

# Энтропийный фортепианный тюнер



## Руководство пользователя

Версия 1.1.2

May 4, 2016

Haye Hinrichsen и Christoph Wick  
Факультет физики и астрономии  
Университет Вюрцбурга, Германия  
[piano-tuner.org](http://piano-tuner.org)

## Содержание

Предисловие .....	2
Коротко о настройке на основе энтропии .....	4
Аппаратные требования и инсталляция .....	5
Интерфейс пользователя .....	7
Процедура настройки .....	8
Подготовка .....	8
Запись .....	10
Вычисления .....	16
Настройка .....	20
Обратная связь .....	24
Устранение неисправностей .....	24
Приложения .....	26
A: Функционирование MIDI .....	26
B: Инструменты для анализа данных .....	27
C: Часто задаваемые вопросы .....	28

# Предисловие

## ✓ Что такое Энтропийный фортепианный тюнер (ЭФТ):

- Это экспериментальное открытое ПО для настройки фортепиано.
- Оно бесплатно для всех (лицензия GPL3).
- Оно предоставляет модульную платформу для создания и тестирования новых алгоритмов настройки.
- Оно разработано для опытных настройщиков фортепиано, экспертов ПО и ученых.

## ✗ И чем ЭФТ не является:

- ЭФТ не собирается конкурировать с коммерческими тюнерами высокого класса.
- ЭФТ не предназначен для непрофессионалов, желающих самостоятельно настроить свое фортепиано.
- ЭФТ не экономит время.

## Об истории

История энтропийной настройки фортепиано восходит к 2012 году и начинается она с публичной лекции для учителей физики о понятии энтропии. Для того, чтобы показать, что энтропия больше, чем просто теоретическое понятие статистической физики и что энтропия имеет практическое значение, мы показали, что энтропия суммарного спектра мощности в настроенном фортепиано ниже, чем в расстроенном. Кроме того, было показано, что простой алгоритм случайного поиска производит достаточно перспективную кривую настройки. С самого начала это открытие привлекло много внимания.

После очередного доклада в Порту-Алегри мы опубликовали эту идею в бразильском физическом журнале. Эта публикация, написанная для учителей физики, получила неожиданный отклик. Пресс-релиз «Technology Review» Массачусетского Технологического института выступил с сообщением под заголовком «Алгоритм станет концом профессиональных настройщиков фортепиано». Это вызвало преувеличенную волну внимания со стороны средств массовой информации США. Не связавшись с авторами, ведущие журналы, такие как Wall Street Journal и Daily Mail скопировали эти вводящие в заблуждение заявления. В течение двух недель эта волна распространилась через Великобританию в Европу и была остановлена только пресс-релизом нашего университета. Дело в том, что на тот момент ни один рояль еще не был настроен с помощью нового алгоритма.

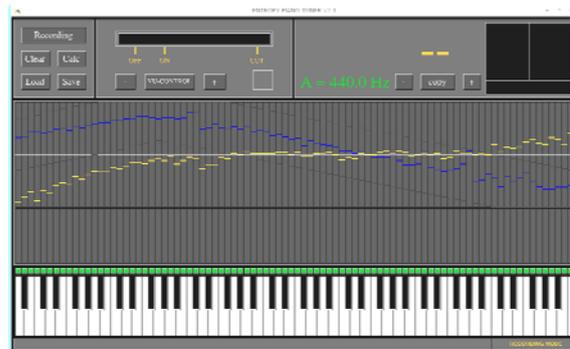


Почему СМИ так взволновало сообщение на столь экзотическую тему, как настройка фортепиано? Причиной этого может быть продолжающиеся споры о роли электронных тюнеров среди музыкантов, а также настройщиков и производителей фортепиано. В то время как в США профессиональное использование электронных устройств настройки становится все более распространенным, подавляющее большинство пианистов и фортепианных техников явно предпочитает настройку на слух. Эта спорная атмосфера может объяснить, почему наша информация о том, что простая формула может настроить фортепиано, получила такое непропорционально активное обсуждение.

