

## Равномерно-темперированный строй — миф или реальность?

На первый взгляд, в заглавие статьи вынесен чисто риторический, даже странный вопрос. Конечно же, реальность! С юных лет все мы знаем, что равномерно-темперированный строй (далее — РТС), наилучшим образом разрешивший противоречия более ранних систем, уже со времен И.С.Баха занял ведущее место в музыкальной практике европейской традиции, а позже начал активно выходить и за ее пределы.<sup>1</sup>

Достоинства РТС, обеспечившие ему столь важное место в европейской музыкальной культуре, общеизвестны. Формирование РТС, как и других идеальных (математических) строев, было обусловлено потребностями музыкальной практики: вычисленная акустикой математическая модель того или иного звуковысотного строя лишь оформляла и конкретизировала выработанные в практике музицирования принципы отбора музыкального материала. Так было с пифагоровым строем (ПС), отразившим основы организации звуковысотной структуры диатонической монодии Античности и раннего Средневековья; так было и с чистым строем (ЧС), возникшим в связи с необходимостью фиксации акустически совершенных трезвучий в музыке позднего Средневековья и Возрождения.

В этом отношении РТС также является закономерным продуктом своей эпохи — эпохи функционально-гармонического ладового мышления: он полностью отвечает принципу энгармонической замкнутости сложившейся в это время системы ладотональностей и их функционально-модуляционных связей. Лишь в ничтожной, практически не отмечаемой слухом степени поступившись акустическим совершенством базовых ладообразующих интервалов квинты (и кварты), приняв компромиссное (между номиналами ПС и ЧС) акустическое качество терций и секст, выполняющих в новых условиях системы гармонических ладов мажора и минора более второстепенную колористическую функцию, создатели и пропагандисты РТС получили результат почти идеальный. Новый строй оказался удивительно жизнеспособным: из 4,5 веков своей истории он на протяжении почти трех последних столетий был в состоянии практически монополюбно обслуживать потребности разнообразной и эволюционирующей музыкальной практики.<sup>2</sup>

Следует помнить, что РТС, как и все более ранние системы звуковысотного строя, возник как чисто практическая основа для настройки музыкальных инструментов с фиксированной звуковысотностью (органов, клавесинов, позже — фортепиано и др.). Однако, возникнув в этом скромном качестве, РТС за время своего господства стал постепенно претендовать на роль более серьезную и универсальную: на роль высотно-интонационного ладообразующего базиса всей системы европейского музыкального мышления. Формированию подобного взгляда на РТС в сознании людей способствовали многие его свойства и обстоятельства и, в первую очередь, его способность обеспечить полное акустическое подобие всех тональностей каждого ладового наклонения, предоставляющее композитору полную свободу модуляционного движения. Немалую роль играло здесь и монополюбное положение РТС: прочие математические строи канули в Лету вместе с эпохами, их породившими.

В силу этих и ряда других причин РТС постепенно приобрел функцию некоего интонационного идеала: ныне едва ли не во всем мире качество звуковысотной интонации исполнителей

<sup>1</sup>В частности, традиционные музыкальные культуры многих народов бывшего СССР, не знавшие ранее РТС и использовавшие иные принципы построения звуковысотных систем, ныне почти повсеместно ориентируются на остающийся, в сущности, чуждым их природе европейский РТС.

<sup>2</sup>Впервые идея и сущность РТС были сформулированы Дж.Ланфранко в трактате «Scintille di musica», опубликованном в 1533 г. Математическое описание РТС было предложено М.Мерсенном в 1636 г. в его труде «Harmonie universelle», I том ХТК И.С.Баха вышел из печати в 1722 г. [12].

на смычковых и духовых инструментах, певцов (солистов и хористов) сверяется прежде всего с эталоном РТС, воплощенным в находящемся под рукой фортепиано.<sup>3</sup>

Воспитание музыкального слуха в классах сольфеджио осуществляется почти исключительно в опоре на равномерно-темперированный рояль.

Пагубность подобной идеализации РТС, в особенности, как увидим далее, его фортепианного воплощения, не столь уж и очевидна. При желании, у такой позиции можно обнаружить и свои преимущества. Исповедуя кредо «нет верной интонации, кроме фортепианной», мы можем быстро и со сравнительно малой затратой педагогических усилий сформировать в ученике крепкий ремесленный профессионализм: скрипач или вокалист скоро научится играть или петь чисто, без фальши. Однако ясно, что ориентируя ученика лишь на единственный интонационный эталон, мы лишаем его т в о р ч е с к о г о отношения к звуковысотному интонированию, свободное владение которым открывает большие резервы тончайших выразительных возможностей, недоступных ремесленнику, воспитанному на одном лишь «хорошо темперированном фортепиано».<sup>4</sup>

