

Об особенностях колебаний фортепианных струн, или Почему кривая хорошей настройки не гладкая?

За пару последних десятилетий в разных странах было проведено немало научных исследований в области акустики фортепиано. Такие исследования обычно не попадают в поле зрения настройщиков, поскольку имеют, в основном, направленность на решение проблем производства пианино и роялей, повышения качества продукции фортепианных фабрик, удешевления производства и т. п. Нас же больше интересуют вопросы, связанные с обслуживанием инструментов и, в частности, с их настройкой. Авторы упомянутых работ к этим вопросам напрямую обычно не обращаются, и тем не менее, читать их стоит и нам, поскольку такое чтение иногда позволяет, как увидим дальше, извлечь из их текстов кое-что для нас полезное.

В этой статье я хочу познакомить коллег с результатами некоторых из этих исследований. В частности, в опоре на эти результаты я попытаюсь объяснить одно давно известное явление, на которое, однако, теория настройки фортепиано пока что внимания не обращала и объяснения которому не дала, а именно — негладкий характер настроечной кривой хорошо настроенного инструмента. Но сначала — пару слов из истории вопроса.

Равномерная темперация (РТ), в которой настраиваются сегодня практически все фортепиано в мире, насчитывает уже без малого полтысячи лет своего существования. В Европе идею такой настройки первым высказал в 16-м веке (1533) итальянец Джованни Ланфранко, назвав ее энгармоническим строем. Столетием позже (1636) француз Марен Мерсенн сформулировал математическую модель РТ, которую сейчас принято кратко представлять в форме интервального коэффициента полутона: $2^{1/12} = 1,05946309\dots$ Это значит, что октаву (двойка в левой части равенства) мы делим на 12 логарифмически равных частей-полутонов. Зная найденный Мерсенном коэффициент полутона и частоту базового звука строя (сейчас это обычно $A_4 = 440$ Гц), можно с любой желаемой точностью рассчитать значения частот для всех тонов полной шкалы фортепиано.

Для наших практических целей классическую математическую модель РТ удобнее представить графически, в координатах «номер клавиши — отклонение высоты звука в центах». У нас получится строго горизонтальная прямая линия с нулевой ординатой — это означает, что все тоны шкалы точно соответствуют вычисленным значениям частот, без каких-либо отклонений от номиналов математической модели.

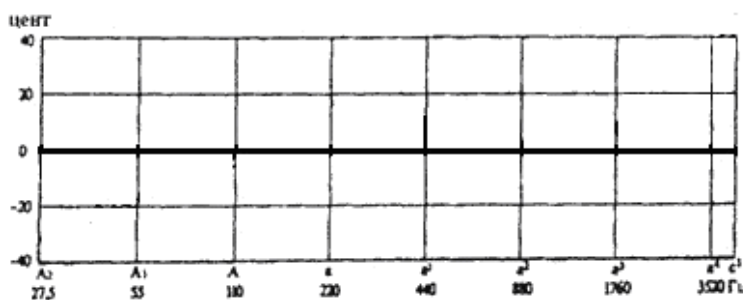


Рис. 1. Графическое представление математической модели РТ.

Эта модель прослужила в качестве теоретической основы настройки фортепиано в РТ вплоть до конца 30-х годов XX века. Именно тогда в музыкально-акустических исследованиях впервые начали применяться более точные, чем ранее, электронные методы анализа звука. Вооружившись современной ему техникой анализа, американский исследователь О.Рейлсбек обнаружил, что реальная высококачественная настройка рояля не соответствует этой модели. Графики частот основных тонов хорошо настроенных форте-

пиано показали закономерные отклонения от теоретической горизонтальной прямой. Мало того, измеренные Рейлсбеком частоты звуков давали негладкие, ломанные линии, притом, разные для разных инструментов. Однако по завершении измерений ученый дал себе труд усреднить все эти «шероховатости» на графиках и получил, наконец, ту самую знаменитую красивую плавную кривую, названную впоследствии в его честь «кривой Рейлсбека» (рис. 2).

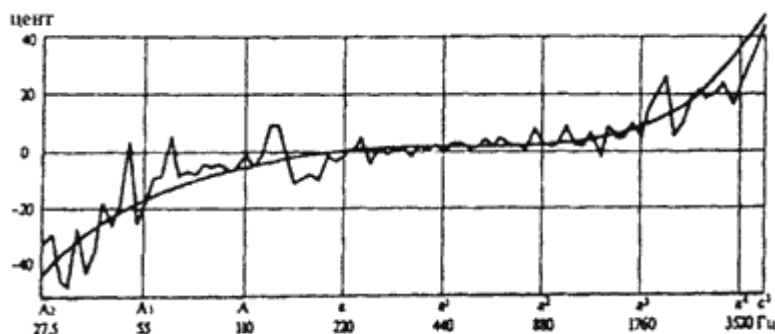


Рис. 2. График частот основных тонов хорошо настроенного фортепиано (ломаная линия) и кривая Рейлсбека (плавная кривая).