Настройка на основе энтропии в самом деле привлекательна, поскольку этот алгоритм во многом работает так же, как человек, настраивающий инструмент на слух. В связи с использованием метода случайных чисел,

результаты работы алгоритма воспроизводимы, то есть, получаемые настроечные кривые выглядят почти одинаково, однако они никогда не бывают идентичными. Кроме того, кривые настройки имеют негладкий характер, что сильно отличает их от гладких настроечных кривых, получаемых в профессиональных коммерческих устройствах и ПО для настройки. Поскольку кривые, полученные при настройке на слух, демонстрируют аналогичные неравномерности, мы высказали предположение, что эти флуктуации, вероятнее всего, не вызваны несовершенством слуха настройщиков, а отражают специфику самого настраиваемого инструмента и являются типичными характеристиками высококачественной настройки на слух.

Тем не менее, до недавнего времени не было полной уверенности в том, что сведение энтропии к минимуму приведет к приемлемой настройке. Теперь мы публикуем нашу разработку ЭФТ бесплатно с открытым исходным кодом. Это программное обеспечение предоставляет каждому желающему возможность испытать и оценить данный метод. В дополнение к этому, в ЭФТ встроен программный синтезатор, и вы можете подключить МИДИ-клавиатуру и заранее услышать результат вычислений, до того, как инструмент будет реально настроен.



Как видно из приведенной иллюстрации, результаты, полученные с помощью ЭФТ, приемлемы, хотя, возможно не полностью отвечают профессиональным требованиям. Во всяком случае, таким было заключение независимой экспертной оценки, осуществленной в Университете музыки в Вюрцбурге. И все же, мы уверены, что предлагаемый метод имеет хорошие перспективы. Поэтому мы решили опубликовать ЭФТ в виде открытого проекта и предлагаем всем заинтересованным лицам внести свой вклад в его развитие. Кроме того, модульная структура программного кода предоставляет всем желающим возможность без особых усилий встроить альтернативные алгоритмы настройки (см. <http://develop.piano-tuner.org/>).

Мы будем благодарны за предложения и критику, присланные на электронный адрес [info@piano-tuner.org](mailto:info@piano-tuner.org).

## Благодарности

Разработка Энтропийного фортепианного тюнера не могла бы состояться без поддержки ряда лиц и организаций. Мы выражаем особую благодарность *Prof. Dr. W. Kinzel* и факультету физики и астрономии за финансовую поддержку. Мы также весьма благодарны *Prof. Dr. A. C. Lehmann*, *B. Olbrich* и *M. Kohl* из Университета музыки в Вюрцбурге за проведение практических тестов. Мы также выражаем благодарность *A. Heilrath*, за разработку предыдущей версии алгоритма распознавания высоты звука. Интерфейс ЭФТ был переведен на ряд языков, это сделали *Prof. Dr. S. R. Dahmen*, *A. Frick*, *M. Jiminez*, *L. Kusmierz*, *Dr. Jaegon Um* и *Zhou Ying*. Искренняя благодарность им всем!

Мы хотели бы также поблагодарить *P. Vax*, *A. Capurso*, *I. Oleg*, *V. Päivinen*, и *R. Schmidlin* за обеспечение обратной связи и помощь в отладке программы.

*Christoph Wick u Haye Hinrichsen*

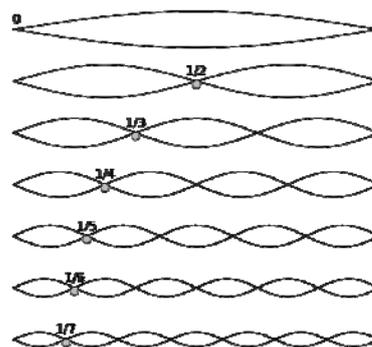
*Вюрцбург, May 2016*

# Коротко о настройке на основе энтропии

Почему не удается настроить фортепиано, используя простые тюнеры ценой меньше 100 \$ ? Почему настройка фортепиано требует специальных навыков, многолетней тренировки и серьезного опыта?