Уже во второй половине XIX века, по мере все более широкого распространения фортепиано, становящегося постепенно «рабочим» инструментом не только пианиста, но и всякого исполнителя любой другой специальности, опасность интонационной фетишизации РТС стала осознаваться мыслящими музыкантами. Многие из них в своих высказываниях, порой полемически заостренных, обращали внимание на необходимость освободиться от «диктата» РТС, на желательность и художественную целесообразность отклонений от этого эталона. Так РТС, пожалуй, впервые в своей истории пришел в некоторое противоречие с требованиями эпохи: интонационной выразительности позднего романтизма стало тесно в его рамках. Наряду с представлением «РТС — эталон звуковысотности» (представлением, сохранившимся и до наших дней) возникает и набирает силу прямо противоположное: «РТС — мертвящая схема».

Однако декларации сторонников интонационной множественности оставались бездоказательными вплоть до 30-х годов XX века. Именно в это время уровень развития электроники и техники звукозаписи позволил, наконец, определить, как же обстоит дело в реальной практике интонирования у признанных музыкантов-мастеров. Среди исследователей, заинтересовавшихся этой проблемой, особое место принадлежит замечательному ученому — акустику и музыканту Н.А.Гарбузову. Взяв на себя труд измерить с весьма высокой по тогдашним меркам степенью точности высоту огромного, статистически представительного количества звуков, «извлеченных» из звукозаписей концертных и студийных выступлений больших музыкантов того времени, Гарбузов на основании результатов этих измерений пришел к созданию своей знаменитой зонной теории звуковысотного слуха. За время, прошедшее с момента первой полной публикации материалов этой теории в 1948 г. [7], некоторые ее положения были уточнены, некоторые — даже опровергнуты, однако главная идея ученого, составляющая самую сердцевину его теории, получила всеобщее признание и оказалась весьма плодотворной. Суть этой идеи заключается в отказе от существовавшего ранее «точечного» представления о высоте звуков (ступеней лада или элементов звуковысотного строя) и допущении возможности представлять данную ступень для целого множества близких друг другу высот, занимающих в совокупности целую полосу — отрезок конечной, хотя и не вполне определенной длины на оси частот.

Зонная теория Н.А.Гарбузова позволила совместить в диалектическом единстве две вышеназванные, казалось бы, взаимоисключающие позиции («РТС — идеал» и «РТС — схема»), указав каждой из них свое место в живом творческом процессе интонирования музыки. Математически рассчитанные частоты РТС — это, конечно, не эталон чистой интонации, но это очень удобная «координатная сетка», ориентируясь на которую, высокоразвитый слух музы-

<sup>3</sup> Это характерно, главным образом, для практики обучения молодых музыкантов, однако и зрелые профессионалы подчас не считают для себя зазорным проконтролировать и «подправить» свою интонацию по фортепиано.

<sup>4</sup> Профессионалы-пианисты, избавленные от необходимости заботиться в процессе игры о качестве звуковысотной интонации, нередко обладают весьма нетребовательным слухом в этом отношении и могут не замечать явной фальши своего расстроенного инструмента: их слуховое внимание нацелено прежде всего на контроль динамики, агогики, туше и т. п., то есть тех качеств звука, управление которыми подвластно самому музыканту.

канта позволяет ему творить живую и выразительную интонацию в собственном исполнении музыки или адекватно воспринимать таковую — в чужом. Обладателям же менее развитого слуха не грех и «походить по клеточкам», помня, однако, о необходимых пропорциях ремесла и творчества в искусстве.

Появление зонной теории Гарбузова активизировало попытки (имевшие место и ранее) создания новых математических строев, которые были бы способны, по замыслу их авторов, объединить интонационные достоинства ЧС, ПС и РТС, а также, в ряде случаев, ввести в интонационный обиход и иные звуковысотные соотношения (четвертитоны и др.). Как правило, подобные предложения основаны на равномерном или неравномерно-периодическом делении октавы на более чем 12 интервалов (в известных мне публикациях — от 17 до 72). Некоторые из этих предложений выглядят вполне логично, основательно аргументированы и могли бы действительно обогатить интонационный арсенал музыки, если бы не одно обстоятельство, сильно препятствующее их осуществлению.