Вскоре была найдена и основная причина отклонений усредненной настроечной кривой от теоретической горизонтали, а именно, негармоничность колебаний струн, заставляющая настройщика слегка «растягивать» октавы, а с ними и все остальные интервалы, ради благозвучия строя в целом. Этим и объясняется общая тенденция прогрессивного занижения настройки в басах и более энергичного ее завышения в дискантах.¹

Красота полученной авторитетным исследователем плавной кривой оказала своего рода завораживающее воздействие на специалистов по настройке фортепиано и дала им повод полагать, что «шероховатости», обнаруженные О.Рейлсбеком в «сыром материале» его исследования, т. е. в реальных настройках роялей, обусловлены лишь неточностями настройки и возникли вследствие несовершенства слуха настройщиков. Иначе говоря, считали, что идеальная настройка — это как раз плавная кривая Рейлсбека, а «шероховатости» реальной настройки — случайное зло, и чем меньше они, тем лучше настроен инструмент.

Такая идеология утвердилась в сознании теоретиков настройки и даже многих настройщиков-практиков с той самой поры, когда О.Рейлсбек опубликовал результаты своего исследования.² Она господствовала больше полувека, почти до наших дней. Сомнения в справедливости таких воззрений стали возникать только на грани XX—XXI веков с появлением в широкой продаже «продвинутых» тюнеров и компьютерного ПО, способных не только с высокой точностью определять высоту звука, но и анализировать меру негармоничности колебаний струн настраиваемого фортепиано. Такое ПО рассчитывает для каждого инструмента свою собственную, индивидуальную «кривую Рейлсбека» с учетом измеренной негармоничности его струн.

Естественно, что эту кривую создатели тюнеров и ПО старались сделать именно гладкой, в полном соответствии с вышеописанной идеологией. И тут, к огорчению как создателей этой техники, так и ее пользователей, выяснилось, что «идеальная» гладкая кривая — вовсе не идеальна и что выполненная по тюнеру или компьютерной программе настройка, по степени равномерности темперации и по качеству звучания инструмента в целом, уступает хорошей профессиональной настройке на слух.

В несовершенстве гладкой кривой Рейлсбека нетрудно убедиться: тщательно выстроенное по самому «продвинутому» тюнеру или самой последней версии ПО фортепиано в большинстве случаев обнаруживает заметные неровности строя при обычной проверке — проигрывании восходящих или нисходящих хроматических последователь-

¹ Подробнее о негармоничности колебаний фортепианных струн см. статью:

http://az-art.ru/pdf/forum-library/negarmonichnost_fortepiannykh_strun-hto_ehto_tako.pdf

² O.L. Railsback, Journal of the Acoustical Society of America 9, 274 (1938).

ностей одноименных консонансов. Эти неровности невелики, и, в целом, нынешняя электронная настройка обеспечивает приемлемое для большинства практических случаев качество строя, но мы-то ведь стремимся к идеалу!

Стало очевидно, что в опоре на традиционную идеологию найти путь к этому идеалу не удастся. Чтобы этот путь все-таки нащупать и выйти из сложившегося тупика, попробуем сначала четко сформулировать ту цель, которую ставит перед собой настройщик, работающий на слух. Чего он добивается, вращая колки настраиваемого фортепиано, как представляется ему идеал настройки?

Отвечая на этот вопрос практически, нам нет нужды измерять негармоничность струн инструмента и вспоминать многозначные иррациональные числа интервальных коэффициентов. Нам нужно только одно: добиться, чтобы все октавы звучали как можно более чисто, то есть с минимально заметными биениями, а остальные интервалы настроить так, чтобы в хроматических последовательностях одноименных консонансов частота биений плавно росла снизу вверх по всему диапазону. Если настройка этим требованиям отвечает полностью, она идеальна.³ Но при этом, как показал уже 80 лет назад О.Рейлсбек, кривая значений частот основных тонов фортепиано неизбежно утрачивает свою плавность и становится шероховатой, ступенчатой, «зазубренной».

В чем же тут дело? Почему неплавная линия частот основных тонов хорошо настроенного фортепиано воспринимается на слух как равномерная температура, а плавная настроечная кривая ощущается как не вполне равномерная? В поисках ответа на эти вопросы можно прийти к предположению о том, что сами колебания струн фортепиано происходят не совсем так, как представляла их нам до сих пор теория настройки фортепиано. Как мы увидим дальше, такое предположение справедливо.