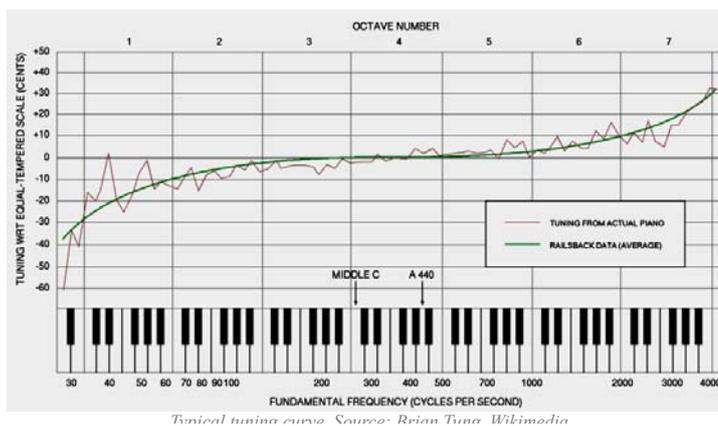
Вам наверняка известны сведения, касающиеся музыкальной *темперации*, включая сюда чистые интервалы, равномерную темперацию и многочисленные виды исторических неравномерных темпераций. В наши дни музыка европейской традиции основана преимущественно на равномерной темперации. Однако настройка фортепиано определяется не только темперацией, едва ли не еще большее значение имеет здесь другой фактор – физические особенности колебаний стальных сильно натянутых струн, так называемая *негармоничность*.

Явление негармоничности может быть объяснено следующим образом. Идеальная струна колеблется благодаря силе ее натяжения. Помимо основного тона, в струне возникает серия более высоких тонов, называемых частичными тонами, частоты которых кратны основной частоте. С другой стороны, ударенный упругий стержень вибрирует сам по себе вследствие внутренней жесткости материала. Частоты его обертонов по отношению к частоте основного тона кратны скорее квадратам их номеров. Это определяет заметно отличающийся тембр звука, например, типичный тембр ксилофона.



Фортепианная струна при колебаниях ведет себя, в основном, как идеальная струна, но ввиду жесткости стали, до некоторой степени, и как упругий стержень. Это особенно заметно на краях диапазона фортепиано. В силу влияния жесткости стали, обертоны фортепианной струны немного смещаются вверх относительно значений, кратных основному тону, и это смещение тем сильнее, чем выше номер данного частичного тона. Следовательно, если мы попытаемся настроить фортепиано простым тюнером, эти высокие частичные тоны не будут должным образом совпадать между собой в разных интервалах, и инструмент будет производить впечатление расстроенного.

Одни из многочисленных профессиональных навыков опытного настройщика заключается в умении корректировать эти несовпадения путем осторожного завышения тонов по мере продвижения к дискантам и их занижения по мере продвижения к басам. Эта так называемая *растяжка* крайне важна для хорошей настройки, и ее величина варьирует от инструмента к инструменту, так же, как и от настройщика к настройщику. В результате получается определенная настроечная кривая, например, розовая кривая на соседней иллюстрации.



Typical tuning curve. Source: Brian Tuna, Wikimedia

Теоретический расчет настроечной кривой в высшей степени сложен. Прежде всего, эта кривая индивидуальна для каждого фортепиано. Мало того, она может зависеть от акустического окружения инструмента, от климатических условий и даже от возраста настройщика и владельца фортепиано. Иными словами, здесь нет одного решения, скорее, есть множество равно возможных настроечных кривых. Какую из них предпочесть — дело вкуса.

В продаже имеется несколько «продвинутых» настроечных устройств и программ, способных генерировать кривые с растяжкой. Большинство таких тюнеров оценивают негармоничность струн фортепиано и рассчитывают некую компромиссную настроечную кривую. Как правило, такие кривые имеют гладкий характер

(как зеленая кривая на приведенной выше иллюстрации). Напротив, настроечные кривые, реализованные при настройке на слух, в большинстве случаев заметно более нерегулярны, как вы можете видеть на розовой линии там же.

