

К темперации Бернхарда Штоппера

В сентябре 2013 г. на сайте АФМ была инициирована дискуссия об оригинальной темперации настройщика из Германии Бернхарда Штоппера. Дискуссия, правда, скоро заглохла, но, судя по количеству отзывов о Штоппере и его изобретении, появляющихся по сей день на форуме американской Гильдии настройщиков фортепиано, там эта темперация довольно популярна.

Впервые описание темперации Штоппера было опубликовано ее автором более четверти века назад в 3-м номере журнала «Европиано» за 1988 г. В этой публикации и в появившихся позже сторонних описаниях этой темперации говорится о присущем ей эффекте маскировки биений и о других ее преимуществах по сравнению с традиционными способами темперирования. Вот несколько цитат:

«[Штоппер обнаружил]... феномен маскировки биений, применяя равномерную темперацию, основанную на чистых дуодецимах (12). Вы научитесь настраивать аккорд из трёх нот темперированных кварт, квинт и октав с потрясающим звучанием и чистотой во всём диапазоне.»

«...даже самые быстрые биения терций, децим и т. д. могут быть замаскированы, используя данный метод настройки.»

Есть информация и о том, что Б.Штоппер создал специальную настроечную программу PureTuner, работающую только по этой системе, и предлагает ее на продажу.

Суть изобретения Штоппера заключается в том, что в основу темперации автор положил деление на равные полутона не октавы, как это было раньше, а акустически чистой дуодецимы (квинты через октаву) с соотношением частот звуков 3:1. Для удобства взятия столь широкого интервала одной рукой (в другой руке ключ) он придумал специальное приспособление в виде арки, охватывающей на клавиатуре дуодециму:



В дуодециме содержится 19 полутонов, поэтому теоретический интервальный коэффициент полутона (для гармонических спектров) здесь чуть больше классического и равен корню 19-й степени из 3, то есть 1,059526... Октава при этом становится немного шире, ее интервальный коэффициент возрастает с классической величины точно 2 до 2,0014...

Движимый здоровым любопытством, я решил более основательно познакомиться с изобретением Штоппера. Мне, правда, так и не удалось понять, на чем основаны вышеприведенные восторженные отзывы насчет «маскировки биений» и «потрясающего звучания аккордов из трех нот темперированных кварт, квинт и октав», но в целом все оказалось действительно интересно и познавательно. Поэтому я посчитал целесообразным результат этого знакомства сделать темой моего сообщения на семинаре и познакомить его участников с идеями не только Бернхарда Штоппера, но и его предшественников и конкурентов, обозначить место темперации Штоппера в общей истории поисков идеального строя фортепиано. Поэтому сначала – немного истории и теории.

Традиционно в основе того или иного музыкального строя оказывались те или иные акустически чистые интервалы, а сами строи описывались в виде математических моделей, в которых интервалы между ступенями строя выражались отношениями чисел, и таким образом, гармония поверялась алгеброй. Так было с пифагоровым строем, в котором базовыми интервалами были октава 2:1 и квинта 3:2. Позже создатели так называемого «чистого» строя присоединили к ним еще и большую терцию 5:4. Однако по ходу развития музыкального мышления выяснилось, что эти базовые консонансы несоразмерны друг другу: сумма трех чистых больших терций оказалась чуть меньше октавы, а сумма двенадцати квинт — чуть больше, чем сумма семи октав.

Несовпадение суммы семи октав $(2:1)^7 = 128$ и суммы двенадцати квинт $(3:2)^{12} = 129,746337890625$ получило название пифагоровой коммы¹ и вызвало к жизни многовековые поиски разнообразных темпераций, в той или иной степени способных преодолеть незамкнутость «квинтовой спирали» Пифагора и превратить ее в квинтовый круг, пригодный для использования в 12-тоновой хроматической системе. Но для этого было необходимо пожертвовать первоначальной чистотой того или иного базового интервала.