Однако прежде чем переходить к ответам на поставленные вопросы, сделаем небольшое отступление. Одна из первых известных мне попыток нащупать пути достижения идеала в электронной настройке фортепиано, но, если можно так выразиться, с совершенно неожиданных позиций, состоялась не так давно. В 2012-м году в бразильском научном журнале, предназначенном для учителей физики (?!), появился доклад немецкого физика Хайе Хинриксена «Настройка музыкальных инструментов на основе теории энтропии».⁴ По материалам этого доклада в Массачусетском «Technology Review» вскоре появилась анонимная статья под заголовком «Алгоритм раскрывает тайну благозвучия — и может лишить работы человека-настройщика». Публикация доклада Хинриксена и этой статьи вызвала тогда оживленную дискуссию в околонуучной прессе. Большинство положительных отзывов содержало мысль о том, что открытие Хинриксена означает закат профессии настройщика. Была и негативная критика, однако без серьезной аргументации негатива. Чуть позже доклад Хинриксена с небольшими сокращениями был напечатан в 4-м номере журнала «Европиано» за 2012-й год, — так с идеями автора смогли познакомиться не только бразильские учителя физики, но и те, кто непосредственно и профессионально связан с вопросами настройки фортепиано.

Сразу отмечу, что авторы отзывов, утверждавших, что открытие Хинриксена может лишить работы человека-настройщика, были, мягко говоря, не правы. Во-первых, задача технической реализации алгоритма в программном виде в ту пору достойным образом не была еще решена, и по алгоритму Хинриксена было тогда настроено только одно-единственное пианино. Во-вторых, и это главное, подобное утверждение в принципе абсурдно: даже вполне работоспособная программная реализация этого алгоритма (будем надеяться, что таковая со временем появится) станет лишь инструментом в руках того же человека-настройщика.

Время шло, и в 2015 году Хайе Хинриксен и его коллега Кристоф Вик анонсировали и предложили для использования всеми желающими бета-версию программы Entropy

³ Напомню еще, что не существует единственного «идеала» настройки: мера растяжки октавы может быть различной в разных инструментах, при разных акустических свойствах помещения, где установлен инструмент, и даже для разных программ концертов, исполняемых на данном инструменте.

⁴ Entropy-based tuning of musical instruments, <http://www.sbfisica.org.br/rbef/pdf/342301.pdf>

Piano Tuner (далее — ЕРТ), основанной на этом алгоритме. Правда, по степени удобства настройки с этой программой и по качеству своей работы ЕРТ пока что заметно уступает популярному настройочному софту, использующему традиционные алгоритмы.

Впрочем, авторы ЕРТ сразу объявили, что коммерческих целей они перед собой не ставили и конкурировать с другими производителями настройочного ПО не собирались, а мы вправе надеяться, что ЕРТ будет со временем совершенствоваться. Так или иначе, открытие Хинриксена — это серьезный этап в развитии теории настройки фортепиано, а программа ЕРТ — это щедрый и бескорыстный дар ее авторов всему мировому сообществу людей, заинтересованных в решении проблем настройки фортепиано, и за это им наша глубокая и искренняя благодарность.

Достаточно подробное описание алгоритма Хинриксена содержится в упомянутой статье из «Европиано» и в руководстве пользователя программы ЕРТ,⁵ здесь же я лишь коротко расскажу о его сути, ради ясности дальнейшего изложения.

Работа программы начинается с записи звука всех 88 клавиш фортепиано, анализа и фиксации их спектров. В полученной электронной копии суммарного спектра всех звуков вычисляется энтропия (мера беспорядка). Затем вступает в действие основной алгоритм программы Хинриксена — цикл операций, заключающийся в следующем:

- спектр случайно выбранного звука сдвигается на 1 цент по частоте в случайно выбранном направлении (вверх или вниз),
- заново вычисляется энтропия,
- если энтропия уменьшилась, изменение сохраняется, если увеличилась — оно отменяется.

Цикл повторяется многократно, и в результате в электронной копии суммарного спектра энтропия постепенно уменьшается, то есть возрастает мера его внутренней упорядоченности. В конечном итоге программа приводит взаимное соотношение частот всех звуков к такому состоянию, при котором дальнейшее повторение описанного цикла уже не дает уменьшения энтропии, а это значит, что найден электронный образ (модель) идеальной настройки данного фортепиано. Остается только настройочным ключом привести частоты всех звуков в соответствие с найденным электронным «идеалом».

Самое интересное заключается здесь в том, что полученная в результате работы алгоритма Хинриксена настройочная кривая обладает теми же «шероховатостями», что и при качественной настройке на слух, и что примечательно, обе кривые во многом совпадают (рис. 3).

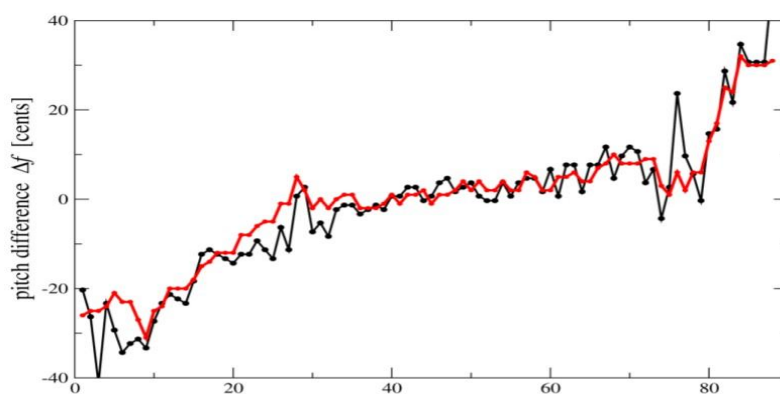


Рис. 3. Настроечные кривые: черная — настройка на слух, красная — настройка по алгоритму Хинриксена.

