количеством вентилей — понижение. Улучшение интонационной точности в медных инструментах производится также за счет подстройки пер-

вого и третьего вентилей, а также четвертого вентиля (у тубы, баритона, валторны).

Управляя своим амбушюром, музыкант может в известных пределах менять высоту каждого извлекаемого тона. Повышение тона достигается увеличением напряжения губ и давления воздуха в полости рта, уменьшением объема полости рта, более плотным сжатием челюстей. Понижение тона достигается противоположными действиями.

При игре на деревянных духовых инструментах с тростью (гобой, кларнет, фагот, саксофон) некоторое повышение звуков обеспечивается более плотным прижатием губ к трости, что уменьшает длину и повышает упругость колеблющейся части трости. Для понижения тона уменьшают нажим губ на трость и одновременно, охватывая губами бóльшую часть ее, увеличивают массу язычка и уменьшают его упругость.

Музыканты применяют специальные приемы изменения формы и объема полости рта, которые нужны им для управления высотой извлекаемых звуков. Это достигается «произнесением» разных гласных. Слоги *то, ту, та* понижают интонацию, а слоги *ти, ди, те* повышают ее. Кроме того, некоторые инструменты позволяют применять специфические приемы управления интонацией. Так, флейта звучит несколько выше, если струя воздуха направляется ближе к верхнему краю отверстия, и звук флейты понижается, если струя воздуха посылается в глубину лабиального отверстия. В первом случае головка флейты несколько поворачивается от музыканта, во втором случае слегка поворачивается к музыканту. Валторнисты для корректировки отдельных звуков могут пользоваться введением кисти руки в раструб инструмента. Более глубокое введение понижает тон, выдвижение — повышает его.

В целом различными приемами музыканты на духовых инструментах в состоянии изменять частоту колебаний каждого звука в пределах ± 40 центов.

Допускаемые отклонения строя духовых инструментов, естественно, должны быть меньше пределов $\pm$ 40 центов, в которых музыкант способен корректировать строй в процессе игры с помощью амбушюра. Узаконенных норм на погрешность строя еще не существует, но ориентировочные значения могут быть даны. Для допуска на среднее отклонение строя от высоты эталона *ля*^{1} 440 Гц П. Н. Зимин рекомендует диапазон 0—20 центов. Для тона *ля*^{1} это составит 0—5 Гц. Данное общее завышение строя необходимо в тех случаях, когда музыканты играют при низкой температуре (на морозе) и духовой инструмент не может быть прогрет до нормальной температуры.

Для отклонений частоты отдельных звуков от средней общей высоты строя можно сказать только, соглашаясь с автором работы [46], что среднеквадратическое отклонение, меньшее ± 10 центов, может считаться показателем безупречной настройки духового инструмента. Во многих инструментах фактическое среднеквадратическое отклонение от общей высоты строя зачастую больше ± 20 центов.

V. УПРАЖНЕНИЯ И ПРАКТИЧЕСКИЕ ЗАНЯТИЯ ПО НАСТРОЙКЕ ФОРТЕПИАНО

Процесс овладения настройкой включает в себя достижение следующих целей:

— умение слышать обертоны в звучании струн:

— умение слышать биения в расстроенном унисоне и расстроенной октаве;

— умение уверенно распознавать расстройку хоров и биения одиночной струны;

— умение контролировать частоту биений в процессе настройки унисона и октавы, добиваясь исчезновения биений;

— умение распознавать чистую и темперированную квинту и кварту, овладеть темперированием интервалов;

— овладение в целом настройкой области темперирования *ля* — *ля*^{1} и умение контролировать правильность настройки квинто-квартового круга, находить ошибки темперирования;

— овладение приемами и навыками контроля точности настройки по всему диапазону фортепиано.

Порядок овладения настройкой интервалов следует правилу от простого к сложному. Это значит, что овладеть необходимо сначала настройкой унисона, потом октавы, потом квинты, потом кварты, далее терций и секст. Но прежде всего необходимо научиться слышать биения в расстроенных унисонах и октавах.

Для овладения настройкой клавишного инструмента решающее значение приобретает практическая работа. Сюда входит и предварительная тренировка слуха, и практическая работа с ключом.

Не выполнив ряд заданий и упражнений, приведенных ниже, не отработав слуховой контроль биений, не следует делать полную настройку фортепиано. Сначала надо натренировать слух и приобрести навык работы с ключом на простейших интервалах — унисонах, октавах.

Что же нужно прежде всего, чтобы начать настраивать? Нужно иметь: 1) настроечный ключ (лучше с восьмигранным гнездом головки); 2) вилочный камертон (желательно с проверенной и правильно установленной частотой колебаний, находящейся в пределах 440±0,5 Гц); 3) набор резиновых клинков; минимальное количество клинков — два, но лучше —13, по количеству хоров в октаве; 4) клинок на деревянной ручке с оклеенными замшей концами (для дискантовых струн).

Этот минимальный набор вполне достаточен для настройки, если фортепиано не требует регулировки механики. Нередко требуется также простая отвертка (если нет специального хорейзена) для правильной разбивки струн хора на клангштабике, раздвижки близко сошедшихся струн. Особенно часто это наблюдается в хорах толстых гладких теноровых струн. Между сдвинутыми струнами трудно вставить клинок и поэтому расстояние увеличивают подбивкой смещенной на клангштабике струны с помощью отвертки или хорейзена. При этом иногда бывает, что струны после смещения снова сближаются. Тогда надо попытаться сдвинуть другие струны хора и найти устойчивое положение их с сохранением нормального расстояния между ними. В инструменте с аграфами таких проблем не возникает.

В соответствии с расположением регистров фортепиано слева направо — басового, тенорового, дискантового, также слева направо располагаются толстые одинарные басовые струны, далее тонкие двойные басовые струны, тройные толстые теноровые и тройные тонкие дискантовые струны. Группа струн, по которым молоточек ударяет одновременно, составляет хор одинаковых по частоте колебаний струн. В басах хоры содержат по одной и по две струны, в теноре и дисканте — по три.

Клавишный инструмент, на котором будут проделываться все упражнения и который будет настраиваться, может иметь даже плохую настройку. Для начинающего не годится только инструмент с вновь наложенными и ни разу не настраивавшимися, то есть даже не цвикованными, струнами. Цвиковка — дословно «защипывание» — означает черновую, предварительную настройку струн после их наложения на футор. Вряд ли начинающему придется столкнуться именно с такой ситуацией. Скажем здесь только, что в процессе цвиковки используются мелодические интервалы для установки на слух приблизительной высоты струн. Для этого надо помнить на слух (уметь сольфеджировать) ширину основных интервалов в пределах октавы.

Немецкие мастера еще в прошлом веке считали, что действительное профессиональное образование достигается тогда только, когда руководствуются правилами: обучение для профессии и учеба через профессию. Применительно к нашим задачам это означает, что, только настраивая, научишься настраивать. Поэтому далее мы опишем подробно один из вариантов настройки пианино с попутными контрольными проверками. Этот вариант целиком предназначен для новичка в настройке, который еще не запомнил последовательность ходов, не представляет, как следует проверять те или иные из настраиваемых интервалов, какими способами, приемами надо преодолевать возникающие при настройке трудности. Такого новичка пока не интересует все разнообразие существующих вариантов настройки, и ему нужен один, наиболее доступный и понятный, с которым он может справиться.

Расписанная ниже последовательность действий является одновременно и учебными упражнениями, и настроечными операциями, выполняя которые начинающий, пережив и преодолев энное число

успехов и неудач, сможет в конце концов сказать: «Вот моя первая самостоятельно сделанная настройка инструмента».

Упражнения на слушание обертонов. Мы уже знаем, что биения, на контроле и управлении которыми строится вся настройка, образуются между близкими по частоте совпадающими гармониками разных струн. Поэтому в первом упражнении будем учиться слушать и слышать обертоны, чтобы убедиться в реальности их существования, а это, в свою очередь, необходимо для уяснения акустических процессов, происходящих при настройке струн по биениям. Иногда даже квалифицированные настройщики, показывающие высокое качество работы, не очень четко представляют механизм возникновения биений при настройке разных интервалов. Действительно, не зная о существовании высоких совпадающих по частоте обертонов, трудно объяснить, почему же при настройке, например, кварты от тона *ми*^{1} вверх мы имеем дело фактически с настройкой обертона, лежащего на две октавы выше данного тона, то есть настраиваем обертон, высота которого равна высоте тона *ми*^{3}.

Поднимем демпфера пианино или рояля нажатием правой педали и громко споем какую-либо ноту над струнами инструмента. Прекратив петь, мы тут же услышим звучание струн. В том, что мы слышим именно звук струн, легко убедиться опусканием демпферов: послезвучание струн, вызванное голосом, прекращается. В этом опыте можно петь ниже или выше и струны будут отзываться низким или высоким эхом. Более того, если спета гласная *а* и потом спета гласная *о, и* или какая-нибудь другая, то и эхо струн при поднятых демпферах будет отзываться той же гласной. Разные гласные содержат разный состав обертонов, что вызывает резонирование совпадающих обертонов струн.

Есть и другой способ услышать обертоны. Флажолетные тона — это те же обертоны. Скрипачам не надо объяснять, как их получить. На любом струнном инструменте легко извлечь флажолетный тон следующим образом: приложим точно посредине струны ребром обычную стиральную резинку (но не прижимая струну к грифу) и будем защипывать одну из половин струны. Если резинка приложена точно посредине, то мы сразу услышим флажолетный октавный тон. Если место касания выбрано неправильно, то, перемещая точку касания и периодически защипывая струну, мы найдем такое положение, когда октавный обертон — флажолетный тон ясно зазвучит. И это несмотря на то, что ребро резинки является по существу демпфером струны. Но так как демпфер находится на узле колебаний — посредине струны, то он и не препятствует звучанию октавного натурального тона. Тем же способом можно вызвать звучание и квинтового обертона, расположив демпфер на $^1/_3$ длины струны от подставки (или порожка). Уточняя положение демпферирующего ребра резинки, найдем также узел колебаний на струне, соответствующий дециме от основного тона открытой струны. Место узла определяется при наступлении такого момента, когда звучание обертона (флажолета) становится достаточно заметным. При незначительном смещении демпфера влево или вправо от узловой точки зву-

чание обертона резко сокращается и он не возбуждается. Задача упражнения — научиться слышать возможно большее количество обертонов, не меньше 5—6, на одной струне. Верхние обертоны звучат доли секунды, но их «писк» хорошо заметен. Научившись следить таким образом за звучанием обертонов, нам легче будет следить за биениями, возникающими при сложении колебаний обертонов совпадающих частот.

