

Негармоничность фортепианных струн — что это такое?

Современная мензура фортепиано — диаметры стали, длина и сила натяжения струн — сложилась путем «естественного отбора» уже более века назад. Однако о негармоничности колебаний этих струн исследователи и конструкторы фортепиано активно заговорили сравнительно недавно, в 50-е годы прошлого века. Поначалу казалось, что исследования негармоничности и их результаты имеют чисто теоретическое значение и к практике настройки фортепиано не имеют отношения. Вся теория музыкальных строев и темперации, в том числе и равномерной, теория и практика настройки базировались на предположении, что спектр колебаний струн вполне гармоничен — и при этом вроде бы проблем не возникало. Многие поколения настройщиков успешно работали, ничего не зная об этом явлении и не задумываясь о том, что частоты обертонов фортепианного звука не кратны частоте основного тона.

Лишь в последние десятилетия стало ясно, что негармоничность — это существенное и неотъемлемое свойство струн фортепиано, заметно влияющее не только на тембр инструмента, но и на его строй, поэтому знать природу этого явления и учитывать его при настройке пианино и роялей для фортепианных мастеров по меньшей мере желательно.

Попытаемся выяснить, что такое негармоничность, причины ее возникновения. Как известно, обертоны в звуке струны возникают оттого, что она колеблется не только целиком, но одновременно и своими половинами, третями, четвертями, пятыми, шестыми и т. д. частями. Если бы струна была идеально гибкой, эти половины, трети, четверти, пятые части и т. д. создавали бы звуки с частотами, точно кратными частоте основного тона. Струна, настроенная на 100 Гц, давала бы идеальный гармонический спектр с частотами 100, 200, 300, 400, 500 Гц и т. д. Почти так и происходит в клавиринах: струны там очень тонкие, и их жесткость мала по отношению к силе их натяжения.

Фортепианные же струны значительно толще, их жесткость намного больше. Струнная сталь при деформации сильно пружинит. Получив деформацию от удара фортепианного молотка, струна стремится вернуться в исходное положение покоя не только за счет силы ее натяжения, но и за счет упругой силы жесткости стали. При этом колебания целиком, т. е. первая мода колебаний (основной тон) подвергается воздействию жесткости, условно говоря, только в трех точках: у неподвижных опор струны и в ее середине. Для второй моды (колебания половин струны, второй частичный тон) жесткость действует уже в четырех точках: две опоры и две пучности. Для третьей моды — 5 точек воздействия: две опоры и три пучности. Для четвертой — 6 точек, для пятой — 7 и т. д. Таким образом, число точек приложения силы жесткости растет с номером частичного тона.

Не менее важно то обстоятельство, что в колебаниях 1-й моды сила жесткости приложена к длине всей струны, для 2-й моды плечи приложения этой силы вдвое короче, для 3-й — втрое и т. д. А чем короче плечо, тем больше сила жесткости.

Таким образом, чем выше частичный тон по номеру и звучанию, тем сильнее проявляет себя жесткость струны и тем заметнее повышается частота колебаний данного частичного тона относительно ее идеального значения, точно кратного основному тону.

Исследователи выяснили, что завышение частоты частичного тона прямо пропорционально квадрату его номера. Например, если основной тон за счет жесткости струны завышен на 1 цент, то 2-й частичный тон будет завышен на 4 цента, 3-й — на 9 центов, 4-й — на 16, 5-й — на 25, 10-й — на 100 центов.

Мера негармоничности зависит от нескольких факторов. Чем толще и короче струна, тем негармоничность больше. Чем сильнее натянута струна, тем негармоничность меньше. В басовом и теноровом регистре длинные и относительно тонкие сильно натянутые струны концертного рояля менее негармоничны, чем короткие, толстые и не так сильно натянутые

струны малогабаритного инструмента. В последнем случае негармоничность часто оказывается слишком большой, что делает тембр неприятным, а звук, особенно в крайних басах, интонационно неопределенным, а следовательно уже и не музыкальным.