В процессе конструирования как разного рода замкнутых неравномерных систем темперации (Найдхард, Бах, Веркмайстер и многие другие), так и самого РТС, вся темперационная нагрузка (то есть расстройка, акустическое «загрязнение») всегда ложилась только на квинты (и кварты, как их обращения). До сравнительно недавнего времени никто из авторов руководств по настройке, модернизаций РТС или новых неравномерных систем не рискнул посягнуть на непорочную чистоту «священной коровы» — октавы.

¹ Для справки: *соль-дубль-диез*¹, полученный двенадцатью шагами вверх по акустически чистым квинтам от исходного *ля*¹ = 440 Гц и возвратом на 7 акустически чистых октав вниз, будет иметь частоту 446 Гц.

Лишь в первой половине XX века с обнаружением явления негармоничности спектров звуков фортепианных струн возникли предпосылки (пока что только предпосылки) к пересмотру «неприкасаемости» октавы. Помимо собственно негармоничности (прогрессивного завышения частот обертонов по сравнению с частотами, кратными основному тону) было обнаружено и ее следствие: невозможность выстроить на фортепиано акустически чистые консонансы (кроме унисонов, да и то не всегда). Дело в том, что совместив в нулевых биениях одну пару совпадающих частичных тонов спектров звуков интервала, мы получаем практически неизбежные расхождения частот в других парах обертонов.

Рассмотрим подробнее ситуацию, с которой сталкивается фортепианный мастер, настраивая самую обыкновенную октаву. Вот данные о биениях, полученные расчетным путем, для октавы $ля^0$ — $ля^1$ двух моделей отечественных пианино:

Модель	б/с	б/с	б/с
пианино	2:1	4:2	6:3
С-5 (арт.102)	+ 0,5	0,0	- 2,6
С-16 (арт. 38)	+ 0,4	0,0	- 2.2

Тщательно выстроим октаву с помощью известного приема – по равенству частот биений в терции $фа^0$ – $ля^0$ и дещиме $фа^0$ – $ля^1$ или в кварте $ля^0$ – $ре^1$ и квинте $ре^1$ – $ля^1$. При такой настройке октавы мы получим как раз нулевые биения во втором тоне совпадения спектров (4:2), как и показано выше. Как видим, результат получился не идеальный (но он и вовсе недостижим), а только компромиссный: в первом тоне совпадения у нас возникло небольшое положительное расхождение частичных тонов, а в третьем – отрицательное.

Если в пианино С-16 остановить биения на уровне 2:1, то более высокие тоны совпадения дадут биения с частотами $-0,43$ и $-2,37$ соответственно. Попытка остановить биения на уровне 6:3 даст в первом тоне уже достаточно заметные $+0,8$ б/с, а на уровне 4:2 мы получим $+0,17$ б/с.

Отсюда ясно, что исходная октавная рамка общепринятой области темперирования фортепиано обладает довольно широкой зоной, в пределах которой допустима ее перестройка. От нуля биений на уровне 2:1 до нуля на уровне 6:3 для указанной октавы образуется своего рода «зона толерантности» шириной примерно 2-3 цента. Важно иметь в виду, что будучи приемлемой **гармонически** (то есть по критерию почти полной незаметности биений) в пределах всей этой зоны, в **мелодическом** отношении октава «узкая» (0 биений на уровне 2:1) звучит заметно мягче и спокойнее (если не сказать тусклее), чем «широкая» (0 биений на уровне 6:3), в мелодическом звучании которой больше интонационной яркости и напряженности. В зависимости от интонационных предпочтений пианиста и даже программы сегодняшнего концерта настройщик может и должен выбирать ту или иную конкретную величину исходной октавы.

Отсюда также ясно, что неприкосновенность октавы для темперирования, возможно, отчасти оправданная для инструментов с более гармоничным спектром (органы, язычковые духовые), в случае фортепиано не имеет никакого смысла: все

три рассмотренных варианта настройки октавы, не будучи чистыми в строгом смысле слова, могут быть признаны таковыми в целях получения хорошего строя инструмента. Допустимы и все промежуточные варианты.