Надо учесть также, что число узловых точек равно номеру обертонов: первый обертон — октава — имеет одну узловую точку посредине струны, второй обертон — дуодецима — имеет две узловые точки, делящие струну по длине на три части, и т. д.

Поучительной может оказаться отметка узловых точек, найденных на струне, с помощью капельки краски. Тогда можно проследить, какое количество обертонов удастся обнаружить на одной струне.

Кстати, отметив мягким карандашом на грифе струнного инструмента точное расположение узла октавного обертона каждой струны, музыкант может обнаружить, что положения узловых точек не находятся на одинаковом расстоянии от подставки или по отношению к двенадцатому ладу, делящему в щипковом инструменте струну пополам: разница в расстояниях может достигать нескольких миллиметров. Причина несовпадения узловых точек разных струн заключается в неодинаковости физических параметров отрезков струн (небольшие изменения диаметра, плотности материала по длине струны), неправильном положении подставки, неправильной разбивке ладов.

При игре флажолетами, для того чтобы вызвать звучание обертона струны, необходимо найти узловую точку этого обертона и легко коснуться ее пальцем (или каким-либо твердым предметом). Но способна ли струна дать ясно слышимый обертон сама, без фиксации узловой точки?

После некоторой тренировки удается слышать обертоны и без фиксации узловых точек, здесь необходимо только обостренное слуховое внимание. Помощь окажет и предварительное прослушивание обертона, когда он вызывается как флажолет, и тут же, пока слуховая память удерживает звучание обертона, прослушивание звучания открытой струны, в которой при такой подсказке уже ясно распознается этот обертон.

Флажолетные тона можно получить и на струнах клавишных инструментов, особенно легко это сделать на струнах рояля.

На струне фортепиано, например, в среднем регистре легко найти узел одной из гармоник, если прижать палец к струне и ударять по клавише. Тогда, передвигая палец по струне, можно найти положение, когда при ударе молоточка отчетливо становится слышна одна из гармоник. Упражнения на слушание обертонов надо проделать также с тонами, лежащими на одну-две октавы выше и ниже тонов средней октавы. Например, прослушать натуральный ряд: *ля, ля*[1], *ми*[2], *ля*[2]...

Проверяя звучание обертонов в разных местах звукового диапазона фортепиано, отмечаем для себя участки, где удается слышать

большое количество обертонов (басовый и теноровый регистры), и участки, где не удается получить более 1—2 обертонов (верхний дискант).

Легко выделить звучание обертонов струны, используя резонанс, возбуждая обертоны звучанием струн октавой, квинтой или терцией выше или ниже исходной струны. На клавишном инструменте нетрудно провести подтверждающий такую возможность опыт.

Упражнение на слушание обертонов струн фортепиано. Нажать беззвучно клавишу *до* малой октавы, резко ударить по клавише *до*^{1} и через секунду-две отпустить последнюю. Возникший слабый, но ясно слышимый звук, исходящий от струн хора *до*, и будет октавным обертоном (или второй гармоникой) этого хора. (В обоих хорах *до* и *до*^{1} можно оставить по одной, например левой, струне, заглушив остальные). Отпустив клавишу *до*, замечаем прекращение звучания октавного обертона и убеждаемся, что именно струна *до* является источником этого звука. Здесь мы заставили струну *до* колебаться двумя своими половинами, каждая из которых дала колебания с частотой в два раза выше частоты основного тона. В такой же последовательности ударяем по клавише *ля*^{1} (при беззвучно нажатой клавише *до*) и вызываем звучание квинтового обертона (третьей гармоники) струны *до*, которая стала в этом случае колебаться тремя своими третями. Ударом по клавише *до*^{2} вызываем звучание кварто-вого обертона (четвертой гармоники), заставляя струну *до* колебаться четырьмя своими четвертями. Ударом по клавише *ми*^{2} и далее по клавише *ля*^{2} вызываем звучание большой и малой терций (пятая и шестая гармоники). С ростом номера обертона повышается его высота. Так, первый обертон выше основного тона на октаву, второй обертон — на дуодециму, третий — на двойную октаву, четвертый — на двойную октаву плюс большая терция, пятый — на двойную октаву плюс квинта.

Именно эти обертоны одной струны дают биения с совпадающими по высоте обертонами другой струны, если нет идеального равенства частот. После того как мы научимся слышать несколько первых обертонов, уже можно поупражняться в слушании обертонов без вспомогательных резонирующих струн. Слух запоминает звучание обертонов и легко обнаруживает их в звуке одиночной струны. Такое упражнение рекомендовал еще Герман Гельмгольц, отец современной музыкальной акустики.

Как правило, легко услышать гармоники, которые являются нечетными по отношению к основному тону. Такими являются квинта, терция, секста и т. д. Четные гармоники —2, 4, 8-я являются верхними октавами основного тона, 6-я гармоника — верхней октавой 3-й гармоники, то есть дуодецимой; эти гармоники требуют усилий для их обнаружения и восприятия.

На прослушиваемость обертонов оказывает влияние также степень настроенности инструмента: при большой расстройке обертоны резонируют плохо и, следовательно, прослушиваются хуже.

Упражнения на слушание биений. Музыканту не нужно объяснять,

как звучат биения в расстроенных унисоне или октаве. Для тех, кто не вслушивался ранее в биения, не уверен в их восприятии, но научился направлять свое внимание на звучание обертонов, ему легко научиться слышать и биения этих обертонов, которые проявляются в периодических изменениях громкости обертонов, в их вибрациях, высокочастотном «дребезжании».

На слух биения воспринимаются как слабое на общем фоне звучания вибрато, создающееся за счет периодического изменения громкости и в малозаметной степени — частоты сложного звука.

Упражнение. Заглушить две струны в хоре среднего регистра и, ударяя по клавише, подстроиться своим голосом к звуку инструмента. Незначительно меняя высоту пения какой-нибудь гласной, вслушиваться в характер возникающих биений. Отмечать увеличение и уменьшение числа биений при подстройке к звуку инструмента.

Упражнение с камертонами. Взять два камертона, возбудить их колебания и одновременно поднести к уху. Если высота камертонов несколько различна, то ухо услышит четкие биения, частота которых тем больше, чем больше взаимная расстройка камертонов (то есть больше взаимная разность частот колебаний).

Наконец, в верхнем регистре защипывая острой деревянной палочкой или медиатором по одной струне, найдем такие струны, которые сами по себе имеют биения.

Биения сложных тонов слушаем при ударе по клавише расстроенного фортепиано, когда высота одной из струн хора несколько отличается от высоты другой струны того же хора.

Упражнение. Необходимо найти хоры струн, которые расстроены и звучат с биениями. Последнее означает, что частоты отдельных струн одного хора не совсем точно совпадают между собой. Слуховое внимание должно быть направлено на обнаружение биений в унисоне при ударе по одной клавише.

Если пианино или рояль настроены хорошо, то биения можно создать, прикрепив к одной из струн хора горошину из воска, пластилина. Получится достаточная расстройка для возникновения биений.

При этом слуховое внимание надо направлять на биения в разных обертонах, то есть надо научиться подключать внимание и к биениям между нижними обертонами и к биениям между верхними обертонами. Достаточно будет научиться слышать в среднем регистре фортепиано два разных биения: самое низкое и октавой выше его (имеются в виду разные биения в одном и том же расстроенном унисоне, то есть на одних и тех же двух струнах).

Упражнение на восприятие оттенков тембра в унисонах различной точности настройки. Расстроить слегка левую струну хора (например, тона *си*[1]) и, поочередно заглушая то правую, то левую струны, сопоставлять тембр по-разному расстроенных унисонов. Чем больше расстроен хор, тем он резче, ярче звучит, тем чаще биения, и наоборот: точно настроенные в унисон струны хора дают спокойное, как бы матовое звучание, глуховатое по тембру.

Точно настроенный унисон почти не отличается по тембру звуча-

ния от звучания одиночной струны, и надо научиться очень внимательно вслушиваться в звучание такого унисона, чтобы уловить возможное различие тембра.

Упражнение на различение взаимной высоты струн в расстроенном унисоне. Определяется средняя по высоте струна. Для этого необходимо прослушать биения в трех парах струн: левая — средняя, левая — правая и средняя — правая. Найдем пару, дающую наиболее частые биения, тогда третья струна и будет иметь среднюю высоту. Допустим, наиболее частые биения дала пара левая — средняя струны, тогда средней по высоте будет правая струна.

При проверке расстройки струн в унисоне также можно использовать заостренную тонкую палочку из бука или граба для защипывания струн и установления их взаимной звуковысотности.

Теперь приступим непосредственно к отработке контроля биений и начнем с унисона *фа*^{1}. Данный хор должен быть слегка расстроен. Если же инструмент недавно настраивали, а начинающий настройщик (точнее — начинающий учиться настройке), как ему кажется, не слышит биений в звучании хора, то остается проделать «жесткий эксперимент»: находим вирбель второй струны хора *фа*^{1}, для чего нажимаем клавишу *фа*^{1}, прослеживаем движение молоточка, замечаем нужный хор струн и вирбель второй струны, далее устанавливаем настроечный ключ рукояткой вверх и немного влево (здесь и далее речь пойдет о положении ключа при настройке пианино; положение ключа при настройке рояля — в горизонтальной плоскости, и легко провести соответствующую аналогию), чуть поворачиваем вирбель против часовой стрелки, слегка понижая струну и расстраивая унисон. Поворот должен быть минимальным, что достаточно для расстройки хора. Напомним: чем сильнее натянуты струны, тем больше частота колебаний и выше издаваемый звук, ослабление натяжения понижает высоту струн. Теперь остается ударить по клавише *фа*^{1} и вслушаться в полученный звуковой результат. Биения в расстроенном хоре будут заметны очень хорошо. Разница в характере звучания тона с биениями и без них должна быть понятна и уяснена до конца. Лучше всего этого добиться сравнением совместного звучания левой и средней расстроенной струны со звучанием одной левой струны: ставим резиновый клинок между второй и первой струнами, ударяем по клавише и вслушиваемся в характер звучания одной только левой струны; заглушаем затем одну первую (правую) струну, ударяем по клавише и вслушиваемся в характер звучания расстроенных струн, обращая внимание на разницу в тембре первого и второго звучаний. Такое сравнение звучания при поочередном заглушении двух струн и одной струны надо проделать столько раз, сколько необходимо для четкого уяснения разницы в тембре звука за счет появления биений в расстроенном унисоне и уяснения самого характера биений. Считаем, что одиночная струна не имеет биений.