Дело заключается в том, что изобретаемые ныне новые математические строи, как и в свое время РТС, как и его предшественники, подразумевают свою реализацию в звукоряде клавишного инструмента с фиксированным строем. Именно здесь лежит принципиальное различие между РТС и его более поздними, в том числе и современными потенциальными конкурентами. РТС в эпоху своего возникновения и борьбы за выживание с самого начала был приспособлен к уже существующей и повсеместно принятой клавиатуре. Мало того, РТС благодаря своей энгармонической замкнутости разрешал имевшиеся в строях-предшественниках противоречия, расширяя тем самым возможности этой клавиатуры. Сегодняшние создатели новых строев предлагают и соответствующие н о в ы е клавиатуры оригинальных конфигураций, имеющие от 17 до 72 клавиш в каждой октаве, клавиш нескольких разных форм, цветов и уровней пространственного расположения. Нетрудно представить себе, насколько сложнее станет чисто техническая сторона исполнительства на подобной клавиатуре, чем грозит разрыв преемственности в техническом и методическом отношениях с сложившимися на сегодня принципами в области игры на клавишных инструментах. К этому необходимо прибавить и неизбежную модернизацию (если не реформу!) нотной записи, которая в результате обещает стать чрезвычайно громоздкой и неудобочитаемой. Поэтому есть все основания считать обнародованные до сих пор проекты практически неосуществимыми.<sup>5</sup>

Всё сказанное убеждает, что если РТС и не сразу был принят в качестве «главного» строя европейской музыки — потребовался двухсотлетний период его борьбы с различными системами неравномерной темперации за «место под солнцем» [12], — то однажды убедившись все-таки в его преимуществах, музыканты всех последующих времен отдавали и продолжают отдавать этому строю абсолютное предпочтение. Нетрудно убедиться и в том, что даже требования музыкантов — исполнителей на инструментах со свободным строем и вокалистов, даже предложения о введении многоступенных (более 12 в октаве) строев не отменяют главенства РТС, а направлены на его обогащение при сохранении 12-ступенной равномерной темперации в качестве, по крайней мере, «координатной сетки». Не отменяет ведущей роли РТС и зонная теория Н.А.Гарбузова, о чем уже говорилось. Добавим еще, что все измерения высот исследуемых звуков проведены ученым относительно номиналов РТС и что во всех случаях эти номиналы располагаются внутри соответствующих зон.

---

<sup>5</sup> Не будучи горячим сторонником описанных и подобных им нововведений, позволю себе наметить возможные, на мой взгляд, пути обогащения интонационных возможностей клавишных инструментов с фиксированным строем. Прежде всего, следует решительно отказаться от попыток модернизации фортепиано: его механико-акустический аппарат — совершенное воплощение идеологии XIX века в области механики, акустики и музыки — не способен к восприятию дополнительных радикальных усложнений, он их просто не выдержит. Единственным перспективным в указанном плане родом клавишных инструментов являются электронные синтезаторы, в которых возможна и даже не слишком трудоемка реализация указанных идей. При этом представляется разумным сохранение классической клавиатуры, а все дополнительные интонационные возможности могут осуществляться программным управлением встроенной микропроцессорной системы инструмента. Останется лишь научиться пользоваться этими возможностями должным образом.

Итак, РТС — это реальность, это не вызывает никаких сомнений, само собой разумеется и к тому же доказано. И все же, вернемся к вопросу, сформулированному в заглавии брошюры. При внимательном рассмотрении феномена РТС с позиций современных данных музыкальной акустики и ряда других научных дисциплин, а также практики настройки инструментов, ясные и отчетливые контуры этого «предмета» начинают как бы расплываться, и весь он словно ускользает от восприятия, подобно тающему миражу в пустыне. Так в ныне монополюбно действующем, повсеместно принятом, исчерпывающе точно описанном во всех подробностях и, казалось бы, таком реальном РТС вдруг проступают черты мифа.

Начнем с математической модели РТС. Его знаменитые предшественники — ПС и ЧС — основаны на рациональных (целочисленных) соотношениях частот. Базовые интервалы ПС — это октава (2:1) и квинта (3:2), различные комбинации которых дают в результате все необходимые ступени строя. Эти интервалы всегда «под рукой» у любого музыканта: в виде первых трех компонент натурального звукоряда (флажолеты струнных, «передувания» духовых, наконец, непосредственно воспринимаемый спектр, в котором именно эти первые компоненты слышатся легче всего). ЧС в число базовых интервалов вводит еще терции и сексты, все многообразие которых связано с пятым звуком натурального звукоряда, который также достаточно легко получить в отдельности или расслышать в спектре звука музыкального инструмента. Все это облегчало процесс настройки и позволяло простыми средствами достичь ее высокой точности.