Отсюда можно сделать вывод о том, что к вопросу высококачественной настройки алгоритм Хинриксена подходит, в известной мере, с тех же позиций, что и настройщик,

⁵ <http://piano-tuner.org/help-and-documentation>, русский перевод см. ссылку для скачивания в форуме АФМ России (5-й пост на странице): <http://afmforum.ru/viewtopic.php?f=12&t=380>

работающий на слух. Не затрудняясь специально измерением негармоничности струн фортепиано,⁶ описанный цикл работы ЕРТ постепенно приводит высотное соотношение всех звуков фортепиано к такому состоянию, в котором достигается наилучший и равномерный компромисс в температурной нагрузке всех интервалов, возможных в пределах диапазона настраиваемого инструмента.

Если внимательно прочесть статью Хинриксена и руководство пользователя к его программе, а также поэкспериментировать с настройкой фортепиано с помощью ЕРТ, то можно прийти к следующим трем основным выводам:

1. Автор нового алгоритма свою задачу действительно решил: алгоритм работает и обеспечивает настройку любого конкретного фортепиано с качеством, приближающимся к тому, что может сделать опытный настройщик-профессионал на слух.

2. Автор впервые доказал, что упомянутые выше «шероховатости» в графиках высококачественной настройки роялей не являются результатом несовершенства слуха настройщика, а отражают реальные механо-акустические особенности каждого конкретного инструмента.

3. Однако причины и природу этих «шероховатостей» Хинриксен не раскрыл, хотя, скорее всего, он и не ставил перед собой такой задачи. Далее я рискну высказать мои соображения на этот счет.

А теперь вернемся к возможным ответам на поставленный выше вопрос: почему ломаная, негладкая настроенная кривая на слух воспринимается как равномерная температура, почему кривая, вычисленная по алгоритму Хинриксена, также не гладкая, и почему температура, выстроенная по гладкой вычисленной обычным профессиональным ПО кривой, неравномерна на слух.

Понять причины флуктуаций — отклонений реальных частот звуков хорошо настроенного на слух фортепиано от плавной усредненной кривой Рейлсбека можно, если внимательно рассмотреть спектры, анализируемые распространенными настроенными программами (в том числе, и ЕРТ) при расчете величины негармоничности звуков фортепиано. В абсолютном большинстве спектров мы обнаруживаем неплавный характер возрастания меры отклонения обертонов от величин, кратных частоте основного тона. Иначе говоря, известная формула частотного состава спектра негармоничной струны

$$f_n = nf_1\sqrt{1+Bn^2} \quad n = 1, 2, 3 \dots \quad (1)$$

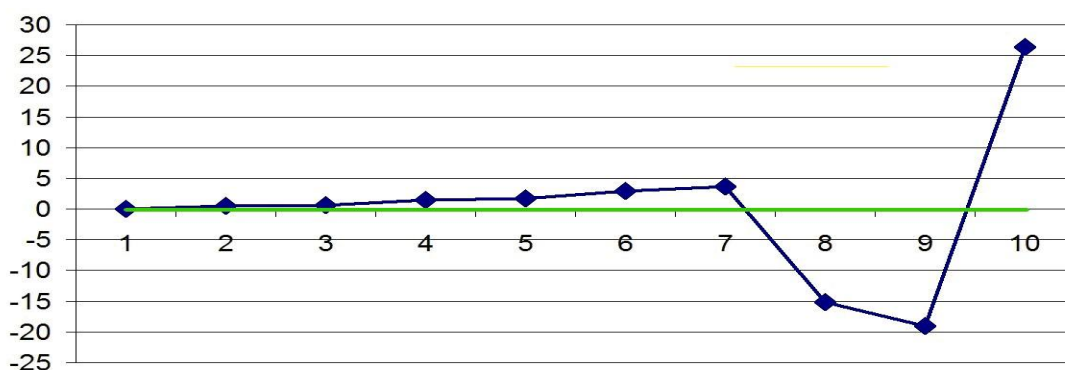
[где f_n - частота колебаний n -ного частичного тона (далее — ЧТ), n — номер ЧТ, B — коэффициент негармоничности струны] верна лишь статистически, но каждая струна каждого фортепиано имеет индивидуальный характер соотношения частот спектральных компонент, в той или иной мере не совпадающий с тем, что предписывает эта формула.