Способ минимизации энтропии, реализованный в настоящем ПО, основан на той идее, что настроить — означает установить максимальную степень порядка в суммарном спектре обертонов всех звуков инструмента. В физике и теории информации мера соотношения порядка и беспорядка известна как энтропия. Как вы, наверное, знаете, физические системы, как правило, стремятся к состоянию максимального беспорядка, в соответствии со знаменитым вторым законом термодинамики. В случае фортепиано настройка представляет собой действие противоположное: настроено — значит, упорядочено. Это приводит к предположению, что настроенный рояль должен иметь минимальную энтропию. Мало того, оказывается возможным настраивать рояль, добиваясь минимальной энтропии. Если это верно, это будет означать, что энтропия, формулу которой можно записать, как  $H = - \sum_i p_i \log p_i$ , будет способна решать сложную задачу настройки фортепиано. Очевидно, это само по себе было бы замечательное открытие. На примере нашего ЭФТ мы хотели бы показать, что эта идея действительно работает.

Кстати, настройка по энтропийному алгоритму имеет много общего с настройкой, выполняемой человеком на слух. Например, полученные с помощью ЭФТ настроечные кривые похожи на те, что получаются при слуховой настройке, но поскольку они генерируются случайным процессом, они никогда не бывают полностью идентичными. Кроме того, настроечные кривые, полученные с помощью ЭФТ, не гладкие, скорее, они характеризуются выраженными неровностями. Мы считаем, что эти неровности имеют важное значение и отражают конкретные нерегулярности настраиваемого инструмента. Один из недостатков энтропийной настройки заключается в том, что звуки всех клавиш инструмента должны быть записаны отдельно, до начала собственно настройки. Однако процесс такой записи нужен только один раз для каждого инструмента.

## Аппаратные требования и установка

### Устройство

ЭФТ работает на большинстве компьютеров — настольных и планшетных и даже на смартфонах. Мы рекомендуем ноутбук с многоядерным процессором. Поддерживаемые платформы — Apple, OSX®, Apple iOS®, Microsoft Windows® Vista, 7, 8, Android® и различные дистрибутивы Linux. Windows® и BlackBerry® мобильных устройств в настоящее время не поддерживаются.

### Микрофон

Для управления тюнером нужен внешний микрофон хорошего качества. Мы рекомендуем сверхмалозумный конденсаторный микрофон с линейной частотной характеристикой. Встроенные микрофоны планшетов и смартфонов могут быть использованы для тестирования, но они могут давать искажения на очень низких и высоких частотах.<sup>1</sup>

---

<sup>1</sup> Это очень сильно зависит от устройства. Например, iPad Air работает на удивление хорошо с встроенным микрофоном, хотя отсекает все частоты ниже 100 Гц.

## Наушники

Обычные наушники будут полезны для слушания эхо-сигнала (см. ниже) и проверки записанных звуков. Если вы не используете наушники, вы должны отключить громкоговоритель устройства, чтобы избежать акустической завязки через микрофон.

## MIDI-клавиатура

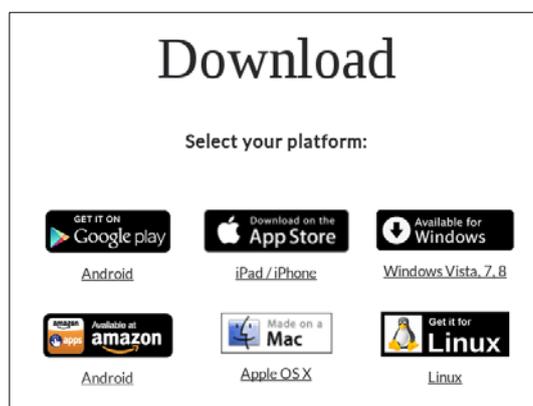
При желании вы можете подключить внешнюю MIDI-клавиатуру, которая позволяет вам играть и выбирать отдельные клавиши. С клавиатуры MIDI можно услышать результат вычисленного минимума энтропии заранее, прежде чем вы фактически начнете настраивать инструмент. Тем не менее, MIDI-клавиатура не является обязательной для настройки. Более подробную информацию о функционировании MIDI и поддерживаемых устройствах можно найти в Приложении А на странице 27.