Напротив, вся история поисков универсальной темперации (каковой, в конце концов, и оказался РТС) шла под знаком приблизительности: предлагалось «несколько расширить кварту», «настроить квинту немного уже акустически чистой» и т. п. В конечном итоге математики свели все эти приблизительности к иррациональному числу  $^{12}\sqrt{2} = 1,05946309\dots$ , интервальному коэффициенту полутона РТС. Оценим простоту и изящество левой части равенства. В ней всего два числа: «2» — интервальный коэффициент базовой октавы, «12» — число равных долей, на которые эта октава делится, и знак корня между ними. Значительно менее изящна правая часть: это бесконечная непериодическая дробь, в которой вычисление каждой очередной цифры требует усилий, а сам процесс «удлинения» этой дроби в принципе не ограничен, и уточнять значение числа можно сколько угодно. Оставив пока вопрос о степени точности приближения реальной настройки к целочисленным соотношениям в старинных математических строях (ниже мы увидим, что и там дело обстоит совсем не просто), мы убеждаемся в невозможности получить абсолютно точные значения частот РТС даже в виде цифр на бумаге.

Допустим, однако, что приведенные выше 9 значащих цифр в коэффициенте полутона нас вполне устраивают: с ними мы имеем точность определения частот звуковых колебаний порядка миллионных долей процента. Достижима ли такая точность в практике настройки?<sup>6</sup>

Чтобы ответить на этот вопрос, обратимся к материалам работы Н.А.Гарбузова «Внутризонный интонационный слух...» [6]. Автор приводит в ней результаты измерений высоты звуков нескольких роялей, настроенных лучшими мастерами того времени в Московской консерватории. Часть этих данных мы приводим здесь в виде графиков (рис. 1).

---

<sup>6</sup> Обращаю внимание читателя: н а с т р о й к и, то есть создания звучащего РТС, а не абстрактно-математической его модели.

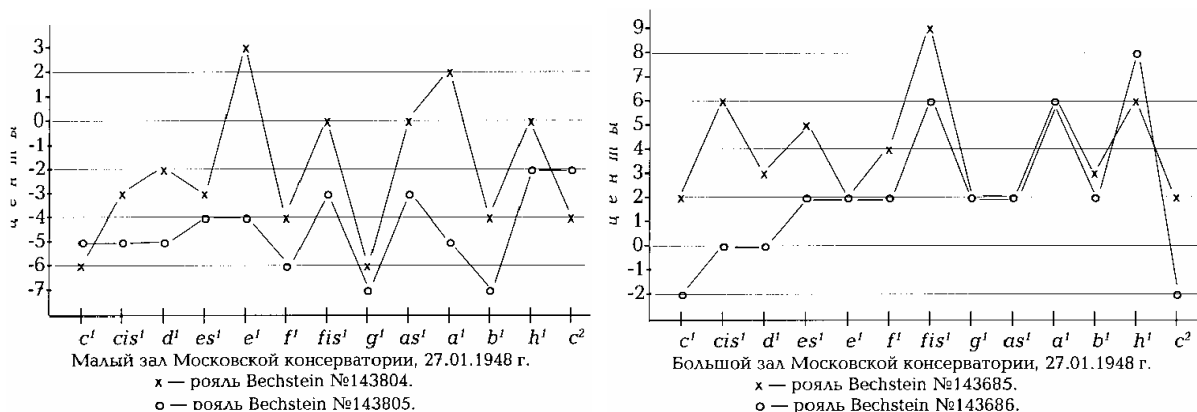


Рис. 1. Графики настройки роялей (по Н. А. Гарбузову).

Результаты измерений показывают, что амплитуда отклонений высот звуков (точнее, разность величины отклонений наиболее завышенного и наиболее заниженного звуков) в лучшем из четырех случаев составляет 5 центов (сотых долей полутона), в худшем — 10 центов. Иначе говоря, в этом последнем случае (значки «о» на втором графике) интервалы  $c^1—h^1$  и  $h^1—c^2$  рояля, стоящего на сцене Большого зала Московской консерватории (!) были настроены с ошибкой 10 центов, то есть 1/10 часть полутона или около 0,6% по частоте звуковых колебаний. И такая ошибка для требовательного профессионального слуха настройщика оказалась допустимой, полученный строй был для него, по-видимому, приемлемым.<sup>7</sup>

Отбросив в полученных Гарбузовым данных экстремумы, могущие иметь случайный характер, мы получим гарантированное значение допустимой амплитуды отклонений при субъективно высококачественной настройке, равное 6 центам или, в среднем,  $\pm 3$  ц. для каждого звука.<sup>8</sup>

Отсюда ясно, что 9 значащих цифр в интервальном коэффициенте полутона РТС попросту не нужны, мы можем с полным основанием «отрезать хвост» нашей бесконечной дроби после округленной 5-й цифры: 1,0595. Двенадцать шагов на такой «округленный» полутон дадут слегка расширенную октаву с интервальным коэффициентом 2,0008354, то есть с ошибкой около 0,7 цента — более чем вчетверо лучше практических результатов работы настройщиков высокой квалификации по данным Н.А.Гарбузова. Близко к этому целочисленное отношение  $160/151=1,0596026\dots$ , дающее двенадцатью полутоновыми ходами октаву, расширенную на 3 цента, то есть опять-таки укладывающуюся в допуски настройки «высшего сорта», но более предпочтительную по соображениям, изложенным ниже (см. далее о «кривой Рейлсбека»)<sup>9</sup>