В приведенной ниже таблице даны частоты первых десяти ЧТ звуков А4 и А3 (рояль «эстония»-273 № 5432), измеренные программой ЕРТ (колонка real.). Для сравнения в той же таблице приведены частоты компонент строго гармонического спектра (harm.) и рассчитанные по указанной выше формуле частоты тонов негармоничного спектра с близкой к реальному звуку мерой негармоничности (calcul.). Также представлены величины отклонения тонов реального и рассчитанного спектров от гармоничных номиналов (displac., diff.).

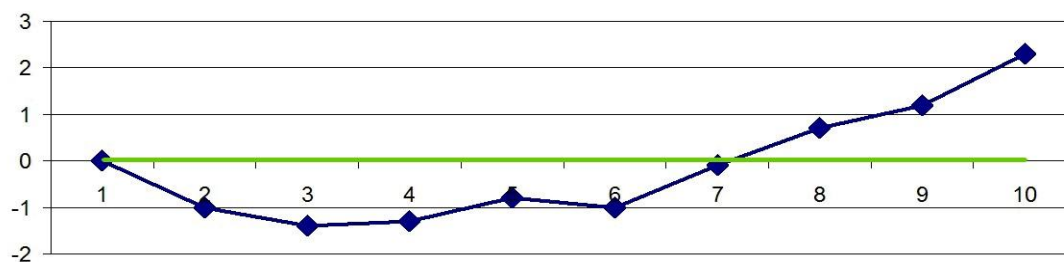
⁶ Справедливости ради нужно сказать, что программа ЕРТ все-таки измеряет негармоничность спектров звуков на первом этапе своей работы, до включения в действие алгоритма Хинриксена. Это сделано для того, чтобы заранее «пригладить» исходную картину суммарного спектра в случае сильно расстроенного инструмента, иначе алгоритм Хинриксена работает слишком долго.

Ton	№ part.	harm. Hz	calcul. Hz	displac. cent	real Hz	displac. cent	diff. Hz
A4	1	441,6	441,6	0,0	441,6	0,0	0,0
	2	883,3	884,2	2,3	884,7	2,7	0,5
	3	1325,0	1328,5	5,2	1329,1	5,5	0,6
	4	1766,6	1775,5	9,2	1777,0	10,2	1,5
	5	2208,3	2226,0	14,4	2227,7	15,2	1,7
	6	2649,9	2681,0	20,7	2683,9	22,1	2,9
	7	3091,6	3141,3	28,2	3145,0	29,7	3,7
	8	3533,2	3608,1	36,9	3592,9	29,0	-15,2
	9	3974,9	4082,2	46,7	4063,1	38,0	-19,1
	10	4416,5	4564,5	57,6	4590,8	67,0	26,3
A3	1	221,1	221,1	0,0	221,1	0,0	0,0
	2	442,3	442,3	0,8	441,3	-4,0	-1,0
	3	663,4	663,9	1,9	662,5	-2,4	-1,4
	4	884,6	885,9	3,0	884,6	0,0	-1,3
	5	1105,7	1108,4	4,9	1107,6	3,0	-0,8
	6	1326,9	1331,7	7,1	1330,7	5,0	-1,0
	7	1548,0	1555,8	9,7	1555,7	8,6	-0,1
	8	1769,2	1781,0	12,7	1781,7	12,2	0,7
	9	1990,3	2007,4	16,1	2008,6	15,9	1,2
	10	2211,4	2235,1	20,0	2237,4	20,3	2,3

Те же спектры в графическом представлении, в координатах «номер ЧТ – отклонение по частоте (в герцах) от расчетного значения по формуле (1)» (правый столбец таблицы) показаны на рис. 4. Поясню выбор меры отклонения в виде разности частот реальной и расчетной (а не их отношения, как это обычно бывает в музыкально-акустических расчетах): именно разности частот определяют частоты интервальных биений, и именно эти биения, в свою очередь, определяют качество настройки.



A4



A3

Рис. 4. Отклонение (в герцах) частот обертонов реальных звуков фортепиано от расчетных значений (зеленая линия с нулевой ординатой), вычисленных по формуле (1).

Как видим, реальные спектры следуют закону негармоничности лишь приблизительно, местами давая заметные отклонения частот ЧТ от предписанных этим законом значений. В звуке А4 обращает на себя внимание 8-й ЧТ, явно нарушающий установившуюся в более низких ЧТ закономерность роста отклонения частот от кратных основному тону значений. В звуке А3 такое нарушение возникает, уже начиная со 2-го ЧТ.

Вышеприведенная формула (а вместе с ней и вся традиционная теория настройки фортепиано) была основана на молчаливом предположении о том, что концы рабочих отрезков струн закреплены неподвижно. Но в действительности это не так. Это всего лишь близко к истине, да и то только в отношении того конца струны, который закреплен в аграфе (или клангштабике, или рамном штифте около колка) и жестко связан с массивной чугунной рамой инструмента. Что же касается другого конца струны, который опирается на штег, то мы знаем, что штег относительно подвижен и при колебаниях струны не остается в покое, он колеблется вместе со струной, точнее говоря, вовлекается ею в колебательное движение. Амплитуда колебаний штега, конечно, меньше амплитуды колебаний струны в пучностях частичных тонов, но все же соизмерима с ней.