## Инсталляция

Чтобы скачать ЭФТ, посетите наш веб-сайт [piano-tuner.org](http://piano-tuner.org) и следуйте инструкциям. Если вы используете мобильное устройство, вы можете скачать приложение непосредственно из соответствующих магазинов приложений.

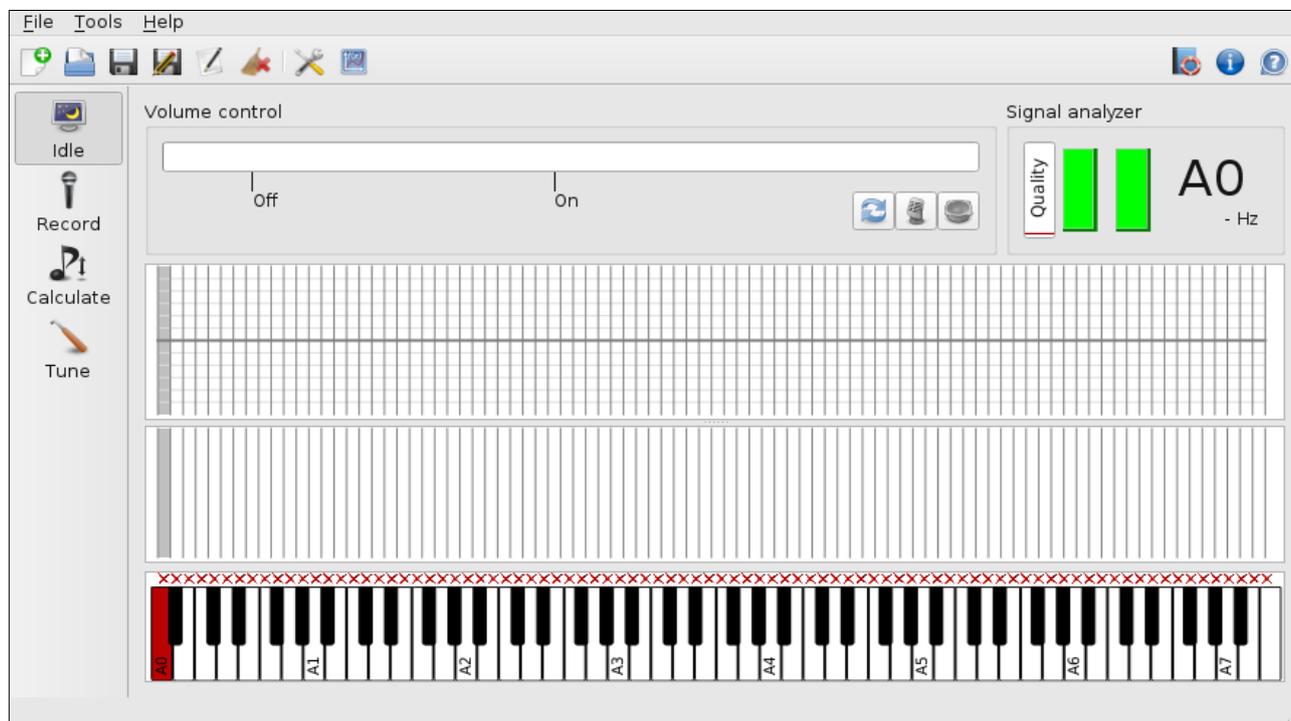
Если Вы загружаете программное обеспечение непосредственно с нашего сайта, ваша операционная система может спросить вас, о доверии внешнему источнику, позволяете ли вы установить программное обеспечение, которое не исходит от сертифицированного интернет-магазина. В этом случае подтвердите, что вы позволяете установку ПО.