Если же это не так, если струна попалась сама дающая биения, то нам просто не повезло и для наших упражнений необходимо выбрать и по той же методике сделать упражнения с другим хором.

Теперь пробуем немного подтянуть расстроенную вторую струну хора *фа*^{1} и снова нацелим внимание на различие в характере звучания одной левой струны (без биений) и совместно колеблющихся струн 1-й и 2-й: частота биений в общем случае будет другой, нежели в первом эксперименте,— например, меньше. Подобным же приемом сравнения звучания одной третьей струны со звучанием второй и первой струн в хоре мы отыскиваем по диапазону фортепиано другие расстроенные хоры. Если вы научились слышать биения, то для вас может быть неожиданным обнаружение такого факта, что в любом инструменте очень мало хоров, которые не имели бы хоть какой-то доли биений в звучании унисонов (исключая тот случай, когда высококачественный инструмент только что настроен квалифицированным настройщиком). В обычном музицировании мы, как правило, не прислушиваемся тщательно к звучанию унисонов и не замечаем редкие биения или считаем их даже каким-то оживляющим звучание фактором. Острый слух настройщика замечает и отмечает эти биения.

Научившись слышать биения в унисоне, потренируемся в слушании биений в октавах: заглушаем две правые струны хоров *фа*^{1} и *фа*^{2}, одновременно ударяем по клавишам этих хоров и вслушиваемся в возникающие биения. Если биения редкие, октава настроена хорошо, то можно слегка расстроить одну из струн и сравнить тембр звучания расстроенной октавы, отмечая наличие в ней биений. Подобным образом проверим звучание октав по другим тонам — *ля, до* и т. д. Найдем октавы с большим числом биений и октавы, не имеющие биений. Все время запоминаем звучание октав чистых и расстроенных.

Упражнение на слушание биений в темперированных интервалах: квинте, кварте, *ре*^{1} — *ля*^{1}; *ре*^{1} — *соль*^{1}. Обратить внимание на низкие и высокие биения, отметить их разницу по высоте. Сравнить звучание темперированных терций, например, *ля* — *до-диез*^{1}; *до-диез*^{1} — *фа*^{1}; *фа*^{1} — *ля*^{1}. Более подробно о контроле биений в данных интервалах мы скажем при рассмотрении настройки в области темперирования.

После определенной тренировки слух настолько изощряется в слышании биений, что без труда обнаруживает целый ряд биений (особенно в басовых струнах) между более высокими обертонами, и такие биения высокого порядка будут уже мешать настройке и просто сбивать начинающего настройщика с толку. Главное значение в настройке любых интервалов имеют самое нижнее первое биение и второе, на октаву выше от него; на них-то и надо нацелить и тренировать свое внимание.

Упражнения на восприятие и контроль биений очень важны для овладения настройкой. Эти упражнения являются своеобразным тестом на «профессиональную пригодность» к обучению настройке клавишного инструмента. Естественно, все умеющие играть на каком-либо инструменте способны выдержать этот тест.

Упражнения на слышание биений проделываются до тех пор, пока не появится уверенность в распознании биений в хорах всех трех

регистров фортепиано. Только успешно освоив первое упражнение, начинающий может надеяться на наличие у себя данных, которые позволят ему стать настройщиком, по крайней мере, своего инструмента.

В соответствии с нашим намерением отрабатывать настройку на таких упражнениях, которые одновременно являются операциями настройки, приступим к первому шагу, с которого начинается этот процесс.

Настройка унисона. Первыми настраивают струны хора *ля*[1] по камертону с частотой 440 Гц. Здесь три отдельные операции:

— настройка правой струны по камертону,
— настройка средней струны по правой и
— настройка левой струны по средней и правой

(при настройке рояля первой настраивается левая струна, потом средняя и правая).

Первая настраиваемая по камертону струна задает общую высоту строя клавишного инструмента. Если нет каких-либо особых причин выдерживать эту высоту очень точно, то можно допустить погрешность общей высоты настройки — одно биение за 2—4 с, что не выходит за пределы нормы, допускаемой стандартом — $\pm 0{,}5$ Гц. Более точная установка высоты строя нужна при игре с другим инструментом, имеющим также фиксированную настройку,— другим клавишным или язычковым инструментом.

Находим по движению молоточка клавиши *ля*[1] соответствующий хор и вставляем резиновый клинок между левой и средней струнами (этот рабочий момент в дальнейшем мы особо указывать не будем, как само собой разумеющийся). Разные положения клинка при настройке хора показаны на схеме 21 а, б, в.

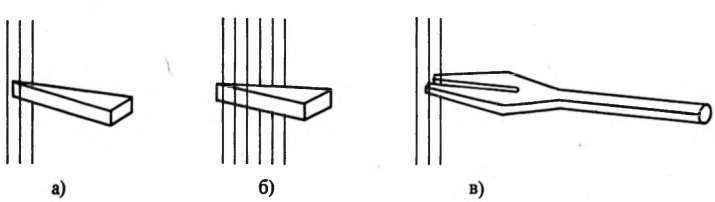


Схема 21. Заглушение струн клинками

Заглушение одной из струн двухструнного хора производится вставкой клинка между соседними хорами. Устанавливаем настроечный ключ рукояткой вверх и чуть влево на нижний вирбель хора *ля*[1], соответствующий правой струне; убеждаемся в плотной посадке головки ключа на вирбеле. Берем камертон правой рукой за ножку, ударяем левой рукой клавишу *ля*[1], ударяем одной из вилок камертона по согнутому суставу кисти левой руки, подносим камертон параллельно уху и вслушиваемся в биение совместного звучания струны и камертона. Повторяем эту операцию 2—3 раза и запоминаем часто-

ту биений. Затем одновременно с ударом по клавише поворачиваем вирбель на минимальный угол по часовой стрелке и снова слушаем биения совместного звучания струны и камертона, отмечая изменения частоты биений. Сразу же решаем вопрос: правильно ли было выбрано направление вращения вирбеля? Уменьшение числа биений сигнализирует о том, что направление поворота вирбеля было выбрано правильно, увеличение — наоборот, о том, что направление поворота выбрано ошибочно.

Начинающий может быть сначала неуверен в том, меньше или больше стала частота биений после поворота вирбеля (это может быть и на самом деле, когда случайно струну расстроили на такую же величину, перейдя через нуль биений). В этом случае рекомендуется сделать больший поворот вирбеля против часовой стрелки до появления частых и потому хорошо заметных биений.

В кратком изложении настройка первой струны по камертону будет проходить в такой последовательности:

— удар по клавише и по камертону — слуховой контроль биений,

— поворот вирбеля ключом на минимальную величину. Такая последовательность повторяется до тех пор, пока биения при сравнении звуков камертона и струны не исчезнут. Практически считается, что унисоны области темперирования *ля — ля*^{1} настроены правильно, если одно биение прослушивается за 10 сек.

Перейдем теперь к настройке средней струны хора *ля*^{1}. Вставляем клинок между левой струной хора *ля*^{1} и правой струной хора *ля-бемоль*^{1}, оставляя свободными среднюю и правую струны, устанавливаем настроечный ключ на среднем вирбеле хора *ля*^{1}, ударяем по клавише *ля*^{1}, слушаем биения двух струн хора и после незначительного поворота ключа, ударив вновь по клавише, определяем характер изменений биений. При уменьшении частоты биений продолжаем поворачивать ключ в ту же сторону, при увеличении частоты биений поворачиваем ключ в противоположную сторону. Если на первых порах нет уверенности в отсутствии биений, то можно незначительным поворотом ключа против часовой стрелки опустить струну, что вызовет частые биения, и затем, периодически ударяя по клавише и подтягивая струну вверх, поворотом вирбеля по часовой стрелке, вслушиваясь в уменьшающиеся биения, добиваемся их исчезновения. В дальнейшем при накоплении опыта уже не будет нужды в резкой расстройке унисона поворотом ключа, что само по себе является нежелательной операцией, так как снижает надежность держания строя вирбелем. На первых порах погоня за точным унисоном будет похожа на попытку поставить карандаш на острие. В самый последний момент вдруг опять появляются биения, если не знать, как правильно работать с настроечным ключом, подходя к точному унисону. Допустим, мы пришли к такому положению вирбеля и струны, когда малейший поворот ключа и по часовой стрелке, и против вызывает увеличение биений, а чистого унисона еще нет. Это значит, что наступил момент, когда точная установка вирбеля должна производиться не поворотами, пусть даже минимальными, а очень легкими толчками, даже только нажимом кисти на рукоятку ключа.

При настройке пианино, как мы уже знаем, рукоятка ключа расположена вертикально или почти вертикально. В этом положении легкие импульсивные движения рукоятки делают в направлении: вправо — от себя (или вправо — вверх), когда необходимо повысить частоту струны, и влево — к себе (или влево — вниз), когда необходимо понизить частоту. Легкими толчками по рукоятке, слабым нажимом пальцами в указанном направлении с одновременным ударом по клавише вслушиваемся в высокочастотные биения и, устраняя их, добиваемся чистоты звучания унисона.

Настройку левой струны хора *ля*^{1} производят по настроенной средней струне (при этом правую струну можно заглушить). Последнее не обязательно, когда удалось добиться чистого унисона ранее настроенных струн.

Закончив настройку всех струн хора *ля*^{1}, надо еще раз проконтролировать получившийся результат: снова сверить звучание одной правой струны со звучанием камертона. Не исключено, что биения вновь стали чаще, чем одно биение за 2—4 секунды, ведь, начиная учиться настраивать хор, мы наверняка сделали много лишних ударов по клавише, что могло расстроить первую струну. К тому же при первых попытках и сам вирбель мог быть установлен не в устойчивое, стабильное положение. Этого тоже надо уметь добиваться, даже чувствовать, в устойчивом ли положении мы оставили вирбель. Проверку устойчивости системы «вирбель — струна» произведем с помощью достаточно сильного удара по клавише. Такой проверкой в дальнейшем необходимо заканчивать настройку каждого хора. Если после первого прохода настройки струн хора *ля*^{1} в нем образуются биения, то струны еще раз подстраивают, выявляя сначала расстроенную струну поочередным заглушением одной струны и прослушиванием и оценкой точности настройки оставшейся пары.

На данном этапе мы настраивали три унисона, то есть три струны хора *ля*^{1}. Для закрепления навыка настройки чистых унисонов возьмите другие тона инструмента, например фа^1 и до^1, подстроив среднюю и левую струну к правым.

Признаки точной настройки унисона. Умение точно настраивать унисоны струн является настолько важным для профессионализма настройки, что целесообразно более подробно остановиться на этом вопросе.