Но если точка контакта штега со струной колеблется с частотой данного ЧТ, то эта точка не может быть узлом данной моды колебаний, а истинный узел, определяющий длину рабочего отрезка струны, а значит, и частоту данного ЧТ, находится либо немного дальше от противоположного конца струны, либо ближе к нему. И следовательно, частота данного ЧТ должна быть немного ниже или выше частоты, рассчитанной «геометрически», по длине струны от аграфа до ближайшего штифта штега. Есть все основания предположить, что отмеченные в приведенных выше таблицах и графиках отклонения частот спектральных компонент от рассчитанных по формуле (1) вызваны именно этим обстоятельством.

Интересно, что ученые уже давно обратили внимание на этот факт и достаточно подробно исследовали его в целом ряде работ, однако никто из них до сих пор не связал это с вопросами настройки фортепиано. Вот как пояснил это явление графически Gabriel Weinreich в статье «The coupled motion of piano strings», опубликованной в материалах семинара 1988 г. в Стокгольме.⁷

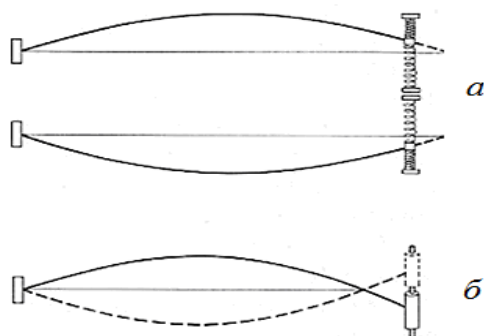


Рис. 5. Взаимодействие колеблющейся струны со штегом:
 а – при упругом характере импеданса деки;
 б – при инерционном характере импеданса деки.

Из рис. 5 видно, что если штег на данной частоте колеблется, условно говоря, «в фазе» со струной (рис. 5 а), виртуальная точка отсечки струны располагается дальше точки контакта струны со штифтом, и частота данного обертона становится ниже расчетной. При «противофазном» соотношении колебаний струны и штега (рис. 5 б) виртуальная точка отсечки смещается в рабочий отрезок струны, укорачивая его, а значит, повышая частоту данного обертона. Очевидно, что при теоретически возможном совпадении виртуальной точки отсечки струны со штифтом штега последний на частоте данного обертона колебаться не будет, и этот ЧТ в спектре звука струны будет отсутствовать. Но

⁷ https://www.speech.kth.se/music/5_lectures/weinreic/weinreic.html, русский перевод см. в Библиотеке ф-рума АФМ России <http://afmforum.ru/static.php?p=klopov17>

отсюда следует, что если обертон в звуке данной струны присутствует, если он слышен, то он принципиально не может не быть смещенным по частоте относительно ее значения, предписанного формулой (1).

На рис. 5 схематически было показано взаимодействие колеблющейся струны со штегом только для первой моды колебаний (основного тона), но характер этого взаимодействия остается таким же и для всех более высоких ЧТ.

К сказанному можно добавить, что смещение частоты обертонов относительно значения, определяемого вышеприведенной формулой, должно возрастать с ростом номера частичного тона: чем короче расстояние между соседними узлами данной моды колебаний струны, тем больше влияет на частоту колебаний величина такого смещения.

На рис. 6 приведен график величины фазового сдвига между силой, вызывающей колебания штега, и его колебательной скоростью в полном диапазоне частот, излучаемых декой фортепиано (Klaus Wogram. The strings and the soundboard, опубликовано там же).⁸ На графике видно, что угол сдвига фазы, определяющий характер импеданса деки, изменяется в очень широких пределах, хотя и пребывает на большей части частотного диапазона в области отрицательных значений.

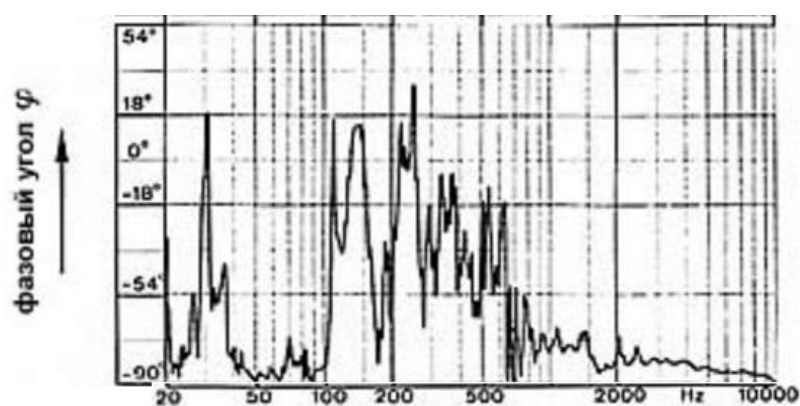


Рис. 6. График угла сдвига фазы по диапазону ф-но.