Меру негармоничности стальных струн принято выражать коэффициентом негармоничности (далее — КН), вычисляемым по формуле:

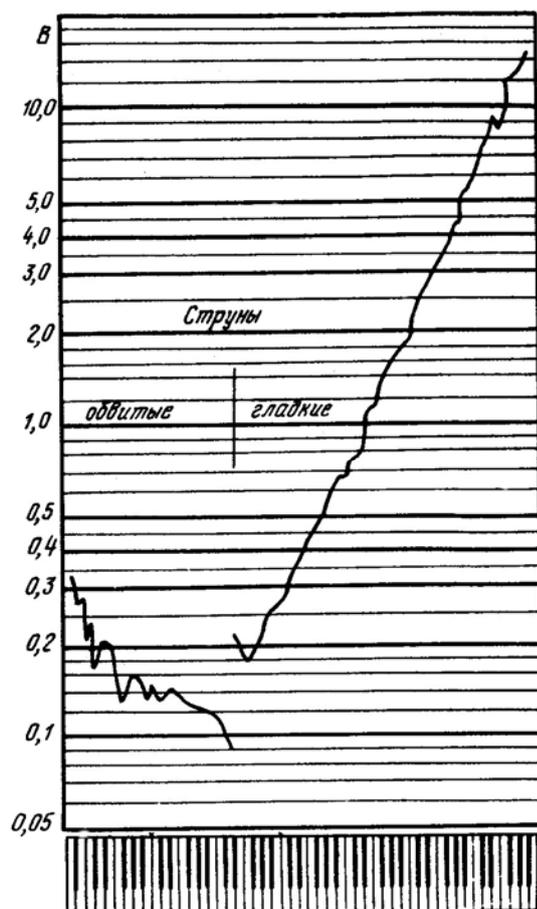
$$B = 3,3 \cdot 10^{14} \frac{d^2 (\text{мм})}{L^4 (\text{мм}) f_1^2 (\text{Гц})}$$

Здесь d — диаметр струны, L — длина ее рабочего отрезка, f_1 — частота основного тона. Завышение того или иного частичного тона можно определить по формуле:

$$\delta = Bn^2,$$

где δ — величина завышения n -го частичного тона в центах.

В реальном фортепиано КН максимален в самых верхних дискантах (струны очень короткие) и в самых низких басах (струны относительно короткие и очень толстые). Вот результаты измерения КН струн отечественного пианино модели «Ноктюрн» из книги А.С.Галембо «Фортепиано. Качество звучания» (М., 1987).



Для верхних дискантов высокая негармоничность ($КН > 10$) не представляет никакой опасности, поскольку спектр этих звуков лишен обертонов, и фальши не возникает. По мере приближения к середине диапазона негармоничность уменьшается, но одновременно растет число обертонов в спектре звуков. В пианино данной модели и в большинстве инструментов

таких же габаритов местный минимум негармоничности для гладких струн оказывается чуть ниже привычной для нас области темперирования $ля^0—ля^1$.

Абсолютный минимум КН приходится на первые обвитые струны тенорового регистра с последующим его плавным или ступенчатым повышением вплоть до крайних басов. Вот здесь это увеличение более неприятно. В спектре струн тенорового и басового регистров количество обертонов велико (до 30-40 в крайних басах), их интенсивность велика и как правило выше интенсивности основного тона, который в крайних басах и вовсе не обнаруживается даже чувствительной аппаратурой (дека не в состоянии излучать столь низкие частоты). КН для крайнего $ЛЯ_2$ составляет 0,33, значит 10-й частичный тон этой струны завышен на 33 цента, то есть треть полутона, начиная с 13-го частичного тона и выше они уже будут в зоне гармонического спектра звука $Си-бемоль_2$, начиная с 22-го — в зоне $Си_2$, начиная с 28-го — в зоне $До_1$. В результате подобного «размазывания» спектра по частотным областям трех-четырех соседних тонов хроматической гаммы о точной высоте звука такой струны можно говорить лишь очень условно. Однако к вопросу о том, как улучшить высотную определенность звуков крайних басов малогабаритного инструмента, мы вернемся позже.

Нужно сказать, что в принципе негармоничность спектра фортепианных звуков, если она не чрезмерна, вовсе не есть зло. Это не недостаток, это лишь специфическое свойство тембра фортепиано, органически ему присущее. Если искусственно лишить звук фортепиано негармоничности, тембр инструмента потеряет заметную долю своеобразия и даже красоты. Замечу в скобках: не поленившись сделать обмеры и расчеты негармоничности нескольких хоров первой октавы концертного «стейнвея», я обнаружил КН чуть больше, чем у соответствующих струн вышеупомянутого пианино!