Как добиться устранения биений в унисоне? С частыми биениями начинающий настройщик научится справляться быстро: они хорошо слышны, и поворотом настроечного ключа можно резко изменять характер биений от быстрых до медленных. Но вот биения стали редкими, слабыми, плохо различимыми на слух. С одной стороны, такие биения плохо воспринимаются, а с другой стороны, в какую сторону ни вращай ключ, унисон остается плохо настроенным. Тут надо знать некоторые тонкости рабочих приемов чистой настройки унисонов, которые хорошо знакомы опытным настройщикам.

Во-первых, надо уметь слушать и слышать высокочастотные биения, которые возникают между верхними обертонами. Как научиться их слышать? Надо знать, что частота биений растет с увеличением

номера совпадающих обертонов: для октавных обертонов частота биений в два раза больше, для квинтовых обертонов в три раза больше, для квартовых обертонов частота биений в четыре раза больше, чем частота биений основных тонов (первых гармоник). Следовательно, устранив нижние биения между первыми гармониками, нам надо еще вслушиваться в биения верхних обертонов, которые гораздо чувствительнее реагируют на малейшее несовпадение частот настраиваемых струн. Поэтому унисон будет только тогда хорошо настроен, когда будут устранены и высокочастотные биения — слабые, дрожащие «звучки», «петухи». Они бывают настолько слабы, что неопытный слух теряется в догадках: есть ли биения для верхних пар обертонов или их уже нет? Безошибочен следующий прием, подсказывающий нам ответ на вопрос — точно или не совсем настроен унисон двух струн? Надо сравнить звучание одной струны (например, правой, настроенной по камертону) *ля*^{1} с совместным звучанием средней и правой струны того же хора: вставляем клинок между третьей и второй струнами, заглушая их, ударяем по клавише и вслушиваемся в спокойное, матовое по тембру звучание одиночной струны. Теперь заглушаем только одну струну, ударяем по клавише и сопоставляем тембр нового звучания с первым, вслушиваемся в малейшие различия оттенков тембра. Если во втором звучании хоть немного изменился тембр, что-то новое возникло в звуке, то это значит, что унисон настроен не совсем точно. При точной настройке унисона тембр будет одинаков — что для одной правой струны, что для средней и правой струн вместе. Если разница возникает, то она, как правило, заключается в появлении высокочастотных биений верхних обертонов, «звучков», «петушков» (к сожалению, установленной терминологии не существует).

Во-вторых, момент точной настройки струн в унисоне узнается по резкому затуханию звучания хора. Звук с точным унисоном становится субъективно даже менее громким, он как бы пропадает, проваливается, если сравнивать его с чуть расстроенным унисоном. По этой причине, кстати, некоторые музыканты не любят очень точную настройку унисонов. Но начинающему настройщику на первых порах необходимо стремиться именно к чисто настроенному унисону. Это потом в унисонах само собой появится некоторая доля биений, которые и будут несколько оживлять звук, делать его несколько более громким (субъективно, т. е. на слух).

В-третьих, увеличение расстройки двух струн в унисоне проявляется в изменении тембра к более резкому, дребезжащему. Сближение частые биения, что говорит лишь о той или иной степени расстройки интервала в разных парах струн.

В качестве упражнения, впрочем, необязательного, можно проделать настройку чистыми квинтами и чистыми квартами для того, чтобы убедиться в реальности существования коммы. Например, в исходном хоре *ля*^{1} настраиваем две правые струны. Далее чистыми квинтами и квартами настраиваем одни левые струны хоров области темперирования. Последним интервалом будет настроена левая струна *ля*^{1}. Разница высоты этой последней струны квинто-квартового

и октавах. Но при такой экспресс-настройке, как правило, нельзя достичь высокой точности. При распознавании точности настройки унисона только по тембру в течение одной секунды гарантируется ошибка настройки не хуже одного биения в с, и при черновой настройке этого может быть достаточно. Потом, при втором проходе необходимо слушать звучание до его затухания (насколько позволяет длительность колебаний, не более 10 с) и подстраивать унисон до устранения биений в течение этого времени.

В-четвертых, при доведении необходимой точности настройки в интервалах окончательное положение струны достигается буквально легкими толчками кисти или даже легким давлением пальцев на рукоятку ключа вверх-вправо или вниз-влево.

В процессе выполнения первых операций-упражнений настройки начинающий должен овладеть рядом специфических приемов работы с настроечным ключом и навыков слухового контроля биений, уяснить общую последовательность операций, выполняемых при настройке унисона в хоре струн. Возможно, не все вначале будет понятно и усвоено. Тут годится только одна рекомендация: чтобы уметь настраивать унисоны, их надо настраивать. Банальная, но безошибочная рекомендация. Хочу посоветовать читателю внимательно прочитать предыдущий текст и подчеркнуть карандашом те слова и предложения, которые кажутся данному читателю важными, новыми, ключевыми. Это поможет быстрее, в конечном счете, освоить и усвоить материал.

Следующая операция: настройка октавы. Последовательность шагов:

— настройка правой струны хора *ля* по струне хора *ля*^{1},
— настройка средней струны хора *ля* по правой и
— настройка левой струны по средней (и правой).

Начнем настройку октавы *ля* по отдельной (правой) струне *ля*^{1}, убедившись еще раз в точности настройки последней по камертону. Заглушаем среднюю и левую струны хоров *ля*^{1} и *ля* для облегчения контроля настройки в других струнах. (В дальнейшем с приобретением опыта струны хора, по которому идет настройка октавы, оставляют незаглушенными.) Ударяем одновременно по клавишам *ля*^{1} и *ля*, вслушиваемся в биения и запоминаем их частоту. Отсутствие биений является признаком точности октавы, но скорее всего мы услышим биения. Пока не ясно, в какую сторону необходимо вращать вирбель, но так как строй инструмента со временем имеет тенденцию опускаться, то во многих случаях первым правильным направлением будет поворот вирбеля по часовой стрелке, на повышение струны.

Снова ударяем по клавишам октавы и, практически одновременно с ударом, подтянем струну, следя за изменением частоты биений. При уменьшении числа биений в октаве продолжаем подтягивать струну *ля*. При увеличении частоты биений изменяем направление поворота вирбеля на противоположное. Повторяем последовательность: удар по клавишам — поворот ключа — контроль частоты биений до устранения их в звучании октавы. Спокойное, ровное,

даже чуть глуховатое и без высокочастотных биений звучание будет сигнализировать о точности настройки.

После настройки правой струны *ля* подстраиваем к ней в унисон среднюю и левую струны хора по методике, изложенной выше.

На данном этапе у начинающего еще нет полной уверенности в качестве настройки октавы, не хватает опыта. Достижение уверенности и выработка навыка появятся после настройки десятков и сотен октавных интервалов, а пока для лучшего усвоения октавной настройки сделайте такие упражнения:

— настроить правую струну *ля* по правой струне $ля^1$,

— настроить левую струну *ля* по левой струне $ля^1$,

— настроить среднюю струну *ля* по средней струне $ля^1$ (в этом случае нужно четыре клинка — по два для заглушения крайних струн хоров *ля* и $ля^1$). Оценить качество получившихся унисонов *ля*. Вряд ли с первого раза этот хор будет иметь безупречные унисоны, так как струны настраивались по разным струнам хора $ля^1$, которые сами могут быть настроены не совсем идеально.

Поупражняемся еще в настройке октавы *ля* — $ля^1$:

Настроить по очереди правую, среднюю и левую струны *ля* по одной и той же струне $ля^1$ (например, по правой). Проверить и оценить точность получившихся унисонов *ля*. В этом случае по качеству унисонов хора *ля* можно судить в определенной степени о точности настройки октав: правая струна $ля^1$ — правая струна *ля*; правая струна $ля^1$ — средняя струна *ля*; правая струна $ля^1$ — левая струна *ля*. Если нет биений в хоре *ля*, то это значит, что октавы настраивались точно (правда, остается такой маловероятный случай, когда все три октавы настроены неправильно, но с одной и той же ошибкой,— тогда унисон тоже будет правильным).

Настроить в том же порядке октавы хоров $ля^1$ — $ля^2$ и оценить точность получившейся настройки унисонов $ля^2$.

Последние упражнения предназначены только для отработки навыка настройки октав. В реальной настройке поступают в упрощенном порядке: сначала настраивается в октаву одна из струн хора, потом к ней в унисон подстраиваются остальные струны. Упражнения на настройку унисонов и октав необходимо продолжать до приобретения навыка уверенного установления правильной высоты струн в этих интервалах. Эти интервалы дают возможность четко слышать биения и уяснить саму процедуру настройки, приобрести навык действий с настроечным ключом. Услышав и уяснив характер изменения биений от редких к частым (и наоборот) в унисоне и октаве, легче перейти к настройке по биениям струн в других интервалах — квинтах и квартах, больших и малых терциях и секстах.

Основная практика настройки унисонов и октав начнется после овладения настройкой струн квинтами и квартами в области темперирования. Скажем здесь, что примерно 60% всех настраиваемых интервалов — унисоны, 35% — октавы и около 5% — квинты и кварты области темперирования. В среднем регистре октавы настраивать достаточно легко. Труднее настраивать октавы на самых край-

них участках диапазона фортепиано: там ниже чувствительность уха, а в дисканте, кроме того, требуется еще и умение ювелирной работы с настроечным ключом.

Настраивать сразу без определенного опыта октавы в нижнем и верхнем регистрах не рекомендуется. В дальнейшем, после овладения настройкой области темперирования *ля — ля*^{1}, необходимо будет настраивать все более и более низкие и более и более высокие октавы, и появляющийся навык будет способствовать преодолению трудностей настройки октав крайних участков диапазона.

Приступая к описанию шагов настройки области темперирования, сделаем несколько общих замечаний:

1. Для обучения настройке области темперирования инструмент не должен иметь слишком большую расстройку. В противном случае инструменту нужно делать цвиковку с использованием мелодических интервалов, о чем говорилось выше.

2. Напомним, что если настраивают нижний тон квинты, то сужение интервала ведется повышением этого тона. Если же настраивают верхний тон квинты, то сужение осуществляют понижением его. В темперации кварты, которая должна быть шире чистой, поступают наоборот.

3. Начинающему важно знать также, что настройка области темперирования одними квинтами и квартами не позволяет достичь хороших результатов даже опытным настройщикам. Поэтому нужно как можно ранее включать в контрольные интервалы малые и большие терции и сексты.

Если контролировать только квинты и кварты, то другие интервалы могут получиться нерегулярными, неравномерными, и это сказывается на неравномерности тембровой окраски аккордов (особенно квартсекстаккордов).