Принципиальное несовершенство фортепианной октавы обратило на себя внимание исследователей еще в 30-е годы XX века. И тем не менее, вплоть до начала 70-х годов никто из специалистов в области акустики музыкальных строев не рискнул предложить темперировать октаву. Причиной такой нерешительности, на мой взгляд, был определенный консерватизм теоретиков, завороченных красотой и совершенством классической теории РТС, математически обоснованной еще в начале XVII века французом Мареном Мерсенном и полностью принятой всеми последующими авторитетами в этой области вплоть до наших дней.

Что же касается настройщиков-практиков, они, как мы увидим дальше, не слишком озабочивались теоретическим обоснованием своей работы, довольствовались в этом отношении «классикой», но при этом интуитивно уже нащупывали пути к более справедливому и оптимальному для слуха распределению температурной нагрузки на совершенные консонансы.

Первые из известных мне осознанных попыток отказаться от «чистой» октавы в качестве базового интервала РТС были весьма радикальными. Их авторы предлагали не просто в той или иной степени протемперировать октавы, а вовсе отказаться от них, как базового интервала РТС, и поставить в основу строя другой «чистый» консонанс — квинту. Иначе говоря, они предлагали всю температурную нагрузку снять с квинт и переложить полностью на октавы.

В 1972 году французский настройщик и музыкальный акустик Серж Кордье (1933 – 2005) впервые начал применять, а в 1974 году обнародовал найденный им новый способ построения равномерной темперации, отличающийся тем, что в его основу было положено деление *чистой квинты* на 7 равных полутонов, вместо традиционного деления чистой октавы на 12. С теоретической точки зрения, предложение Кордье заключалось в том, чтобы пифагорову комму делить не между двенадцатью квинтами, а между семью октавами, то есть оставить квинты чистыми, а каждую октаву расширить на $1/7$ часть пифагоровой коммы, что составляет примерно 3 цента.²

Новая темперация, активно пропагандируемая ее автором — авторитетным мастером и исследователем, получила положительные отзывы немало числа музыкантов, в том числе и таких выдающихся, как Иегуди Менухин и наш Андрей Волконский. Одним из важных преимуществ темперации Кордье ее автор считал лучшее совпадение строя фортепиано со строем симфонического оркестра, в котором, как известно, его основа — смычковая группа — настраивается именно по акустически чистым квинтам.³

² И тогда возврат вниз на 7 таких расширенных октав от завышенного на пифагорову комму *соль-диеза* 8-й октавы, упомянутого в сноске на 2-й странице, приведет точно в 440 Гц — квинтовый круг замкнется.

³ Нужно сказать, что в действительности фортепианная квинта с нулевыми биениями на уровне 3:2 оказывается немного шире математически идеальной квинты. Вследствие негармоничности колебаний струн фортепиано отношение частот основных тонов такой квинты на сотые доли процента превышает 3:2, поэтому фортепианная «акустически чистая» квинта не совсем совпадает с оркестровой.

В том же 1974 году в 3-м номере журнала «Советская музыка» была опубликована статья В.Григоренко и П.Винниченко «Новый способ настройки фортепиано» с предложением строить РТС на базе чистой квинты, поделенной на семь равных полутонов, что полностью совпадает с предложением С.Кордье. Не думаю, что здесь могло иметь место какое-то заимствование: информация о темперации Кордье в СССР на тот момент вряд ли была широко доступна, скорее можно предположить, что «идеи уже носились в воздухе» и приходили в голову многим одновременно.

В основу математической модели «квинтовой» темперации (будем называть ее так в силу неопределенности приоритета) положена чистая квинта (интервальный коэффициент 3:2), полутоном имеет, соответственно, величину корня 7-й степени из 3:2, равную 1,059634... (в «октавном» РТС это 1,059463...), а коэффициент октавы здесь расширяется до 2,003876... В октаве $ля^0$ — $ля^1$ расчетная частота биений на уровне 2:1 составляет 0,853...Гц, что **почти совпадает** с вышеописанной реальной октавой с нулевыми биениями на уровне 6:3 иначе говоря, октава при такой настройке хоть и выходит за пределы ее «зоны толерантности», но лишь немного. Хуже обстоит дело с квартами: и без того темперированные примерно на 2 цента в классическом РТС в сторону расширения, они здесь еще больше расширяются (примерно на 1 дополнительный цент) при таком «растягивании» темперации. Так, кварта $ля^0$ — $ре^1$ в математической модели этого строя будет иметь около 1,7 б/с вместо примерно 1 б/с в традиционном РТС.