В зависимости от характера импеданса деки на частоте каждого ЧТ штег может колебаться, как уже сказано, «в фазе» с колебаниями струны, если импеданс на этой частоте имеет упругий характер, или «в противофазе», если импеданс инерционный. Из рис. 6 видно, что фазовые и пространственные соотношения колебаний струны и вызванных ими колебаний штега на разных частотах существенно различны, а это приводит к тому, что конечные узлы разных мод колебаний струны не только не совпадают с точкой контакта струны и штегового штифта, но и очень по-разному не совпадают, смещаясь либо внутрь геометрического рабочего отрезка струны, либо выходя за его пределы. В результате в каждой струне образуется своя особая серия таких виртуальных точек отсечки струны, индивидуальных для каждого отдельного ЧТ. Повторю: если такая точка располагается дальше штегового штифта, то струна для данного обертона как бы удлиняется, и его частота оказывается ниже рассчитанной по формуле (1). Если же виртуальная точка отсечки смещена в рабочую часть струны, струна в этом случае как бы укорачивается, и частота данного обертона оказывается выше расчетной.

Итак, частичные тоны спектров звуков фортепиано (включая и основной тон) оказываются по-разному смещенными по частоте относительно значений, соответствующих формуле (1). Но настройщика, работающего на слух, частоты основных тонов настраиваемых звуков нимало не заботят, кроме только одного: начального ля¹ (А4). Высоты же всех остальных звуков при настройке на слух устанавливаются вовсе не по частоте основного тона, а только исключительно по биениям в разных интервалах между теми са-

⁸ https://www.speech.kth.se/music/5_lectures/wogram/index.html, русский перевод см. в Библиотеке форума АФМ России <http://afmforum.ru/static.php?p=klopov20>

мыми верхними компонентами их спектров, которые подвержены вышеописанным смещениям. Настраивая каждый звук, мы устанавливаем и контролируем его высоту только по биениям, притом сразу в нескольких интервалах — октавах, квинтах, квартках, терциях, секстах, децимах, иногда дуодецимах, септдецимах и т. п. В каждом из этих интервалов биения образуются на разных ЧТ данного звука. Каждый ЧТ смещен по частоте вследствие вышеописанного эффекта по-разному, одни вверх, другие вниз. Поэтому настройщик всегда интуитивно или сознательно ищет для каждого звука некий компромиссный оптимум, стараясь, с одной стороны, «не обидеть» ни один из перечисленных консонансов, а с другой — отдавая предпочтение приемлемому звучанию тех консонансов, которые для данного звука оказываются наиболее критичными в отношении равномерности температуры. В известной мере, поиск этого оптимума — это и есть поиск наилучшего порядка в многомерном пространстве всего строя фортепиано, то есть поиск минимума энтропии. Однако все это означает, что основной тон каждой ноты хорошо настроенного на слух фортепиано окажется в той или иной мере смещенным по частоте вверх или вниз относительно значения, рассчитанного обычной настройочной программой по критерию гладкости индивидуальной кривой Рейлсбека.

Таким образом, настройка, хорошо выполненная по признаку наилучшей равномерности в области взаимодействующих близких по частоте частичных тонов всех звуков фортепиано, в результате описанных смещений их частот под действием эффекта виртуальных точек отсечки струн, неизбежно приводит к «шероховатостям» кривой основных тонов.

В немецком языке для обозначения РТ есть два термина: *gleichschwebende Temperatur* и *gleichstufige Temperatur*. В свете всего вышесказанного, следует отдать предпочтение первому термину: настраивая рояль, мы добиваемся именно плавности изменения биений (*Schwebung*) в одноименных консонансах. Неизбежно возникающая при этом неравномерность величины собственно полутонов, то есть ступеней (*Stufen*) хроматической гаммы с качеством настройки никак не связана, если это качество оценивается слухом человека по указанному выше критерию, а не прецизионным частотомером по отношению частот основных тонов соседних звуков. Очевидно, что популярный настройочный софт «заточен» на *gleichstufige Temperatur*, но наш идеал — *Gleichschwebende*.

Мы убедились, что равномерность температуры в фортепиано определяется не равномерностью отношений частот основных тонов в соседних ступенях хроматической гаммы, а только единством отношений совпадающих верхних ЧТ. Даже для октавы в большинстве случаев оптимальным для хорошего строя является совпадение ЧТ на уровне 4:2, а не 2:1, то есть даже для октавы частота основного тона ее верхнего звука не так уж существенна. Для остальных же консонансов определяющими равномерность температуры оказываются только обертоны. В центральном участке диапазона фортепиано, примерно от С3 до А4 для квинт, кварт, терций и секст имеют в этом плане значение главным образом ЧТ с 3-го по 5-й, а более высокие совпадающие тоны здесь, как правило, слабы и маскируются для слуха более громкими низкими частичными тонами.