Начинающий настройщик вполне достигнет приемлемого результата, если будет черновую настройку делать квинтами и квартами, а точную доводку тонов по высоте будет осуществлять терциями и секстами.

Тренировка в слушании квинт и кварт состоит в уяснении характера звучания этих интервалов. Целесообразно в хорах выбранной квинты (или кварты) оставить, например, открытыми правые струны и, играя интервал гармонически, вникнуть, вслушиваясь в биения, в музыкальную структуру интервала. Найти, какие пары струн квинтовых тонов дают редкие биения, какие, может быть, частые биения, что говорит лишь о той или иной степени расстройки интервала в разных парах струн.

В качестве упражнения, впрочем, необязательного, можно проделать настройку чистыми квинтами и чистыми квартами для того, чтобы убедиться в реальности существования коммы. Например, в исходном хоре *ля*^{1} настраиваем две правые струны. Далее чистыми квинтами и квартами настраиваем одни левые струны хоров области темперирования. Последним интервалом будет настроена левая струна *ля*^{1}. Разница высоты этой последней струны квинто-квартового

круга и остальных двух струн хора *ля*^{1} и покажет (конечно, с какой-то ошибкой) наличие пифагоровой коммы. По количеству биений можно определить численно интервальный коэффициент коммы, дающей около 5,5 биений в с.

Можно прослушать и музыкальный результат такой чистой настройки проигрыванием хроматической гаммы и аккордов. В разных тональностях характер звучания аккордов будет различным и в некоторых случаях совершенно неудовлетворительным.

Операция: настройка квинт и кварт области темперирования. Проверяем правильность настройки правой струны *ля*^{1} по камертону и правильность настройки октавы *ля* — *ля*^{1} (по правым струнам хоров). При необходимости устраняем биения и октаве.
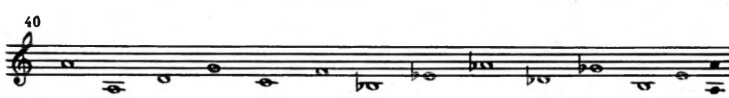
Настройку всех квинт и кварт области темперирования будем вести по правым струнам хоров пианино и по левым струнам хоров рояля.

В абсолютном большинстве планов настройки области темперирования после тона *ля*^{1} и его октавы *ля* настраивают либо тон *ре*^{1}, либо тон *ми*^{1}.

Выбор *ре*^{1} или *ми*^{1} предопределяет две разновидности самых распространенных планов темперирования (см. нотные примеры 40, 41).

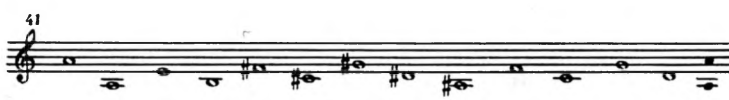
Настройщики пользуются и тем и другим или даже половину области темперирования ведут по одному плану, а половину — по другому (нотный пример 42). Каждый план имеет некоторые свои преимущества, по-разному, правда, доступные и оцениваемые начинающими и профессионалами.

40



План настройки области темперирования (на повышение)

41



План настройки области темперирования (на понижение)

Выбирая тон *ре*^{1}, мы настраиваем его в квинту от *ля*^{1} и в кварту от *ля*. Выбирая тон *ми*^{1}, настраиваем его в кварту от *ля*^{1} и в квинту от *ля*. Чем хорош тот или иной вариант начала?

Тон *ре*^{1} легко настроить точно из-за его специфического положения по отношению к звукам октавы *ля* — *ля*^{1}: нижняя кварта *ля* — *ре*^{1} и верхняя квинта *ре*^{1} — *ля*^{1} имеют одинаковое число биений — 1 в секунду. Темперируя тон *ре*^{1} и сравнивая поочередно биения в нижней кварте с биениями в верхней квинте, добиваясь их одинаковости, мы точно настраиваем тон *ре*^{1}.

В настройке тона *ми*^{1} другое преимущество, связанное с выполнением рекомендации по правильной технике работы с настроечным ключом: заключительное движение рукоятки ключа желательно делать влево — вниз для обеспечения стабильности установки вирбеля. Этим же движением достигается понижение тона *ми*^{1} при темперировании чистой квинты *ля* — *ми*^{1}.

Настраивая триаду *ля* — *ре*^{1} — *ля*^{1}, мы одновременно отрабатываем настройку октавы, квинты и кварты. Все эти интервалы взаимосвязаны, и ошибка в настройке одного интервала контролируется настройкой других интервалов, и наоборот. Аналогичным образом настройка триады *ля* — *до*^{1} — *ля*^{1} помогает отрабатывать настройку октавы, малой терции и большой сексты, вводя начинающего наиболее легким путем в умение настраивать более трудные, но более чувствительные к погрешностям терции и сексты.

Впоследствии читатель сам решит, какой вариант начала настройки области темперирования для него более предпочтителен. Это решение появится в будущем, а мы осуществим оба варианта в следующей последовательности.

Настраиваем тон *ре*^{1}:

— заглушаем левые пары струн в хорах *ля*^{1}, *ре*^{1} и *ля*, оставляя правые струны для настройки;

— ставим ключ на вирбель правой струны хора *ре*^{1};

— ударяем одновременно по клавишам *ре*^{1} и *ля*^{1} и подтягиваем струну *ре*^{1} до получения одного биения в секунду. Напомним, что все квинты в равномерно-темперированном строе сужены, а все кварты расширены. Это нужно помнить твердо, поскольку при выборочном контроле интервалов придется корректировать и нижний и верхний тон, а без учета вида интервала легко можно ошибиться в выборе направления темперирования; если сразу трудно установить нужное сужение квинты, то рекомендуется квинту *ре*^{1} — *ля*^{1} сначала настроить чисто, без биений, а потом немного повысить струну *ре*^{1} до появления одного биения в секунду. Для ориентировки можно сопоставлять биение с ходом секундной стрелки часов — биения должны следовать в такт с движением стрелки; контролируем правильность настройки *ре*^{1}. Это легко сделать сравниванием биений в кварте *ля* — *ре*^{1} и в квинте *ре*^{1} — *ля*^{1}. В обоих интервалах число биений одинаковое — одно в секунду. Ударяем пятым и вторым пальцами левой руки по клавишам *ля* и *ре*^{1}, запоминаем характер биений и затем ударяем вторым и первым пальцами левой руки по клавишам *ре*^{1} и *ля*^{1}. Сопоставляем биения в этой паре кварты — квинты. Настройкой правой струны *ре*^{1} добиваемся равенства биений в интервалах, схожести тембра звучания нижней кварты и верхней квинты. Может оказаться, что равенства биений получить не удается. Это сигнализирует о том, что октава настроена не совсем точно. Задача заключается в том, чтобы, подстраивая правые струны *ре*^{1} и *ля*, добиться одновременного выполнения требования равенства биений в кварте и квинте при одновременном отсутствии биений в октаве *ля* — *ля*^{1}. Нелишним будет еще раз убедиться также в правильности настройки правой струны

я^1 в унисон с камертоном. После достижения указанных требований получим правильно темперированную кварту и квинту и точно настроенную октаву, то есть точно настроим тона *ля*, *ре*^{1} *ля*^{1}.

Переходим к настройке тона *ми*^{1}:

- заглушаем левые струны *ля*, *ми*^{1} и *ля*^{1} и ставим ключ на вирбель правой струны *ми*^{1};
- ударяем одновременно по клавишам *ля* и *ми*^{1}, подтягиваем струну (правую) *ми*^{1} и контролируем изменение биений в квинте *ля* — *ми*^{1}. Повторяем данную последовательность и настраиваем квинту сначала чисто, без биений. При перетягивании — опускаем струну;
- темперируем чистую квинту: ударяем по клавишам *ля* и *ми*^{1} и легко нажимаем на рукоятку ключа влево — вниз до появления чуть меньше одного биения в секунду (точно 0,74 б/с) или одного биения за 1,35 с. Мы сузили квинту понижением верхнего звука интервала. В других квинтах может оказаться необходимым сужение квинты осуществлять повышением нижнего звука. Конечное требование одинаково — около одного биения в с для квинт области темперирования. Не надо смущаться, что на слух требуемое число биений в данной квинте получить можно лишь приближенно. Сейчас этого будет достаточно.

Потом, при дальнейшем темперировании интервалов появятся и контрольные интервалы, которые помогут точнее установить настройку *ми*^{1}. На данном этапе уже имеется возможность контроля, которым, правда, без опыта трудно воспользоваться: необходимо равнить частоту биений в квинте *ля* — *ми*^{1} (0,74 б/с) с частотой биений в кварте *ми*^{1} — *ля*^{1} (1,49 б/с). Видно, что в верхней кварте частота биений в два раза больше, чем в нижней квинте. Но и без особого опыта такое сравнение позволит избежать слишком грубой ошибки.

При настройке интервалов квинт и кварт ориентируются на нижние биения, они должны иметь требуемое число биений в с (т. е. примерно 1 и 1,4 б/с для области темперирования). Однако с приближением к диапазону 0 — 1 б/с биения становятся трудноуловимыми (по крайней мере, для начинающего), и тут помогает слуховая опора на высокочастотные биения, лежащие на октаву выше основных биений. Поэтому, настраивая квинту или кварту, обращайте внимание и на основные, и на октавные биения. Последние более слабые, но, как ни парадоксально, они становятся более заметными, когда основные биения становятся редкими. Необходимо только помнить, что октавные биения (высокочастотные «звучки») дают частоту в два раза большую по сравнению с основными биениями.

Таким образом, оставляя в области темперирования в квинтах примерно по два, а в квартах по три высокочастотных биения в с, мы получим правильно темперированные интервалы.

Характер биений, тембр звука одинаков и в сторону сужения, и в сторону расширения квинты и кварты. Поэтому, добиваясь таких единичных биений вблизи нулевой зоны, можно ошибиться

и попасть в неправильную зону (сужения вместо расширения, и наоборот). То есть нулевые биения при настройке квинт и кварт легко проскочить, что обрекает на неудачу всю дальнейшую настройку. Так, настраивая нижнюю кварту и верхнюю квинту по общему звуку *ре*[1] (с нижним *ля* и с верхним *ля*[1]), можно сделать ошибку, темперируя интервалы в неправильную сторону. Например, получить суженную нижнюю кварту и расширенную верхнюю квинту. При этом можно достичь такого же тембра с одним биением в с, который есть и у правильно темперированных интервалов. Однако использование сужения кварты вместо расширения и расширения квинты вместо ее сужения приводит к непригодному результату настройки квинто-квартового круга. Этой ошибки надо старательно избегать.