Напомню еще раз, что все эти расчеты и рассуждения мы делаем на предположении идеальной гармоничности спектров звуков. В каждом конкретном фортепиано все эти цифры несколько изменятся в соответствии с характером и мерой негармоничности инструмента, а также будут иметь некоторую дополнительную неопределенность в связи с тем, что и квинта, подобно октаве, тоже обладает «зоной толерантности». Как показывает прикидочный расчет, для октав негармоничность фортепиано благоприятна в «квинтовом» РТС, их биения оказываются чуть менее частыми, чем в математической модели. И напротив, кварты в такой темперации звучат почти на грани фальши. Большая напряженность звучания обнаруживается и в больших терциях и секстах, зато малые терции и сексты становятся немного мягче.

К сожалению, ни находка С.Кордье, ни инициатива В.Григоренко и П.Винниченко не получили тогда серьезного осмысления, широкого резонанса не вызвали и если и были замечены, то вскоре были практически забыты. И только спустя 14 лет после обнародования их предложения появляется проект Б.Штоппера, менее радикальный по сравнению с квинтовой темперацией и предусматривающий распределение пифагоровой коммы между октавами и квинтами приблизительно в равной степени.

Если сравнить меру расширения интервалов в классическом РТС, француско-советском проекте и предложении Б.Штоппера по величинам теоретического коэффициента полутона в «гармонической» модели каждой из темпераций, то картина будет следующей:

Классика — 1,059463...
 Б.Штоппер — 1,059526...
 С.Кордые — 1,059634...

Нетрудно заметить, что Б.Штоппер, в сущности, выбрал «золотую середину» между консервативной классикой и чрезмерным радикализмом «квинтового» РТС. Как уже было сказано, в проекте Кордые, при всех его достоинствах, октавы все-таки обладают заметной «волной» биений, но это еще терпимо. Главный недостаток «квинтового» РТС — «грязные» кварты: от 1,7 до 2,5 б/с в квартах в пределах октавы $ля^0 - ля^1$ — это, конечно, уже слишком много. Возможно, что именно это обстоятельство и было причиной того, что «квинтовая» температура широкого распространения не получила.

В математической модели температуры Штоппера базовый совершенный консонанс — дуодецима — оказывается за пределами привычных нам октавы и квинты и представляет собой сумму их обеих. Поэтому температурная нагрузка ложится здесь и на октавы, и на квинты: по 1/19 доле пифагоровой коммы на каждую из семи октав и двенадцати квинт квинто-октавного круга. К чести Штоппера следует сказать, что его математическая модель РТС по красоте и изяществу не уступает классической модели.

Но Штоппер в последние десятилетия не был одинок. Появлялись и другие аналогичные и независимые предложения с той или иной степенью температуры октав. Так, сравнительно недавно стало известно, что на фирме Fazzioли принята настройка температуры также с осознанным расширением октавы $ля^0 - ля^1$ до одного биения за три секунды на уровне 2:1, то есть 0,33 б/с. Были и другие похожие предложения, в том числе и от отечественных мастеров. Не зная обо всем сказанном выше, можно было бы оценить их как «революционные» (температуруют октаву!), однако по сравнению с идеями Штоппера и, тем более, «квинтовой» температурой, предложение Фациоли выглядит более чем скромно. В действительности, по крайней мере для отечественных пианино (см. выше), такое «растяжение» октавы оказывается даже менее существенным, чем при упомянутой в начале статьи классической настройке октавы по равенству биений в терции-дециме и кварте-квинте.

Расставим описанные выше температуры по степени растяжения октавы. Самая узкая октава с нулевыми биениями на уровне 2:1 займет в этом рейтинге последнее место. На предпоследнем окажется настройка Фациоли (0,33 б/с для октавы $ля^0 - ля^1$). Далее — классическая октава с нулем биений на уровне 4:2 (0,4 – 0,5 б/с). «Бронзу» завоевывает Б.Штоппер (около 0,6 б/с). И, наконец, чемпионом оказывается французско-советская команда с «чистыми» квинтами, но с уже заметными биениями в октаве (около 0,8 б/с). Имеют право на существование также и все промежуточные варианты.