Есть основания полагать, что фортепиано довольно быстро вытеснило из музыкального обихода своих предшественников — клавесин и клавикорд — отчасти даже именно благодаря негармоничности, вызвавшей необходимость прогрессивного завышения дискантов и занижения басов (вспомним кривую Рейлсбека), что придало интонационную яркость крайним регистрам, заметно большую, чем у долгозвучных клавишных — гармоник всех разновидностей и органов. С негармоничностью не надо бороться, но ее нужно знать, учитывать и, по возможности, оптимизировать.

Вернемся к графику на стр. 2. В зоне теноровых необвитых струн тенденция постепенного уменьшения КН при движении от дискантов к басам прерывается, кривая круто загибается вверх. Причина этого — в ограниченных габаритах инструмента. Вплоть до точки минимума этой кривой длины струн увеличивались в среднем на 5% на каждый полутон. Но к середине малой октавы сохранить такое же увеличение длины струн не удастся, поскольку штег здесь опускается почти до цокольного пола и вынужденно переходит почти в горизонталь. Чтобы сохранить достаточную силу натяжения струн (это необходимо для их энергоемкости, способности звучать достаточно громко и долго), приходится увеличивать диаметр струн. Поглядев еще раз на формулу расчета КН, мы поймем причину резкого роста последней в этом участке: квадрат диаметра струны в числителе прогрессивно растет, а четвертая степень длины струны в знаменателе формулы почти не увеличивается. Отсюда и рост коэффициента.

Очень неприятно выглядит резкий перепад КН на переходе от последних гладких к первым обвитым струнам: 0,22 — 0,09, более чем вдвое в двух соседних хорах. Последний необвитый хор имеет диаметр струн 1,075 мм, струны первого обвитого хора имеют kern 0,85 мм, то есть почти на 30% тоньше. Кроме того, струна с kernом 0,85 мм и навивкой канителью 0,25 мм имеет погонную массу, эквивалентную гладкой стальной струне диаметром 1,24 мм, и для получения нужного тона ее приходится натягивать заметно сильнее. Все это доводит негармоничность первых обвитых струн до экстремально низкого значения. Это не слишком хорошо и само по себе: тембр теряет фортепианный «негармоничный» оттенок, а кроме того, большой контраст величины КН в соседних хорах создает трудности в настройке и интонировке этого участка. Такой перепад особенно

характерен для инструментов, в которых первые обвитые хоры расположены на нижнем краю дискантового штега.

Большой рояль лишен обоих этих недостатков, поскольку его габариты позволяют сохранить увеличение длины струн на 5% практически до конца тенорового регистра и обеспечить плавный спад кривой КН. Кроме того, переход от длинных струн крайнего тенорового хора к более коротким струнам первого баса обеспечивает меньшую величину скачка кривой КН. Наконец, длинные и относительно тонкие струны басового регистра менее негармоничны, чем в малых инструментах.

Как же учитывать все перечисленное при настройке фортепиано? Попробуем разобраться и в этом вопросе.

Негармоничность фортепианных струн оказала свое влияние на характер настройки пианино и роялей давно, с самого момента рождения фортепиано, причем, если можно так выразиться, без ведома самих настройщиков. Настраивая октаву на слух, мы сводим в ноль биения между основным тоном верхнего и вторым частичным тоном нижнего звука, имеющего частоту F . Тем самым, даже ничего не зная о негармоничности, мы верхний звук октавы настроим немного выше идеального математического значения $2F$, а именно на частоту чуть завышенного обертона нижней струны. Следующая октава, выстроенная от верхнего звука данной, будет также расширена, еще один октавный шаг даст еще большее завышение, поскольку негармоничность струн растет по мере продвижения вверх по диапазону.

Настраивая вниз от середины диапазона, мы также будем получать слегка расширенные октавы. Повторю, это происходит само собой, как следствие имеющейся негармоничности и стараний настройщика получить как можно более чистые октавы. Именно по причине негармоничности дисканты хорошо настроенного фортепиано прогрессивно завышаются, а басы занижаются. Свою знаменитую кривую О. Рейлсбек опубликовал в 30-е годы XX века, но методика настройки, по крайней мере, настройки октав, уже существовала задолго до рождения фортепиано и принципиально с тех пор не менялась.

Возникает мысль: если негармоничность при настройке учитывается сама собой, автоматически, то и незачем о ней помнить и знать, будем работать, как работали раньше, и дело с концом.