Но как быть, если вдруг потеряна уверенность в правильном направлении темперирования интервалов? Самый простой прием — начать настройку интервала сначала, то есть резко понизить настраиваемую струну и осторожно подтягивать ее, следя за наступлением момента сужения (расширения). Данный прием не самый хороший — тратится впустую время, излишне расшатывается гнездо вирбеля.

Целесообразен следующий прием определения направления темперирования интервала. Допустим, настраивается квинта и в ее звучании слышно одно биение в секунду, но нет уверенности в том, сужена эта квинта или расширена? Допустим также, что корректировку интервала мы делаем с помощью нижнего звука. Тогда мы, не вращая вирбеля, осторожно нажимаем на рукоятку ключа от себя вверх и заставляем вирбель чуть изогнуться вверх. Ударяем по клавишам интервала и вслушиваемся в изменение частоты биений. Если биения стали чаще, чем было, то значит, квинта была правильно сужена. В противном случае уменьшение биений выявит неправильность темперирования квинты — ее расширение.

После снятия давления на вирбель последний возвращается в свое первоначальное положение, квинта снова будет с тем же количеством биений, и если настройка перед проверкой была правильной, то мы избавимся от необходимости повторного выполнения операции (потребуется, может быть, только уточнение на требуемое число биений). Если вирбель перед данной проверкой уже был слегка отклонен вверх, то проверку делают противоположным давлением на рукоятку — к себе вниз. Уменьшение числа биений в квинте (при нижнем корректируемом звуке) также выявит правильность направления темперирования квинты. При увеличении числа биений — неправильное начальное расширение квинты. Все изгибы вирбеля должны быть очень легкими.

В таблице на с. 180 дана подробно дальнейшая последовательность настройки тонов области темперирования и целесообразные для проверки контрольные интервалы.

План настройки области темперирования

Номер шага настройки*	Обозначение тонов**	Интервал***	Число биений в секунду****	
			биения основные	октавные биения (квинт и кварт)
1	ля^1 — ля	октава	0,0	
2	ля^1 — ре^1	квинта—	1,0	2,0
	ля — ре^1	кварта+	1,0	2,0
3	ре^1 — соль^1	кварта+	1,3	2,6
4	соль^1 — до^1	квинта—	0,9	1,8
	ля — до^1	м. терция—	11,9	
	до^1 — ля^1	б. секста+	11,9	
	до^1 — соль^1	квинта—	0,9	1,8
	ре^1 — ля^1	квинта—	1,0	2,0
5	до^1 — фа^1	кварта+	1,2	2,4
	ре^1 — соль^1	кварта+	1,3	2,6
	до^1 — ля^1	б. секста+	11,9	
	фа^1 — ля^1	б. терция+	13,9	
6	фа^1 — си-бемоль	квинта—	0,8	1,6
	до^1 — соль^1	квинта—	0,9	1,8
	ре^1 — ля^1	квинта—	1,0	2,0
	си-бемоль — соль^1	б. секста+	10,6	
	ля — до^1	м. терция—	11,9	
7	си-бемоль—			
	ми-бемоль^1	кварта+	1,1	2,2
	до^1 — фа^1	кварта+	1,2	2,4
	ре^1 — соль^1	кварта+	1,3	2,6
8	ля — ми^1	квинта—	0,7	1,5
	си-бемоль^1 — фа^1	квинта—	0,8	1,6
	ре^1 — соль^1	кварта+	1,3	2,6
	ля — ми^1	кварта+	1,5	3,0
	до^1 — ми^1	б. терция+	10,4	
	си-бемоль — соль^1	б. секста+	10,6	
9	ми^1 — си	кварта+	1,1	2,2
	до^1 — фа^1	кварта+	1,2	2,4
	ре^1 — соль^1	кварта+	1,3	2,6
	си — ми-бемоль^1	б. терция+	9,8	
	до^1 — ми^1	б. терция+	10,4	
10	си — фа-диез^1	квинта—	0,8	1,6
	до^1 — соль^1	квинта—	0,9	1,8
	ре^1 — ля^1	квинта—	1,0	2,0
	си-бемоль — фа^1	квинта—	$<$0,8	$<$1,6
	си — фа-диез^1	квинта—	$>$0,8	$>$1,6
	ля — фа-диез^1	б. секста+	10,0	
	си-бемоль — соль^1	б. секста+	10,6	
11	фа-диез^1 —			
	до-диез^1	кварта+	1,2	2,4

* Здесь и в следующей таблице интервалы, не отмеченные номером шага настройки, являются контрольными.

** Первым указан опорный тон, вторым — настраиваемый тон.

*** В равномерной темперации сужены: квинты, малые терции и малые сексты; расширены: кварты, большие терции и большие сексты;

*** Частота биений дана с округлением до 0,1. Скобка обозначает попарное сравнение биений интервалов.

Номер шага настройки*	Обозначение тонов**	Интервал***	Число биений в секунду****	
	ре^1 — соль^1	кварта+	1,3	2,6
	до^1 — фа^1	кварта+	<1,2	<2,4
	до-диез^1 — фа-диез^1	кварта+	>1,2	>2,4
	ля — до-диез^1	б. терция+	8,7	
	си-бемоль — ре^1	б. терция+	9,2	
	ля — до-диез^1	б. терция+	8,7	
	до-диез^1 — фа^1	б. терция+	11,0	
	фа^1 — ля^1	б. терция+	13,9	
12	до-диез^1 — соль-диез^1	квинта—	0,9	1,8
	ре^1 — ля^1	квинта—	1,0	2,0
	до^1 — соль^1	квинта—	<0,9	<1,8
	до-диез^1 — соль-диез^1	квинта—	>0,9	>1,8
	ми^1 — соль-диез^1	б. терция+	13,1	
	фа^1 — ля^1	б. терция+	13,9	
	си-бемоль — соль^1	б. секста+	10,6	
	си — соль-диез^1	б. секста+	11,2	
	до^1 — ля^1	б. секста+	11,9	
	до-диез^1 — фа^1	б. терция+	11,0	
	си — соль-диез^1	б. секста+	11,2	
13	соль-диез^1 — ре-диез^1	кварта+	1,4	2,8
	ми^1 — ля^1	кварта+	1,5	3,0
	ре^1 — соль^1	кварта+	1,3	2,6
	ре-диез^1 — соль-диез^1	кварта+	1,4	2,8
	си-бемоль^1 — ре^1	б. терция+	9,2	
	си — ре-диез^1	б. терция+	9,8	
	до^1 — ми^1	б. терция+	10,4	
	си — ре-диез^1	б. терция+	9,8	
	ля — фа-диез^1	б. секста+	10,0	

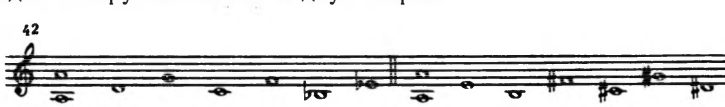
Вариант начала настройки области темперирования

Номер шага настройки	Обозначение тонов	Интервал	Число биений в секунду	
			основные биения	октавные биения (квинт и кварт)
1	ля^1 — ля	октава	0,0	
2	ля^1 — ре^1	квинта—	1,0	2,0
	ля — ре^1	кварта+	1,0	2,0
3	ля^1 — до^1	б. секста+	11,9	
	ля — до^1	м. терция—	11,9	

Номер шага настрой-ки*	Обозначение тонов**	Интервал***	Число биений в секунду****	
			биения основные	октавные биения (квинт и кварт)
4	до^1 — соль^1	квинта—	0,9	1,8
	ре^1 — ля^1	квинта—	1,0	2,0
	ре^1 — соль^1	кварта+	1,3	2,6
5	до^1 — фа^1	кварта+	1,2	2,4
	ре^1 — соль^1	кварта+	1,3	2,6
6	фа^1 — си-бемоль	квинта—	0,8	1,6
	до^1 — соль^1	квинта—	0,9	1,8
	ре^1 — ля^1	квинта—	1,0	2,0
7	си-бемоль — ми-бемоль^1 (лев. стр.)	кварта+	1,1	2,2
	до^1 — фа^1	кварта+	1,2	2,4
	ре^1 — соль^1	кварта+	1,3	2,6
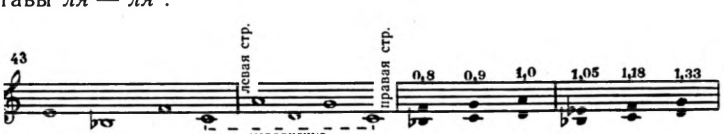
В идеальном случае последний настраиваемый в круге интер-ал должен получиться с правильным числом биений без коррек-ировки. Если так получилось, то это будет сильным основанием ля утверждения о правильности выполнения темперации. Но, как равило, после первого прохода квинто-квартовый круг оказывает-незамкнутым. Попадание в «десятку» с первого раза достигают лько долгой практикой.

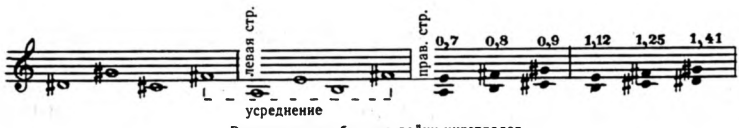
Уточняя настройку интервалов повторным прохождением квин--квартового круга с двух концов, то есть делая половину ходов аном на повышение, а половину ходов планом на понижение, мы идем к хору *ми-бемоль*^{1} с двух сторон:



Комбинированный план настройки области темперирования

В случае несовпадения настройки унисона *ми-бемоль*^{1} (*ре-з*^{1}) для левой и правой струн, настраивают среднюю струну дан-го хора так, чтобы она давала одинаковое число биений с край-ми струнами. Затем по средней струне выстраивают точно в исон весь хор *ми-бемоль*^{1}. Теперь необходимо обратными хода-по планам на повышение и на понижение разогнать ошибку стройки по оставшимся интервалам, закончив настройку на тонах гавы *ля — ля*^{1}:





Разнесение ошибок настройки интервалов

При аккуратной корректировке интервалов накопленная ошибка должна быть разогнана к тонам *ля*. Если же малая ошибка останется и в октаве *ля* — *ля*^{1}, то можно попробовать скорректировать и высоту этой октавы, при том условии, что будет соблюдаться требование равенства чисел биений в парах интервалов: нижняя кварта *ля* — *ре*^{1} — верхняя квинта *ре*^{1} — *ля*^{1} и в паре нижняя малая терция *ля* — *до*^{1} — верхняя большая секста *до*^{1} — *ре*^{1}. Корректировку высоты октавы *ля* — *ля*^{1} можно допустить, учитывая менее жесткое требование к точности установки высоты строя инструмента в пределах 440±0,5 Гц.