Итак, мы ввели пока что три обстоятельства, которые уже в состоянии «расфокусировать» идеальную картину математического РТС при его реализации в настройке рояля: первое — невозможность достижения точных значений частот звуков в силу иррациональности интервальных коэффициентов РТС; второе — возможность выбора целого множества близких друг другу коэффициентов полутона от  $107/101$  (1,05940594...) до  $160/151$  (1,0596026...) и даже более.<sup>10</sup>

<sup>7</sup> Было бы интересно проверить аналогичным образом работу рядовых настройщиков в рядовых филармониях и музыкальных учебных заведениях.

<sup>8</sup> Но не для каждого интервала: такую расстройку «не выдержат» квинты и кварты, напротив, тритоны и малые секунды (большие септимы) допускают и еще большие расстройки, оставаясь субъективно «чистыми».

<sup>9</sup> В хроматическом стробоскопе Конна — приборе, которым пользовался Гарбузов при измерениях высот звуков, принят интервальный коэффициент полутона  $107/101=1,0594\dots$ , реализованный в виде зубчатой передачи с шестернями, имеющими указанное число зубьев. 12 шагов на такой полутон приводят к октаве, величина которой меньше математически чистой на 0,065% или 1,1 цента. Эта систематическая погрешность прибора вносит свой вклад в полученные Гарбузовым данные, однако принципиально не изменяет общей картины.

<sup>10</sup> В работе [8] предлагается использовать  $\sqrt[7]{3/2}=1,059634\dots$  (1/7 часть акустически чистой квинты). В эксперименте автора данной статьи по настройке малогабаритного рояля «Gerbstadt» с ориентацией на коэффициент 1,06 (в среднем, с уже упомянутым допуском на неточность слухового контроля) был получен вполне приемлемый результат. Расчет показывает, что октава при этом расширяется на 10,4 цента (около 3 биений в секунду в октаве  $c^1—c^2$ ). Это дает заметную на слух, но не слишком ухудшающую общее невысокое качество звучания инструмента расстройку.

Наконец, третье обстоятельство заключается в том, что даже высокоразвитый слух музыканта не отмечает нерегулярных расстроек в некоторых интервалах внутри октавы, если их величина не превышает 3 центов в сторону расширения или сужения.

Однако расплывчатый, «миражеобразный» характер «фигуры РТС» сказанным не исчерпывается. На протяжении 30-х — 50-х годов нашего века сначала О. Рейлсбеком в США, а затем Г. Майнелем в Германии были проведены исследования звуковысотного строя роялей, «вышедших из-под ключа» настройщиков самой высокой квалификации [13, 14]. Оба исследователя констатировали устойчивую тенденцию прогрессивного завышения звуков верхнего регистра относительно стандартной шкалы частот РТС и, напротив, занижения настройки по мере продвижения по звукоряду вниз. Величина отклонений от стандарта РТС, точнее говоря, степень выраженности отмеченной тенденции у обоих исследователей оказалась разной (у Рейлсбека сильнее, чем у Майнеля), однако в наличии такой тенденции сомневаться не приходится.

Приводим здесь усредненную кривую Рейлсбека (рис. 2), из которой видно, что крайние звуки диапазона фортепиано оказываются на слух настройщика чистыми, если их частоты отличаются от номиналов РТС на 40 центов, то есть почти на половину полутона. Следует также обратить внимание на то, что крутизна наклона кривой, составляющая в середине диапазона около 2—3 центов на октаву, резко возрастает к краям диапазона до значений 30—35 ц./окт. [10, 11].

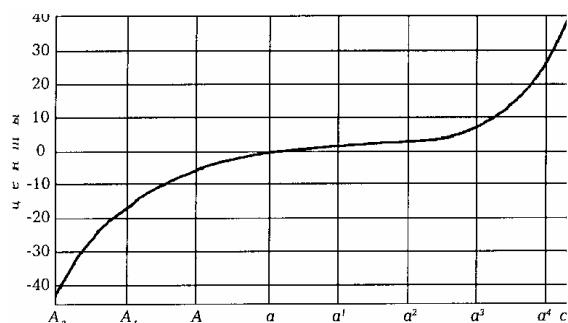


Рис. 2. Усредненная кривая Рейлсбека.