На это есть серьезные возражения. Во-первых, настоящий мастер (если он не ремесленник) должен знать свой предмет досконально. Во-вторых, знание особенностей негармоничности и их учет могут дать в руки конструкторов фортепиано средства оптимизировать мензуру струн, да и всю конструкцию вновь разрабатываемых моделей пианино и роялей. В-третьих, владея информацией о негармоничности, мыслящий настройщик имеет возможность сознательно овладеть такими тонкими нюансами в своей работе, какие доступны, и то лишь отчасти, только самым талантливым представителям нашей профессии, обладающим высокоразвитой интуицией, компенсирующей дефицит информации.

Рассмотрим, какие особенности вносит негармоничность в технологию настройки «рабочих» интервалов и начнем с унисонов. Настраивая сильно расстроенный унисон, мы только в самом начале «цепляемся» слухом за биения основных тонов двух струн. По мере приближения к цели эти биения в какой-то момент становятся столь медленными, что мы их уже не слышим. Но биения вторых частичных тонов теоретически вдвое чаще, третьих — втрое, четвертых — вчетверо и т. д. (в негармоничных струнах и еще чуть больше). Пока мы не сведем в ноль биения в самом верхнем из слышимых обертонов, унисон не чист.

А теперь представим себе, что две струны одного хора имеют разные КН (например, поставлены струны разного диаметра). Поскольку все одноименные обертоны в таком хоре завышены немного по-разному, добившись нуля биений в любом данном обертоне, мы получим биения разных частот во всех остальных. Такой унисон чисто настроить невозможно, можно лишь попытаться найти некий оптимум настройки и получить пусть не чистый унисон, но хотя бы наименее фальшивый. Именно по этой причине многие

руководства справедливо рекомендуют при обрыве струны парного обвитого хора заменить сразу обе струны, особенно в старых инструментах. Даже подобрав точные диаметры керна и канители для новой струны, мы вряд ли сумеем сегодня найти струнную сталь с той же плотностью и модулем упругости, что и в старом керне, да и получить плотность навивки, точно соответствующую старой струне, тоже скорее всего не удастся.

Нередко и «родные» струны двухструнных басовых хором доставляют настройщику подобные неприятности. Небольшие отклонения в силе натяжения канители и в плотности укладки ее витков на керн неизбежно приводят к расхождению величины КН в двух на первый взгляд абсолютно одинаковых струнах. Настройщик вынужден мучительно искать такую настройку, при которой весь комплект неустраимых биений производит наименее неприятное впечатление. Радикальной мерой решения проблемы здесь будет только аккуратное изготовление новой пары струн для такого дефектного унисона.

Что же касается гладких струн, то здесь чем выше по звучанию данный хор, тем менее чувствителен он к разнице диаметров и модуля упругости стали. Как уже сказано, верхние дисканты, примерно от середины третьей октавы и выше уже практически лишены обертонов, поэтому разная негармоничность струн для такого хора просто не существенна, и хороший унисон здесь возможен даже при заметной разнице диаметров струн (хотя и здесь ради равной нагрузки на колки лучше ставить струны номинального диаметра).

Но по мере движения вниз число слышимых, а следовательно, могущих дать неустраимые биения, обертонов растет, частоты высоких, сильно подверженных влиянию негармоничности обертонов спускаются в хорошо слышимую область, и здесь уже требуется точное совпадение параметров струн одного хора. Для ориентира в этом отношении полезно знать, что верхняя граница слышимых обертонов по всему диапазону обычного современного фортепиано лежит около 1500–2000 Гц. В более высокой области обертоны если и возникают, то имеют очень малую интенсивность и быстро гаснут.

Перейдем теперь к октаве. Все руководства, учебники и методические пособия относятся к октаве, как к некоей «священной корове». Если прочие совершенные консонансы — квинты и кварты — надо настраивать «чуть уже» и «чуть шире» чистого натурального их размера ради получения равномерной темперации, то в отношении октавы вердикт всех авторов однозначный: только чистая, только точно 2:1, никаких биений! Однако с учетом негармоничности такое требование, если понимать его строго, оказывается просто невыполнимым (за очень редкими исключениями).