После настройки по одной струне хоров необходимо к ним подстроить остальные унисонные струны хоров. Если хоры настроены точно, то проверка звучания параллельными контрольными интервалами будет очень легкой; биения слышны очень четко, ясно, их нетрудно сравнить между собой. Но если в интервалах биения плохо прослушиваются, нечетки, то это признак того, что либо унисон, либо контрольные интервалы настроены не точно.

Проигрыванием последовательностей одноименных интервалов, например квинт и кварт, выявляют нерегулярности и сглаживают их. Для ориентировки приведем значения биений в контрольных интервалах.

Сравним восходящие интервалы:
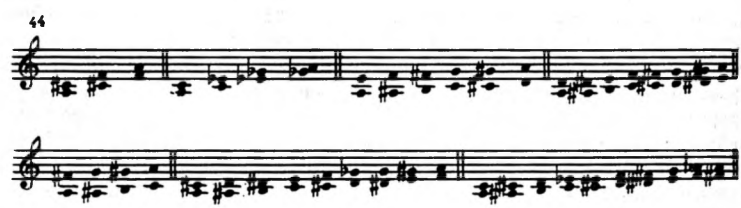
квинты — 0,75, 0,79, 0,83, 0,89, 0,94, 1,00;

кварты — 8,73, 9,25, 9,79, 10,38, 11,00, 11,66, 12,35, 13,08, 13,86;

б. сексты — 9,98, 10,58, 11,21, 11,87;

м. терции — 11,87, 12,58, 13,32, 14,12, 14,96, 15,84, 16,79, 17,78, 18,85, 19,96.

Последовательности интервалов с указанными значениями биений позволяют легко обнаруживать нерегулярности в равномерном увеличении или уменьшении частоты биений. Это сравнение восходящих или нисходящих интервалов является самым лучшим тестом правильности выполнения всей работы.



Контрольные интервалы области темперирования

Необходимо запомнить на слух также тембр правильно настроенных интервалов: чистого унисона, октавы, темперированных квинт, кварт, терций и секст. Это позволит сократить время при первой черновой настройке струн. Для точной настройки нужно контролировать и характер тембра и биения.

Одной из грубых ошибок начинающего настройщика является неправильная установка зоны биений тех или иных интервалов. А в этом случае квинто-квартовый круг никогда не сойдется. Поэтому начиная настраивать тон каким-либо интервалом, необходимо убедиться в правильности зоны биений, то есть выбора направления темперирования — сужения или расширения интервала. Нужно помнить: для расширения интервалов (кварт, больших терций и сексты) расширение интервала увеличивает частоту биений, сужение — уменьшает ее. Для суженных интервалов (квинт, малых терций и сексты) сужение интервалов увеличивает частоту биений, расширение интервала — уменьшает ее. Эти закономерности настройщик должен очень четко представлять, особенно если в процессе настройки используются другие, помимо квинты и кварты, интервалы.

Зона нулевых биений терций и сексты находится достаточно далеко, и меньше вероятность попадания в неправильную зону. Если же зона темперирования терций и сексты была установлена неправильно, то это легко обнаружить по резкому нарушению норм биений в других контрольных интервалах. Надо запомнить журчащий характер биений этих интервалов. Выравнивание биений и тембра в паре сопоставляемой малой терции и большой сексты позволяет точно вести настройку тонов.

Вслушиваясь в изменение биений в терциях и секстах, надо очень тонко оперировать настроечным ключом, почти без вращения ручки. Даже при медленных смещениях вирбеля здесь происходят большие изменения в количестве биений. Тут надо быть очень внимательным, чтобы не проскочить нужную область частоты биений и не отойти далеко от нужной ширины темперируемого интервала. Отметим также важность для цели контроля области темперирования и раннего выявления ошибок такого мощного средства, как настройка круга больших терций.

Необходимо достаточно много тренироваться в разбиении октавы области темперирования на три больших терции: *ля — до-диез*^{1}, *до-диез*^{1} — *фа*^{1}, *фа*^{1} — *ля*^{1}. Если при этом частоты биений в этих терциях в восходящей последовательности будут немного возрастать, то можно быть уверенным в правильной установке высоты этих тонов (с учетом правильности настройки октавы *ля — ля*^{1}). После овладения настройкой круга больших терций следует перейти к освоению и круга малых терций: *ля — до*^{1}, *до*^{1} — *ми-бемоль*^{1}, *ми-бемоль*^{1} — *соль-бемоль*^{1}, *соль-бемоль*^{1} — *ля*^{1}. Чем раньше будет освоена настройка черновых интервалов, тем увереннее, точнее и быстрее будет осуществляться настройка всей области темперирования.

Операция: настройка октав нижнего и верхнего регистров.

Последовательность настройки:
— настраиваем правую струну хора *ля-бемоль* в октаву по струнам хора *ля-бемоль*[1];
— настраиваем унисон струн хора *ля-бемоль*.

В той же последовательности по хроматической гамме настраиваем струны хоров нижнего регистра: *соль*, *соль-бемоль*, *фа*, *ми* и т. д. до $Ля_2$, затем струны хоров верхнего регистра: *ля-диез*[1], *си*[1], *до*[2], *до-диез*[2] и т. д. до *с*[5]. Настройка крайних регистров — не просто октавное разнесение области темперирования вниз и вверх. Фактически это продолжение темперирования всего остального звукоряда. Настройка октав начинается установлением нулевой зоны интервала, и чистовую доводку ведут парами интервалов: нижняя кварта — верхняя квинта и малая терция — большая секста, добиваясь одинаковости тембра звучания нижнего и верхнего интервалов, равенства в них чисел биений. С достижением тона *Фа* для проверки можно подключить и проверку интервалов, взятых с одним нижним звуком у большой терции и большой децимы. Пока у начинающего нет большого опыта, рекомендуется во всех хорах при настройке октавы оставлять по одной струне, чтобы возможная расстройка остальных струн хора не затрудняла точную установку интервала.

Контроль парами нижняя кварта — верхняя квинта и нижняя малая терция — верхняя большая секста целесообразен потому, что он помогает уточнять уже настроенные ранее тона в средней части настраиваемой октавы.

Настроив одну струну хора в октаве, необходимо убедиться в том, что биения в последовательностях одноименных интервалов (больших и малых терциях, децимах) на два-три шага вверх идентичны, то есть нет резкой непоследовательности в частоте биений соседних интервалов, нет скачкообразного изменения тембра в них. После этого в унисон подстраивают остальные струны хора.

Когда настраиваются унисон со струной, которая сама по себе дает заметные биения, то внимание подключается для контроля биений в начальный момент звучания, на максимальной громкости.

Слуховой контроль биений должен сознательно переключаться, когда нужно, на слушание начального момента звучания и на слушание биений в затухающей стадии звучания. Характер биений нередко не совпадает у начальной и затухающей стадии колебаний. Слышимость биений в контрольных интервалах различна по диапазону. Так, в большой и малой октавах хорошо прослушиваются биения в последовательностях малых терций, что может быть использовано в качестве контрольного теста правильности настройки.

В большой и контроктавах лучшими контрольными интервалами являются большие децимы, малые децимы, взятые в последовательности. В контроктаве и субконтроктаве хорошо слышны биения в терцдецимах, и их последовательности также могут быть использованы для проверки точности настройки октав в указанном участке диапазона.

В верхнем дискант лучше использовать другой тест — пару интервалов большая терция и большая децима, построенных от од-

ного и того же нижнего тона. Например, *фа — ля* и *фа — ля*[1]. Этот тест пригоден также для нижних октав басового регистра, начиная с $Ля_2$. Он является удобным и точным средством контроля низких октав, так как позволяет избежать трудного процесса установки нулевых биений.

Настройке струн самой нижней октавы необходимо уделить много внимания и терпения, проделать много упражнений для приобретения навыков и способностей настройки низких звуков. Ведь даже отклонение высоты струны *ля* субконтроктавы на интервал секунды плохо замечается нетренированным слухом.

В самых последних верхних двух октавах длительность звучания струн слишком коротка и сравнение биений становится трудным делом. Здесь могут быть рекомендованы, как уже указывалось, пара интервалов — большая терция и большая децима, а также контроль двойными октавами.

В басовом регистре при настройке унисонов и октав струны с большим количеством обертонов дают большее количество слышимых высокочастотных биений, и если устранять самые высокочастотные биения, то становятся хорошо заметными нижние, основные биения, особенно при настройке октав. То есть не удается избавиться либо от одних, либо от других биений в октаве. В этом случае ориентируются на достижение в октаве минимально редких, самых заметных по громкости биений, стараются свести к минимуму общий суммарный эффект биений.

Наиболее правильный ориентир при настройке октав басового регистра — достижение полного, глубокого, сочного тембра октавы, ощущения своеобразного «рычания» октавы.

В среднем регистре мало вероятен, но в верхнем регистре всегда может наблюдаться случай, когда сама отдельная струна дает биения. Поэтому в верхнем регистре не всегда удается идеально настроить унисон (в том числе и по другим причинам).

Когда одна струна в хоре звучит фальшиво, с биениями, то целесообразно сначала настроить другую струну и потом подстроить к ней фальшивую, стараясь в совместном звучании хора замаскировать фальшивость звучания. Конечно, когда этого не удается сделать, а требования музыканта высокие, остается один путь — заменены негодной струны на новую.

В реальной настройке идеально настроенных унисонов во всем диапазоне достичь трудно, а по музыкальным соображениям и не до конца целесообразно. На начальном этапе овладения настройкой к этому надо стремиться, но в конечном счете это дело квалификации настройщика и в некоторой степени индивидуального представления о качестве музыкального звука. Конечно, и качество изготовления самого инструмента ставит определенные ограничения. В хорошем инструменте легче достичь точной настройки унисонов, меньше встречается струн с биениями или посторонними призвуками.

В верхнем регистре, примерно последние две октавы, в целях подчеркивания верхних звуков октав возможно допустить незначи-

тельное их завышение (конечно, в пределах художественной музыкальной целесообразности). В этом случае квинты и кварты приблизятся к чистым, нетемперированным интервалам. Но тут, конечно, нужно соблюдать меру.

Что же касается качества первой настройки, то заметим одно: точность, уверенность и скорость настройки будут повышаться с каждым очередным самостоятельно настроенным инструментом. Оттачивать навыки настройки в дальнейшем будет его величество Опыт. Отберутся свои любимые планы настройки и контроля, проявится свой творческий почерк.