Анализ кривой Рейлсбека приводит к двум важным выводам. Первый из них: равномерно темперированный строй (в настройке фортепиано) в действительности таковым не является, поскольку его установочный параметр — коэффициент полутона — заметно изменяется в пределах употребительного диапазона. Второй: за исходное минимальное значение этого коэффициента разумнее принять не классическое иррациональное выражение  $\sqrt[12]{2}$ , а более простое конечное 1,0595, обеспечивающее наклон кривой Рейлсбека в 0,7 ц./окт., или 1,0596 (3 ц./окт.) с постепенным увеличением этого значения к краям диапазона до 1,061 (30 ц./окт.).

В поисках причин отклонения частот звуков хорошо настроенного фортепиано от расчетных значений математического РТС исследователи обратили внимание прежде всего на явление негармоничности спектра колебаний фортепианных струн [15, 16]. Известно, что в отличие от идеальной струны реальная стальная струна, будучи выведена из состояния равновесия, возвращается в него не только под действием силы ее натяжения, но и вследствие упругости (жесткости) ее материала. Наличие этой дополнительной силы изменяет режим колебаний в сравнении с идеальным тем в большей степени, чем больше перегибов получает струна при колебаниях данной моды, то есть, чем короче расстояния между узлами колебаний или чем выше номер данного обертона. В результате частота обертонов тем сильнее отклоняется вверх от соответствующей математически точной гармонике основного тона, чем более высокий номер имеет данный обертон.

Таким образом, верхняя часть спектра звука фортепиано прогрессивно смещается вверх по отношению к идеальному гармоническому спектру.<sup>11</sup>

Этот эффект заметен уже в октавном обертоном, поэтому субъективно чистая октава, не имеющая биений в первом тоне совпадения спектров, окажется объективно немного расширенной, то есть отношение частот ее основных тонов будет немного больше, чем 2:1. Еще заметнее этот эффект в квинтах и квартках, используемых как опорные интервалы при настройке всего кварто-квинтового круга, а также как контрольные интервалы при октавной настройке звуков вверх и вниз от центрального регистра. Вызванные этой причиной едва заметные расширения суммируются в каждом шаге вверх и вниз, что и приводит к наклону линии настройки по отношению к горизонтальной прямой — математическому РТС.

Вскоре выяснилось, однако, что резкое возрастание крутизны кривой Рейлсбека к краям диапазона не может быть объяснено одной лишь негармоничностью спектра струн: эта причина привела бы лишь к наклону линии настройки, но не к ее искривлению. Измерения строя органов, фисгармоний, баянов и т. п. обнаружили в этих инструментах ту же тенденцию, хотя и выраженную в меньшей степени, чем у фортепиано. Между тем спектр звука этих инструментов можно считать практически гармоническим. Интересно, что в электронных органах, использующих принцип октавного деления частот двенадцати задающих генераторов и имеющих вследствие этого строй с абсолютно точными октавами по всему диапазону, звучание крайних регистров воспринимается как недостаточно выразительное и субъективно заниженное в верхнем и завышенное в нижнем регистрах.

Таким образом, причина наклона кривой Рейлсбека заключается не только в физических свойствах фортепианных струн, она лежит отчасти и в области психофизиологии музыкального восприятия (см., например, [3], стр. 14—18). Следовательно, сформулированный выше вывод о принципиальной неравномерности «равномерной» темперации справедлив не только в отношении фортепиано, но имеет универсальный характер.

Все же, о негармоничности спектра фортепианных струн нам придется поговорить еще в связи с двумя дополнительными обстоятельствами. Во-первых, степень этой негармоничности очень сильно зависит от размеров инструмента. В большом концертном рояле, имеющем относительно тонкие и длинные сильно натянутые струны, степень этой негармоничности невелика, и кривая Рейлсбека имеет малый наклон в центре и некрутые «загибы» по краям диапазона. Напротив, малогабаритные рояли и пианино с их короткими и толстыми струнами и с меньшей силой натяжения (ради облегчения чугунной рамы) дают круто наклоненную и сильно нелинейную кривую. Отсюда ясно, что форма кривой Рейлсбека и степень ее наклона для каждого конкретного инструмента или, по крайней мере, для каждой модели фортепиано, будет различной.<sup>12</sup>

Мало того, различия возникнут и в зависимости от общей высоты строя, поскольку сила натяжения струн изменяется со сменой высоты (около 12 % на каждый полутон), жесткость же стали остается практически неизменной, а степень негармоничности спектра колебаний струны зависит, как уже сказано, от соотношения этих величин. Отсюда вытекает, что каждый инструмент настраивается в своем индивидуально-неравномерно-темперированном строе. Сколько инструментов, столько и различных воплощений строя.

Во-вторых, явление негармоничности спектра колебаний делает неопределенным само понятие высоты звука. В музыкальной акустике доказано, что субъективное ощущение высоты звука для среднего и, в особенности, нижнего регистров определяется не столько частотой основного тона, сколько всей совокупностью частот спектральных составляющих (см. [3], стр. 29—31).