Проанализируем фортепианную октаву поподробнее, с учетом негармоничности. Вот данные по частотам биений в первых пяти тонах совпадения спектра в октаве $ля^0—ля^1$ (частоты совпадений здесь и далее указаны округленно, знак минус у числа биений означает, что обертон верхнего звука ниже обертона нижнего):

№ тона совпадения	б/с	частота
1. (2:1)	0	440 Гц
2. (4:2)	-0,7	881 Гц
3. (6:3)	-2,7	1323 Гц
4. (8:4)	-5,1	1767 Гц
5. (10:5)	-9,7	2215 Гц

Как видим, совместив в ноль биений первый тон совпадения спектра октавы, мы вынужденно оставим довольно заметные – 0,7 б/с во втором тоне, – 2,7 б/с в третьем и еще более частые, хотя и менее слышимые биения в более высокой зоне. Можно ли считать такую октаву чистой? — Очевидно, нет. Если слегка расширить октаву, можно остановить биения во втором тоне (4 : 2, 881 Гц). При этом более высокие обертоны станут бить пореже, но зато появятся биения в первом тоне совпадения, на уровне 440 Гц, теперь уже со знаком плюс. Ситуация сходна с поиском унисона струн с разной негармоничностью.

В этом регистре с точки зрения слышимости наиболее важны первые два тона совпадения. И «чистой» (именно только в кавычках) данная октава будет тогда, когда будет

найден тот трудноуловимый оптимум настройки (или, если хотите, расстройки) октавы, при котором баланс между плюсом первого и минусом второго тона совпадения будет производить наиболее благоприятное впечатление на слух. Акустически чистой такую октаву не назовешь, но искать и найти такой оптимум можно и нужно. Слуховые предпочтения в этом вопросе могут быть разными, и этот оптимум у каждого настройщика свой!

По мере продвижения вниз к крайним басам эта проблема приобретает все большую остроту.

Добавлю пару слов об известных способах контроля настройки октавы $ля^0—ля^1$ сравнением частот биений в кварте $ля^0—ре^1$ и квинте $ре^1—ля^1$. а также в терции $фа^0—ля^0$ и в дессиме $фа^0—ля^1$. В обоих случаях опорный тон, дающий контрольные биения с каждым из звуков октавы, соответствует 4-му частичному тону ее нижнего звука и второму — верхнего. Таким образом, выверенная этим способом октава будет иметь ноль биений в тоне совпадения 4 : 2, а не 2 : 1.

Рассмотрим теперь квинту. Теория настройки РТС предписывает в квинте $ля^0 — ми^1$ сделать – 0,7 б/с (минус по-прежнему означает, что частота обертона верхнего звука ниже частоты обертона нижнего). Но речь в теории идет только о первом тоне совпадения спектров квинты — 3 : 2. Идеальный спектр в следующем тоне совпадения 6 : 4 даст при этом удвоенную частоту биений – 1,4 б/с, далее (9 : 6) утроенную – 2,1 б/с, затем 2,8 б/с и так далее. А вот каковы биения в реальной фортепианной квинте $ля^0 — ми^1$:

№ тона совпадения	б/с	частота
1. (3:2)	– 0,7	661 Гц
2. (6:4)	– 2,7	1325 Гц
3. (9:6)	– 5,8	1998 Гц

Как видим, на «правильные» 0,7 б/с наслаиваются дополнительные еще пока хорошо слышимые биения 2,7 Гц. (Биения в третьем тоне совпадения оказываются уже на границе слышимости и практически незаметны.) Наша квинта окажется как бы перетемперированной. Нередко неопытные настройщики принимают эти более частые биения за основные, доводят их частоту до требуемых 0,7 в секунду, и в результате квинта оказывается даже шире пифагоровой! Знать это обстоятельство необходимо, чтобы избежать такой ошибки.

Замечу еще, что поскольку октава $ля^0 — ля^1$ у нас уже слегка расширена, то и квинты ради равномерности темперации должны быть чуть шире, чем предписывает теория, и – 0,7 б/с придется слегка уменьшить. При этом удобнее оказывается ориентироваться на биения 2-го тона совпадения, частота которых лучше определяется на слух. Установив их частоту приблизительно на 2,5 б/с, мы получим хорошую темперированную квинту $ля^0 — ми^1$.