Даже опытный настройщик, если у него был перерыв в практике, должен в течение некоторого времени настраивать инструменты для восстановления навыков или, так сказать, своей «формы». Поэтому ничего удивительного не будет, если музыканту, настроившему свой инструмент несколько месяцев назад, придется как бы заново учиться настраивать. О такой потере квалификации необходимо знать и учитывать ее возвращение после новой серии настроек инструмента. В процессе упражнений постепенно обостряется чувствительность слуха и повышается способность точной настройки струн. Как и в музыке, в спорте, в настройке необходимо поддерживать форму периодической и по возможности частой тренировкой.

Помните:

Неработающий настроечный ключ ржавеет! — в прямом и переносном смысле.

Таблица частот звуков равномерно-темперированного строя, Гц

Наименование октавы	Название ноты					
	до	до-диез	ре	ре-диез	ми	фа
Субконтроктава	16,35159	17,32391	18,35404	19,44543	20,60172	21,82676
Контроктава	32,70318	34,64782	36,70809	38,89086	41,20344	43,65352
Большая	65,40637	69,29564	73,41618	77,78173	82,40688	87,30705
Малая	130,81275	138,59129	146,83236	155,56347	164,81376	174,61410
Первая	261,62551	277,18258	293,66472	311,12694	329,62752	349,22820
Вторая	523,25102	554,36516	587,32944	622,25388	659,25504	698,45640
Третья	1046,50204	1108,73032	1174,65888	1244,50776	1318,51008	1396,91280
Четвертая	2093,00408	2217,46064	2349,31776	2489,01552	2637,02016	2793,82560
Пятая	4186,00816	4434,92128	4698,63552	4978,03104	5274,04032	5587,65120

Наименование октавы	Название ноты					
	фа-диез	соль	соль-диез	ля	ля-диез	си
Субконтроктава	23,12465	24,49971	25,95654	27,50000	29,13523	30,86770
Контроктава	46,24930	48,99942	51,91308	55,00000	58,27047	61,73541
Большая	92,49860	97,99855	103,82617	110,00000	116,54094	123,47082
Малая	184,99720	195,99771	207,65234	220,00000	233,08188	246,94165
Первая	369,99440	391,99542	415,30469	440,00000	466,16376	493,88330
Вторая	739,98880	783,99084	830,60938	880,00000	932,32752	987,76660
Третья	1479,97760	1567,98168	1661,21876	1760,00000	1864,65504	1975,53320
Третья	2959,95520	3135,96336	3322,43752	3520,00000	3729,31008	3951,06640
Пятая	5919,91040	6271,92672	6644,87504	7040,00000	7458,62016	7902,13280

СПИСОК
ИСПОЛЬЗОВАННОЙ ЛИТЕРАТУРЫ

1. Льоцци М. История физики. М., 1970.
2. Левин С. Духовые инструменты в истории музыкальной культуры. Л., 1973.
3. Зимин П. Н. История фортепиано и его предшественников. М., 1968.
4. Скучик Е. Основы акустики. Том II. М., 1959.
5. Римский-Корсаков А. В., Дьяконов Н. А. Музыкальные инструменты. М., 1952.
6. Trendelenburg F. Einführung in die Akustik. Berlin — Heidelberg, 1961.
7. Tillson B. F. Musical acoustics.— Audio engineering. June, 1947.
8. Гарбузов Н. А. Зонная природа динамического слуха. М., 1955.
9. Helmholtz v. H. Die Lehre von den Tonempfindungen. Braunschweig, 1913.
10. Fuchs H. Piano tuning and acoustical research.— The piano technicians journal. V. 8, № 2. Washington, 1965.
11. Гарбузов Н. А. Зонная природа звуковысотного слуха. М., 1948.
12. Irmann K. Počet rázu v temperovaných intervalech.— In: Hudebni Nástroje. Prosinec, № 6. Hradec Králové, 1969.
13. Богино Г. К. Современная настройка фортепиано.— В кн.: Музыкальное искусство и наука. М., 1970.
14. Railsback O L. Study of piano tuning.— The Journal of the Acoustical society of America. V. 37, № 9, 1937.
15. Meinel v. H. Musikinstrumentenstimmungen und Tonsysteme.— Acustica. V. 7, 1957.
16. Young R. W., Schuck O. H. Observations on the Vibrations of Piano Strings.— The Journal of the Acoustical society of America. V. 15, № 1, 1943.
17. Гарбузов Н. А. Музыкант, исследователь, педагог. Сборник статей. Ред. Ю. Н. Рагс. М., 1980.
18. Fuchs N., Fenner K. Den Klavierklang weiter erforscht.— Instrumentenbau-Zeitschrift, № 1, 1967.
19. Meinel v. H. Zur Stimmung der Musikinstrumente.— Acustica. Vol. 4, № 1, 1954.
20. Young R. W. Effect of moisture on piano tuning.— The Journal of the Acoustical society of America. Vol. 21, 1949.
21. Lieber E. Erfahrungen bei der Stimmungsmessung an Pianos.— Das Musikinstrument, № 1, 1977.
22. Harker G. T. H. The Principle Underlying the Tuning of keyboard Instruments to Equal Temperament.— The Journal of the Acoustical society of America. V. 8, 1937.
23. Kirk R. E. Tuning Preferences for Piano Unison Groups.— J. A. S. A. Vol. 31, № 12, 1959.
24. Морозов В. П. Тайны вокальной речи. Л., 1967.
25. Meyer J. Vibrato am besten 6 bis 8Hz.— Instrumentenbau-Zeitschrift, № 11, 1968.
26. Володин А. А. Роль гармонического спектра в восприятии высоты и тембра звука.— В кн.: Музыкальное искусство и наука. М., 1970.
27. Цвикер Э., Фельдкеллер Р. Ухо как приемник информации. М., 1971.
28. Порвенков В. Г. Способ настройки язычковых инструментов с розливом. А. с. СССР № 879638, М., 1979.

29. Порвенков В. Г. Выбор розлива язычкового инструмента. Вып. 4. М., 1973.
30. Howe A. H. Scientific Piano Tuning and Servicing. Mount Vernon, New York, 1963.
31. Дьяконов Н. А. Рояли и пианино. М., 1964.
32. Фадеев И. Г. Аллон С. М. Ремонт и настройка пианино и роялей. М., 1973.
33. Зимин П. Н. Руководство по уходу за фортепиано. М., 1959.
34. Снитко-Сорочинский Л. К. Настройка и ремонт фортепиано. М., 1974.
35. Murata K. Sectional tuning of the piano.— The piano Technician's Journal. V. 10, № 5, 1967.
36. Юцевич Е. Е. Настройка венской гармонии. Киев, 1939.
37. Розенфельд Н. Г., Иванов М. Д. Гармони, баяны, аккордеоны. М., 1974.
38. Белов С. И., Бандас Л. Л., Минин А. Е. Щипковые музыкальные инструменты. М., 1963.
39. Gasparini v. R. Verschidene Wege eine 12-saitige Gitarre zu stimmen.— Das Musikinstrument, Heft 2. Frankfurt a. Main, 1977.
40. Чулаки М. И. Инструменты симфонического оркестра. М., 1972.
41. Рубин М. Методика обучения игре на арфе. М., 1973.
42. Pratt R. L., Bowsher J. M. The Objektive Assessment of Trombone Quality.— Journal of Sound and Vibration. V. 65, № 4, 1979.
43. Benade A. The Physics of Wood Winds.— Scientific American, 203, № 4. New York, 1960.
44. Young R. Optimum Lengths of Valve Tubes for Brass Wind Instruments.— The Journal of the Acoustical society of America. V. 42, № 1, 1967.
45. Зимин П. Н. Амбушюрные инструменты (практическое руководство для их расчета и проектирования). Рукопись.
46. Krüger W. Objektive Untersuchungsmethoden bei Metallblasinstrumenten.— Das Musikinstrument, H. 3, 1968.
47. Bate P. The Acoustics of Woodwind Instruments — Part 1, 2.— Research 15, № 9, 10. London, 1962.
48. Диков Б. А. Настройка духовых инструментов.— В кн.: Методика обучения игре на духовых инструментах. Вып. IV. М., 1976.
49. Юцкевич Е. Е. Ремонт духовых инструментов. Киев, 1957.
50. Богданов Л. П. Проблемы интонирования на духовых инструментах.— В кн.: В помощь военному дирижеру. Вып. XXII. М., 1984.

СОДЕРЖАНИЕ

I. Историческое введение в музыкальную акустику . . 3

II. Основы музыкальной акустики 23

1. Свободные колебания вибраторов в музыкальных инструментах 25
2. Вынужденные колебания источников звука в музыкальных инструментах 40
3. Элементы музыкальной грамоты 45

III. Акустические основы настройки музыкальных инструментов 53

1. Музыкальные строи современной европейской музыки 53
2. Физическая сущность настройки интервалов . . 61
3. Планы настройки и контроль 74
4. Факторы, влияющие на строй и настройку музыкального инструмента 85
5. Вибрато и розлив в музыкальном инструменте . 106

IV. Техника настройки 110

1. Настройка клавишных струнных инструментов . 110
2. Настройка язычковых инструментов 127
3. Настройка щипковых и смычковых струнных инструментов 131

Гитара 132
Балалайка 136
Домра 137
Мандолина 139
Скрипка, альт, виолончель и контрабас 141
Арфа 142

4. Точность строя и настройка духовых инструментов 143

Настройка медных духовых инструментов . . . 155
Настройка деревянных духовых инструментов . 157

V. Упражнения и практические занятия по настройке фортепиано 161

Список использованной литературы 189

Учебное издание

ВАЛЕРИЙ ГРИГОРЬЕВИЧ ПОРВЕНКОВ

АКУСТИКА И НАСТРОЙКА
МУЗЫКАЛЬНЫХ ИНСТРУМЕНТОВ

Редактор *В. Панкратова.*
Худож. редактор *А. Головкина*
Техн. редактор *Т. Сергеева*
Корректор *Г. Мартемьянова*

ИБ № 3918

Подписано в набор 21.08.89. Подписано в печать 10.10.90. Формат 60x90 1/16. Бумага офсетная № 1. Гарнитура литературная. Печать офсетная. Объем печ. л. 12,0. Усл. печ. л. 12,0. Усл. кр.-отт. 12,5. Уч.-изд. л. 13,80. Тираж 46000 экз. Изд. № 14459. Зак. № 111. Цена 75 к.

Издательство „Музыка", 103031, Москва, Неглинная 14

Московская типография № 6 Госкомпечати СССР
109088, Москва, Южнопортовая ул., 24.

75 к.