Рассмотрим следующую таблицу.

<sup>11</sup> Исследования, проведенные в акустической лаборатории фабрики «Красный Октябрь» показали, что у басовых струн роялей обертоны 12—14 оказываются завышенными уже приблизительно на полутон, то есть совпадают по частоте уже со следующим компонентом идеального гармонического спектра [9].

<sup>12</sup> При условии, что все экземпляры данной модели имеют одинаковую струнную одежду.

№ составляющей	Идеальная частота	Музыкальная высота	Реальная частота	Музыкальная высота
1	110	A	110	A
2	220	a	220,5	a + 5 ц.
3	330	e <sup>1</sup> + 2 ц.	331	e <sup>1</sup> + 7,5 ц.
4	440	a <sup>1</sup>	442	a <sup>1</sup> + 8 ц.
5	550	cis <sup>2</sup> — 13,5 ц.	554	cis <sup>2</sup> — 1 ц.
6	660	e <sup>2</sup> + 2 ц.	668	e <sup>2</sup> + 23 ц.
7	770	g <sup>2</sup> — 31,5 ц.	786	g <sup>2</sup> + 4 ц.
8	880	a <sup>2</sup>	912	b <sup>2</sup> — 38 ц.
9	990	h <sup>2</sup> + 4 ц.	1054	c <sup>3</sup> + 13 ц.
10	1100	cis <sup>3</sup> — 13,5 ц.	1228	es <sup>3</sup> — 23 ц.
11	1210	es <sup>3</sup> — 49 ц.	1466	fis <sup>3</sup> — 16,5 ц.

В колонке «Реальная частота» даны частоты (в герцах) негармоничного спектра, вполне возможного в реальном малогабаритном фортепиано для звука «Ля» большой октавы. Нетрудно заметить, что уже 8-я составляющая этого спектра попадает в «чужую» зону 12-ступенного звукоряда, а более высокие компоненты образуют последовательность, мало похожую на соответствующий фрагмент натурального звукоряда (см. колонку «Идеальная частота»). Возникает вопрос: как же настраивать такую струну?

Предположим, что настраивая ее по уже настроенному звуку «ля» (малой октавы) с частотой 220 Гц, мы попадем ее основным тоном в номинал РТС (110 Гц) и получим представленную в таблице сетку частот спектра. Наша номинальная октава ( $220/110 = 2/1$ ) в действительности будет фальшивой, так как в тонах совпадений обоих спектров (примем, что верхний звук имеет идеальный спектр) мы получим ряд сильных биений:

$$\begin{aligned}
 220,5 - 220 &= 0,5 \\
 442 - 440 &= 2 \\
 668 - 660 &= 8 \\
 912 - 880 &= 32 \\
 1228 - 1100 &= 128
 \end{aligned}$$

«Сдвинув» настройку басового «Ля» вниз до получения нулевых биений на частоте 220 Гц (основном тоне «ля» малой октавы), мы не избавимся от биений на более высоких обертонах, хотя и несколько замедлим их. Настроив бас еще ниже и совместив в нулевых биениях тон совпадения 440 Гц, мы вновь получим биения на частоте 220 Гц: те же 0,5 Гц, но теперь уже как бы «с обратным знаком» и при меньшей, чем ранее, частоте биений на верхних обертонах. Таким образом, ни при каких условиях мы не сможем получить акустически чистой октавы, можно лишь попытаться найти такую настройку басовой струны, при которой весь комплект в принципе неустранимых биений будет производить наименее неприятное и наименее фальшивое впечатление. Искусство настройщика и состоит, в частности, в умении найти этот трудноуловимый оптимум, который, очевидно, никак не поддается расчету по формулам и графикам, так как зависит от множества индивидуальных для данного инструмента причин.<sup>13</sup>

Попытаемся свести все сказанное в одну общую картину.

1. Математическая модель РТС, зафиксированная в формуле  $i = \sqrt[12]{2} : 1$ , не соответствует высококачественной настройке реальных музыкальных инструментов. Истинный коэффициент полутона РТС (отношение частот основных тонов в соседних звуках хроматической гаммы) имеет величину чуть больше указанной и непостоянен по диапазону: минимум этой величины

<sup>13</sup> Для хорошего мастера-настройщика, умеющего слышать и понимать суть всего сказанного выше, в допустимости множества **разных, но в равной мере высококачественных** настроек открывается возможность истинно творческого поиска наилучшего варианта настройки данного конкретного инструмента с учетом особенностей механики и акустики как самого рояля, так и помещения, в котором он установлен, и даже программы предстоящего концерта. В статье Г.К.Богино [1] высказаны некоторые соображения по этому поводу.



(в пределах приблизительно 1.0595 — 1.0596) — в его центральном участке (малая — вторая октавы), максимум (до 1.061 и даже более) — по краям диапазона.