Установка осуществляется как обычно, следуя инструкциям мастера установки. Кроме того, ссылки под символами ведут на страницы с более подробными инструкциями по установке. Установка на мобильных устройствах проходит полностью автоматически.



# Интерфейс пользователя

После запуска ЭФТ вы увидите следующий графический интерфейс пользователя. Нажмите клавишу F для полноэкранного режима.



На мобильных устройствах вид может быть упрощен в зависимости от размера дисплея. Из-за отображаемой фортепианной клавиатуры ЭФТ можно использовать только в режиме «ландшафт».

Как вы можете видеть, здесь есть панель инструментов в левой части окна, которая позволяет выбрать режим работы (ожидание, запись, вычисления и настройка). Над клавиатурой есть две панели для спектра и настроечной кривой с сеткой, соответствующей клавишам внизу. В верхней трети окна вы можете увидеть полосу контроля уровня входного сигнала и панель для анализа сигналов.

## Обновления / проверка версии

При запуске настольных версий ЭФТ открывает доступ на наш сайт, чтобы проверить версию текущего выпуска. Если доступна новая версия, открывается окно с предложением обновить



приложение. Пожалуйста, следуйте инструкциям.

Если вы хотите проверить установленную версию вручную, пожалуйста, нажмите кнопку  в верхнем правом углу и сравните номер версии с текущей версией на сайте [piano-tuner.org](http://piano-tuner.org).

## Справочная система



Символ помощи «спасательный круг» и функциональная клавиша F1 открывают краткую инструкцию, как работать с ЭФТ. Это очень краткая версия данного руководства, которая уже доступна на разных языках.



Если вы хотите узнать больше о конкретной функции элементов, показанных в главном окне, вы должны использовать контекстную справку ЭФТ. Нажмите на знак вопроса в панели справки и нажмите элемент, подлежащий исследованию. ЭФТ будет отображать краткое объяснение, описывающее функции выбранного элемента.

## Процедура настройки

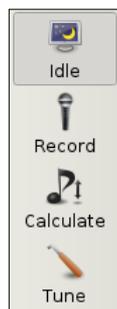
### Предупреждение



**Данное ПО не предназначено для непрофессионалов, желающих самостоятельно настроить свое фортепиано. Настройка фортепиано требует владения сложными навыками, вырабатываемыми многолетней тренировкой, и серьезного профессионального опыта. Непрофессиональное вмешательство может нанести существенный вред вашему инструменту, от оборванных струн до необратимых деформаций. Мы предполагаем, что вы используете данное ПО на свой страх и риск.**

## Подготовка

### Запуск программы



Сначала подключите микрофон и запустите ЭФТ.

Сразу после запуска ЭФТ находится в режиме ожидания. Это означает, что приложение слушает микрофон, не предпринимая никаких действий. Полоса на верхней части окна показывает уровень входного сигнала, который регулируется автоматически. Сыграйте пару звуков на фортепиано и

убедитесь, что микрофон нормально работает. Если это не так, перейдите в меню настроек, выберите страницу **аудио** и выберите нужное устройство ввода.

## Микрофон

Установите микрофон на штативе прямо под открытой крышкой рояля. Если вы настраиваете пианино, лучших результатов можно добиться, если вы удалите панель ниже клавиатуры и поместите микрофон там. Не ставьте микрофон непосредственно на инструмент. Если микрофон находится в прямом физическом контакте с фортепиано, он будет подвергнут воздействию нежелательных шумов низкой частоты, вызванных движением клавиш и молотков. Точно так же, если вы используете мобильное устройство с встроенным микрофоном (айфон или планшетный компьютер), вы не должны размещать его непосредственно на пианино, следует положить его на мягкую подкладку.