Для более высоких звуков (приблизительно А4 и выше) роль основного тона возрастает, а обертоны постепенно, по мере движения вверх, слабеют и теряют свою значимость как фактор, определяющий качество настройки. Для звуков самой верхней октавы практически любого фортепиано роль их собственных обертонов сводится к нулю, а настройка этих звуков определяется только обертонами нижележащих звуков, образующих с ними те или иные консонансы. Отсюда — большой разброс отклонений настройочной кривой в дискантах по сравнению с серединой диапазона фортепиано.

В нисходящем направлении от С3 протяженность спектра звуков постепенно растет, а максимум интенсивности обертонов смещается вверх относительно основного тона. Поэтому здесь ответственность за благозвучие и равномерность температуры по мере движения вниз берут на себя все более высокие ЧТ, сильно подверженные описанным смещениям по частоте, а основной тон и ближайшие к нему ЧТ постепенно ослабевают и

становятся вовсе не слышимыми. Это объясняет наблюдаемое и здесь возрастание отклонения настроечной линии от гладкой кривой.

С учетом вышеназванных обстоятельств, я года полтора назад взял на себя смелость высказать письменно некоторые пожелания и предложения авторам ЕРТ.

– Во-первых, я посчитал разумным ограничить частотный диапазон анализа спектров до 4000 Гц, поскольку все, что лежит выше, интонационно (в музыкальном смысле этого слова) и энергетически не значимо, а значит, к качеству настройки не относится.

– Во-вторых, имело бы смысл также ограничить динамический диапазон частичных тонов, учитываемых при подсчете величины энтропии, по уровню минус 40 дБ от уровня наиболее громкого ЧТ, поскольку при таком соотношении уровней громкости (1:100) более слабый звук всегда для слуха маскируется более сильным, то есть все компоненты спектра, лежащие ниже этого уровня, просто не слышны, а значит, на качество настройки не влияют.

– Наконец, в-третьих, мне представляется, что изменение высоты звуков в цикле алгоритма на 1 цент – это слишком много. Например, если звук А3 = 220 Гц повысить на 1 цент, мы получим частоту основного тона 220,127116, но при этом 3-й ЧТ повысится почти на 0,4 Гц, что довольно сильно изменит звучание квинты А3 – Е4: частота ее стандартных температурных биений 0,7 Гц увеличится до 1,1 Гц, то есть почти в полтора раза. При окончательной («чистой») настройке на слух мы, по крайней мере, в центральном регистре фортепиано, часто оперируем и более осторожными шагами.

Перечисленные меры могли бы оптимизировать работу программы, избавив ее от лишних и ненужных операций с несущественными для качества настройки компонентами суммарного спектра звуков настраиваемого фортепиано, и еще больше приблизить главный алгоритм ЕРТ к тому «алгоритму», которым пользуется опытный настройщик при настройке на слух.

К сожалению, авторы ЕРТ никак не откликнулись на мое письмо, а судя по тому, что нынешняя версия программы уже года два как практически не обновлялась, можно предположить, что они уже потеряли интерес к совершенствованию своего детища. Однако эстафету с полгода назад подхватил московский математик и программист Сергей Лукашевич, заинтересовавшийся этой программой и уже проделавший серьезную работу по созданию на базе ЕРТ нового варианта настроечного ПО. Программный модуль Лукашевича модифицирует записанный суммарный спектр всех звуков фортепиано так, чтобы получить в итоге плавно возрастающие частоты биений в восходящих хроматических последовательностях наиболее важных для равномерности температуры консонансов. Иначе говоря, этот модуль ведет электронный образ строя фортепиано к идеалу прямым путем, добываясь именно той самой цели, которую ставит перед собой настройщик, работающий на слух. Пока что, правда, результаты, полученные с помощью этого проекта, далеки от идеала, но мы сейчас находимся только в самом начале пути, и надежда на успешное решение проблемы есть.

Несколько слов в завершение моего сообщения. Осознание вышеописанных свойств звукообразования в механо-акустическом аппарате фортепиано и реальных возможностей распространенного ныне настроечного ПО могло бы в некоторой степени остудить накал известных споров между приверженцами и противниками электронной настройки фортепиано. Пожелаем же г-ну Хинриксену и его сотрудникам, а также всем тем, кто работает над совершенствованием их настроечной программы, успехов. Она действительно может стать хорошим помощником человеку-настройщику. А пока представляется разумным использовать существующие программы там, где они способны помочь нам сэкономить силы и время, но конечный контроль качества настройки доверить все-таки профессиональному слуху мастера. Ибо наш слух способен найти нужный нам минимум энтропии строя быстрым и прямым путем, не прибегая к громоздким математическим расчетам, и таким образом учесть все имеющиеся в данном фортепиано частотные смещения обертонов, значимых для искомой Равномерной Темперации.