Из всего сказанного выше можно сделать вывод, что Штоппер, в сущности, всего лишь «застолбил» под своим именем некий маленький участок на широкой и непрерывной шкале, охватывающей разные степени «растяжки» исходной температурной октавы. Разумными границами этой шкалы можно считать, с «левой» сторо-

ны, классический РТС с октавой без биений на уровне 2:1 и теоретическим коэффициентом полутона 1,059463...; «правый» конец этой шкалы образует «квинтовый» РТС с октавой, расширенной до примерно 0,8 б/с и теоретическим коэффициентом 1,059634...

Как уже сказано, степень мелодической яркости и гармонической напряженности октав, да и строя в целом, возрастает по мере продвижения «слева направо» по этой шкале. И даже не выходя на экстремальные ее участки, мастер-настройщик имеет возможность предоставить пианисту те мелодико-гармонические краски, которые отвечают интонационным предпочтениям музыканта и особенностям той музыки, которую он будет исполнять на этом инструменте.

Поговорим теперь о технологии настройки температуры Штоппера для желающих «попробовать ее на вкус», поэкспериментировать с ней. В известных мне источниках информации авторская технология настройки на слух не описана. Рискну предложить «самодельный» вариант, логически вытекающий из идей Штоппера и свойств фортепианных струн. Вот как выглядит расчетная картина реальных биений между компонентами спектров двух «чистых» дуодецим на самой распространенной модели отечественных пианино С-16.

частичные тоны		биения
<i>ля</i> ⁰	<i>ми</i> ²	
1. 220		
3. 660,6	1. 660,6	+0,0 ⁴
6. 1325,3	2. 1323,3	-2,0
9. 1998,2	3. 1990,3	-7,9
<i>ми</i> ⁰	<i>си</i> ²	
1. 164,8		
3. 494,8	1. 494,8	+0,0 ⁴
6. 993,0	2. 990,6	-2,4
9. 1497,4	3. 1488,5	-8,9

Здесь мы также наблюдаем расхождение обертонов различных уровней, аналогичное тому, которое видели в октаве. Однако «удельный вес» и мера заметности биений на уровнях 6:2 и 9:3, уже очень невелики вследствие высокой частоты колебаний, ее большой отдаленности от основных тонов и низкой интенсивности самих обертонов. Тем не менее, мы учтем это расхождение при настройке.

Если настраивать на слух, то лучше всего начать не с *ля*⁰, а с *ми*⁰. Думаю, что простенький тюнер-коробочка со стрелкой для непосредственной настройки этого *ми*⁰ есть у каждого настройщика, точность общей высоты строя он обеспечивает вполне достаточную. Можно, разумеется, настроить этот *ми*⁰ и как темперированную кварту от *ля*⁰ (примерно 0,5 б/с). Итак, по тюнеру или на слух настраиваем ис-

⁴ Плюс означает «чуть больше, чем 0,0»: значение потеряно при округлении.

ходный mi^0 . «Рамка» дуодецимы $mi^0 - si^1$ настраивается с помощью «арки Штоппера».

В описании программы PureTuner сказано, что дуодецима в ней настраивается не по нулевым биениям на уровне 3:1, а по «„золотой середине“ смешанных отношений частичных тонов дуодецимы». Поскольку, как мы видели, в фортепианной дуодециме 2-й и 3-й тоны совпадения спектров имеют отрицательное расхождение обертонов по отношению к 1-му, для компенсации такого расхождения исходную дуодециму нужно настроить чуть «шире нуля» на уровне 3:1. Если удастся уловить биения на уровне 6:2, их достаточно привести к частоте немного ниже 2 б/с (90-100 б/мин).

Затем от mi^0 строится октава вверх с небольшой «растяжкой» так, чтобы 1-й тон совпадения давал примерно 1 биение в 2 секунды, квинта $mi^1 - si^1$ должна «биться» чуть чаще. В дополнение к этому можно от верхнего si настроить октаву вниз, также с медленным биением на уровне 2:1, но чуть чаще, чем в октаве $mi^0 - mi^1$. Здесь должно быть два биения в 3 секунды при почти остановленных биениях в квинте $mi^0 - si^0$. Затем любую из этих октав достаточно разделить на 12 равных полутонов любым известным способом.