Теперь о кварте. В области темперирования $ля^0 — ля^1$ 2-й тон совпадения кварт (8 : 6) располагается довольно высоко, в зоне 1760 — 3000 Гц. Интенсивность этих биений невелика, и они практически не мешают. Однако ниже области темперирования этот тон совпадения оказывается уже в хорошо слышимой зоне и в малых инструментах проявляет себя своеобразно. Вот как выглядит в таком пианино кварта $ми^0 — ля^0$:

№ тона совпадения	б/с	частота
1. (4:3)	+ 0,7	661 Гц
2. (8:6)	– 2,8	1328 Гц

Вследствие резко возрастающей негармоничности (вспомним о загибе кривой КН) и достаточно высоких номеров бьющих обертонов, биения в 1-м и 2-м тонах совпадения имеют разный знак: на уровне 4 : 3 мы по требованию РТС расширяем кварту до 0,7 б/с (обертон верхнего звука кварты выше обертона нижнего), но на уровне 2-го тона совпадения 8 : 6 обертон верхнего звука оказывается ниже обертона нижнего!

Здесь нам снова придется искать оптимум, однако не только учитывая при этом характер звучания самой кварты, но и заботясь о чистоте строя. Попытка расширить кварты ради замедления слишком заметных частых «минусовых» биений во 2-м тоне совпадения приведет не только к увеличению частоты биений 1-го тона, но и к заметному занижению строя в этом участке диапазона — мы рискуем ухудшить звучание терций и секст. Кроме того, на переходе к обвитым струнам резкий скачок КН приведет к такому же скачку высоты строя и, соответственно, скачку в качестве и частоте биений в терциях и секстах.

Все это заметно затрудняет настройку в зоне первых гладких теноров и на переходе к обвитым струнам. Здесь нередко приходится жертвовать качеством кварт ради качества строя или наоборот, делать кварты «почище», но мириться с некоторой неровностью строя этого участка. Выбор — за настройщиком.

Мы видим, что негармоничность струн, умеренная и даже «вкусная» в концертном рояле, не только заметно ухудшает звучание малых инструментов, но и осложняет работу настройщика с ними. Очевидно, что мензура и конструкция современных пианино и малогабаритных роялей нуждаются в оптимизации.

Привычная для нас граница теноров и басов в пианино и малых роялях, находящаяся на стыке большой и малой октав (первый бас — *Си-бемоль*, *Си*, do^0 или $do-диез^0$), сложилась исторически. Для высокорослых пианино и сравнительно крупных кабинетных роялей конца XIX — начала XX века это и был оптимум, найденный конструкторами методом проб и ошибок. Именно здесь габариты корпуса этих инструментов начинают ограничивать возможность вышеупомянутого увеличения длины гладких струн в среднем на 5% на каждый нисходящий полутон. Хорошо всем нам известный 102-й артикул своим ростом и мензурой почти соответствовал этому оптимуму. Здесь последние необитые струны ($do-диез^0$) имеют почти достаточную длину и оказываются только в зоне самого начала загиба кривой КН. Первый бас do^0 , расположенный уже на басовом штеге, имеет заметно меньшую длину и навит на довольно толстом керне, благодаря чему скачок КН на переходе от гладких к обвитым струнам сравнительно невелик.

Когда мода потребовала уменьшения габаритов инструментов, конструкторы оставили старый расклад диапазона по участкам и просто укоротили струны. Резко увеличившаяся негармоничность крайних гладких теноров (L^4 в знаменателе формулы расчета КН !) сразу обратила на себя внимание. Пытаясь устранить эту неприятность, стали ставить тонкие обвитые струны на несколько первых теноровых хоров, однако избавившись от излишней, столкнулись с недостаточной негармоничностью этих струн и получили к тому же резкий скачок КН.

Судя по известным мне относительно новым моделям пианино и малых роялей, эта проблема до сих пор большинством фортепианных фирм не решалась. Одни фирмы продолжают выпускать малые инструменты с гладкими тенорами вплоть до *Си* и обвитыми только в басовом участке, другие заменяют гладкие струны в тенорах на обвитые. О недостатках обоих конструкторских решений мы уже поговорили.

Мне встретились лишь два инструмента, в которых была сделана попытка решить эту проблему. Первый — рояль-миньон (145 см) фирмы Gebr. Niendorf приблизительно 60-х годов выпуска. В нем гладкие тенора заканчиваются на $фа^0$, то есть в самом начале загиба кривой КН, а полноценный обвитый басовый регистр начинается от $ми^0$ и ниже. Здесь ни излишней негармоничности в малой октаве, ни резкого скачка КН на переходе к басам уже нет. Второй имел компромиссное решение. В пианино Geyer (100 см) примерно 30-летнего возраста гладкие тенора заканчиваются на хоре $ля^0$, затем следуют четыре обвитых хора, а басовый регистр начинается от $ми^0$. От загиба кривой КН конструкторы избавились полностью, но скачок негармоничности остался.