2. Исполнители на инструментах с нефиксированным строем и вокалисты вообще не пользуются РТС: их строй — свободный 12-зонный. Высказываемое иногда соображение, что центры зон такого строя статистически совпадают с номиналами РТС, представляется сомнительным и опубликованными к настоящему времени данными замеров частот звуков не подтверждается.

3. Наиболее распространенный — фортепианный — вариант РТС имеет особенно мало общего с математическим РТС. Пианино и рояли настраиваются в неравномерно-темперированном строе, индивидуальном для каждого инструмента (кривые Рейлсбека разных форм и степеней крутизны). Мало того, самые лучшие настройщики могут реализовать идеальную кривую с неизбежными ошибками (до  $\pm 3$  ц для наименее критичных к расстройке интервалов). Рядовые настройщики, очевидно, допускают и еще большие ошибки. К тому же, для фортепиано, в особенности, малогабаритных, само понятие высоты звука оказывается неопределенным и расплывчатым, причем для разных звуков — в разной степени.

4. Классические органы и другие клавишные инструменты с дрящимся звуком, обладающие наиболее гармоничным спектром и способные, в принципе, точнее других инструментов совпасть в своей настройке с «идеальным» математическим РТС, в действительности также тяготеют к кривым Рейлсбека, что обусловлено особенностями психофизиологии звуковысотного восприятия человека. Электроорганы, в силу принципов своей конструкции вынужденные точно совпадать с математическим РТС (если не считать ошибок настройщика), обладают в крайних регистрах своего диапазона неудовлетворительными интонационными свойствами.

5. Контроль и анализ звуковысотных строев, в том числе и РТС, по частотам колебаний только основных тонов звуков не соответствует их музыкальной природе, так как интонационные свойства ступеней этих строев и их звуковысотные соотношения определяются всеми слышимыми составляющими спектров звуков. Отсюда следует, что чем сильнее выражена негармоничность спектров, тем дальше от математического «идеала» (по частотам основных тонов) будет истинно высококачественная равномерно-темперированная настройка инструмента.

Итак, мифологические черты описанного в учебниках элементарной теории музыки и музыкальных справочниках РТС несомненны. Реально же существуют многочисленные и весьма разнообразные воплощения этой математической модели, степень отличия которых от «идеала» в действительности оказывается значительно большей, чем принято думать. Иметь представление об этих различиях может быть полезным для музыкантов в ряде практических ситуаций их деятельности. Дать такое представление читателю и было целью данной работы.

*Вторая редакция — 2001 г.,  
Алматы.*

## ЛИТЕРАТУРА

1. Богино Г. Современная настройка фортепиано // Музыкальное искусство и наука.— Вып. 1.— М., 1970.— С 191—218.
2. Володин А.А. Психологические аспекты восприятия музыкальных звуков: Дисс... д-ра психолог. наук: В 2 т.— М., 1969.
3. Володин А.А. Роль гармонического спектра в восприятии высоты и тембра звука // Музыкальное искусство и наука.— Вып.1.— М.: Музыка, 1970.— С. 11—38.
4. Володин А.А. Электромusикальные инструменты.— М.: Энергия, 1970.
5. Володин А.А. Электромusикальные инструменты.— М.: Музыка, 1978.
6. Гарбузов Н.А. Внутрizonный интонационный слух и методы его развития.— М.; Л.: Музгиз, 1951.
7. Гарбузов Н.А. Зонная природа звуковысотного слуха.— М.; Л.: Изд. АН СССР, 1948.
8. Григоренко В., Винниченко П. Новый способ настройки фортепиано // Советская музыка.— 1974, № 3.— С. 94—95.
9. Исследование атаки звука как критерия оценки качества концертного рояля: Отчет о НИР / ММП РСФСР; Ф-ка «Красный Октябрь»; Руководитель и отв. исполнитель А. С. Галембо.— Л., 1978.
10. Порвенков В.Г. Настройка музыкальных инструментов.— М.: Легкая индустрия, 1977.
11. Порвенков В.Г. Акустика и настройка музыкальных инструментов.— М.: Музыка, 1990.
12. Шерман Н. Формирование равномерно-темперированного строя.— М.: Музыка, 1964.
13. Meinel H, von. Musikinstrumentenstimmungen und Tonsysteme // Acustica.— Vol. 7.— 1957.— P. 185—190.
14. Railsback O.L. Study of Piano Tuning // The Journal of the Acoustical Society of America (JASA).— Vol. 37.—1937.
15. Young R. Inharmonicity of Piano Bass Strings // JASA.— Vol. 26.—1954.
16. Young R. Inharmonicity of Plain Wire Piano Strings // JASA.— Vol. 24.— 1962.