Настройка за пределами «рамки» $mi^0 - si^1$ проводится по дуодецимам с помощью «арки Штоппера». По мере ухода от центра диапазона вверх нужно постепенно добавлять частоту биений в дуодецимах пропорционально росту частот колебаний струн. При движении в сторону басов биения в дуодецимах должны постепенно замедляться.

Еще проще получить темперацию Штоппера с помощью программы TuneLab или аналогичной. Задайте в установках программы в экране настроенной кривой отношение частичных тонов 3:1 по всему диапазону инструмента — это и будет темперация Штоппера в ее теоретическом варианте. Достичь же «золотой середины смешанных отношений частичных тонов» можно будет, слегка откорректировав кривую настройки вверх в дискантах и вниз в басах.

Добавлю несколько слов в заключение. Произошедшая за последние десятилетия эволюция теоретических и практических представлений о РТС в его фортепианной реализации в известной мере напоминает эволюцию в геометрии и физике за последние два века. В свое время Евклид принял за аксиому казалось бы очевидный факт, что через точку, лежащую вне прямой, можно провести одну и только одну прямую, параллельную данной. Лобачевский в середине XIX века усомнился в справедливости этого постулата — так родилась новая геометрия, в которой прямых, параллельных данной, может быть или бесчисленное множество, или вообще ни одной, в зависимости от знака кривизны 4-го и 5-го измерений пространства. И лишь в начале XX века физики доказали реальное, физическое право новой геометрии на существование.

Физика Ньютона и геометрия Евклида входят как частный случай в неевклидову геометрию и в физику Эйнштейна и его последователей. И Кордые со товарищи, и Фациоли, и Штоппер, и многие другие мастера, менее искусные в технике «паблик

рилэйшнз», но обладающие профессиональным слухом и здравым смыслом, формируют новое, аналогичное эйнштейновскому, представление о равномерной темперации: **не один и только один «идеальный» РТС, но некоторое непрерывное множество его вариантов, в равной степени имеющих право на существование.** Целесообразность применения того или иного варианта темперации, а точнее говоря, меры растяжения исходной темперационной октавы, зависит от имеющейся «кривизны пространства», то есть меры негармоничности данного фортепиано, предпочтений его хозяина и особенностей исполняемого репертуара. Классический РТС, базирующийся на делении совершенной октавы на 12 равных полутонов, входит в это представление на тех же правах, на каких Евклид и Ньютон живут и здравствуют в современной физической картине мироздания.

P. S. Уже после того, как эта статья была написана, я сделал несколько дополнительных расчетов, основываясь на мензуре пианино С-16, приведенной в книге Аллона и Фадеева издания 1973 года – единственной, какая у меня есть в данный момент под рукой. Вот что у меня получилось:

Коэффициент полутона, как $1/19$ часть интервала между 1-м и 3-м частичными тонами ($494,8 : 164,8 = 3,00292$, см. табличку на с. 6) звука e^0 , равен $1,05958\dots$. Октава $e^0 - e^1$ в соответствии с этим коэффициентом имеет отношение основных тонов $2,00266\dots$, и соответственно, биения в ней на уровне 2:1 имеют частоту $0,31$ б/с. Для звука a^0 , с которого большинство из нас начинает настройку, все эти величины будут такими: $3,0028$; $1,059577$; октава $a^0 - a^1$ $2,00258\dots$; биения в ней $0,41$.

Обратите внимание на последнее число и сравните его с тем, что указано в табличке на 3-й странице для этой же октавы. Вывод хоть и неожиданный, но закономерный: настраивая самым привычным классическим способом пианино арт. 38, мы получаем в результате, по крайней мере, в середине диапазона, **темперацию Бернхарда Штоппера в ее практически чистом виде**, даже если никогда и ничего о ней и о ее авторе не слышали. Комментарии излишни.

Август 2014