Вторым участком диапазона малогабаритных инструментов, в котором негармоничность неоптимальна, являются самые низкие басы. Как уже сказано, интонационное качество трех-шести последних басов в пианино и в малых роялях оказывается ниже всякой критики. Причина этого — чрезмерная негармоничность,

обусловленная слишком толстыми и жесткими кернами, и очень протяженный спектр звуков. Попробуем выяснить возможные пути решения этой проблемы.

Вот данные по мензуре пианино модели С-16, приведенные в таблице на стр. 30 в известной книге С.Аллона и И.Фадеева «Ремонт и настройка пианино и роялей» (М., 1973): струна $Ля_2$, диаметр керна 1,500 мм, натяжение 120 кгс. На стр. 23 той же книги приведена таблица параметров струнной стали, из которой можно узнать, что разрывное усилие такого керна — 370 кгс. Таким образом, у этой струны запас прочности на разрыв составляет более 200% ! Однако из тех же таблиц нетрудно выяснить, что этот запас в других хорах конструкторы нередко выбирают и намного ниже. Самым рискованным в этом смысле оказывается хор *ре-диез*⁰ (кern 0,850 мм, натяжение 86 кгс, запас прочности на разрыв менее 60%). Если принять для надежности 100%-ный запас прочности (натяжение около половины разрывного усилия), то при сохранении той же погонной массы струны $Ля_2$ и того же ее натяжения для ее керна достаточно взять сталь диаметром 1,175 мм. Расчет показывает, что КН струны снизится примерно в 1,6 раза, что даст его значение 0,2 вместо нынешних 0,33.

Правда, если просто перемотать старую канитель на новый kern, уменьшится наружный диаметр и погонная масса струны, и для получения прежней настройки силу натяжения придется немного уменьшить. КН при этом слегка возрастет, однако в конечном итоге рассчитывать на заметный положительный результат можно.

К сожалению, мой личный опыт подобной оптимизации негармоничности басов малогабаритного инструмента невелик. Чуть больше месяца назад мне пришлось в 155-сантиметровом рояле перемотать «глухой» бас $Си_2$. При этом я попробовал заменить «родной» kern 1,4 мм на 1,3 мм. Новая струна зазвучала хоть и ненамного, но все же заметно лучше исправных соседних. Отмечу еще, что в пианино Шольце 120 см начала 60-х годов крайние басы навиты на кернах 1,3 мм, и качество звучания басов интонационно определенное.

Из всего вышесказанного можно сделать следующие выводы.

1. Негармоничность фортепианных струн оказывает определенное влияние не только на тембр фортепиано, но и на его строй. Форма кривой Рейлсбека — прямое следствие негармоничности, при этом чем негармоничность больше, тем круче загибы этой кривой на краях диапазона.

2. Акустически чистые октавы на фортепиано в большинстве случаев недостижимы. В среднем регистре фортепиано совмещение в нулевых биениях 2-го частичного тона нижнего звука октавы с основным тоном верхнего оставляет в суммарном спектре октавы заметные биения в более высоких тонах совпадения. Стараясь замедлить эти биения и получить максимум чистоты в октаве, настройщик расширяет ее, и без того уже расширенную за счет негармоничности первого обертона, еще больше. Поиск оптимальной настройки октавы — творческая задача настройщика.

3. Следствием расширения октавной рамки области темперирования становится расширение и всех остальных интервалов. Рекомендованные классической теорией РТС частоты «темперационных» биений в квартах, квинтах и несовершенных консонансах требуют корректировки.

4. Негармоничность заметно ухудшает тембр и строй малогабаритных инструментов. Она осложняет работу настройщика с этими пианино и роялями, мензура и конструкция которых, унаследованные от более крупных инструментов прошлого, требуют пересмотра.

В завершение своего сообщения хочу отметить, что знание природы и следствий негармоничности фортепианных струн может дать мастеру возможность не только учитывать ее при настройке, но и в некоторой степени ею управлять. А это значит — работать более профессионально, добиваться лучших результатов, к чему мы все и стремимся.

29 мая 2009 г.