В любое время можно временно отключить микрофон, нажав соответствующую кнопку. Кроме того, если возникает впечатление, что автоматический контроль уровня не работает, как задумано, вы можете переустановить его, нажав кнопку обновления.



## Создать / открыть файл ЭФТ

Перед началом записи нужно подготовить файл данных \*.ert для данного фортепиано:

- Если вы настраиваете это фортепиано впервые, нажмите **Ctrl-N** или выберите *Файл-Новый* из меню.  Появится диалоговое окно, давая вам возможность зафиксировать некоторые данные о фортепиано, например, его местонахождение, дату и время, а также сведения о производителе и объеме клавиатуры
- Одним из наиболее важных параметров является высота строя, т. е. частота звука А4. Эта запись не оказывает никакого влияния на сам процесс записи, но она будет служить в качестве справки в последующем процессе настройки (см. ниже). Если вы уже знаете нужную высоту, вы можете представить ее здесь. Если нет, оставьте значение по умолчанию 440 Гц. Все настройки могут быть изменены позже нажатием **F9** или выбором *Инструменты-Изменить паспорт фортепиано* в меню. 
- Если вы уже настраивали этот инструмент ранее, нужно просто загрузить соответствующий файл. Для этого нажмите **Ctrl-O** (лат.) или выберите *Файл-Открыть* из меню. На настольных ПК и ноутбуках выберите путь и имя файла, как обычно (на мобильных устройствах есть только один стандартный путь). Стандартное расширение для файлов данных настройки фортепиано — ".ert", которое установлено для ЭФТ. 
- В любое время можно сохранить данные, нажав **Ctrl-S** или выбрав *Файл-Сохранить* или *Файл-Сохранить как...* из меню. ЭФТ также сохраняет вашу работу в регулярные промежутки времени, чтобы избежать потери данных в случае аварии приложения. 

# Запись

## Режим записи



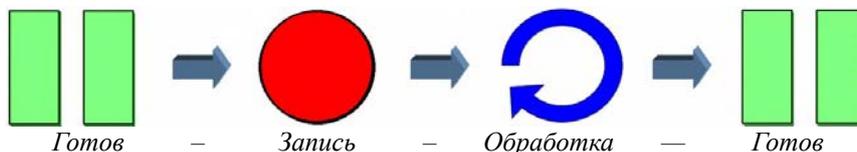
После проверки микрофона переключитесь в режим записи. Это может быть сделано путем нажатия символа микрофона на левой панели инструментов (см. рис.) В качестве альтернативы вы можете переключать режимы циклически нажатием клавиши **TAB**.

Процедура записи должна быть выполнена только один раз для каждого инструмента и занимает около 20-25 минут. Пианино может быть и в ненастроенном состоянии во время записи..

Выбрав режим записи, попробуйте

сыграть несколько звуков на фортепиано. Как вы можете видеть, есть два маркера ниже полосы контроля входного уровня, они отмечены знаками "On" и "Off". Маркер "On" закрепляется в середине, а маркер " Off " изменяет свое положение в соответствии с входным сигналом.

Как только уровень входного сигнала превышает отметку "ON", ЭФТ начинает записывать сигнал. Процесс записи обозначается большим красным кругом на панели анализатора сигналов в правом верхнем углу. Удерживайте клавишу нажатой до тех пор, пока уровень входного сигнала не упадет ниже "выключено" — это знак, что процесс записи остановлен. После короткого периода обработки сигналов, обозначенного синим вращающимся символом, ЭФТ возвращается в исходное состояние:



Если у вас возникнет впечатление, что запись занимает слишком много времени, особенно в басу, вы можете мягко отпустить клавишу, чтобы остановить запись намеренно.

## Выбор клавиши и распознавание звука

Изначально все клавиши отображаемой клавиатуры должны быть отмечены небольшим красным крестиком. Если это не так, вы можете очистить записанные данные, выбрав *Инструменты-Сброс маркеров* в меню. Цель процесса записи в том, чтобы преобразовать все красные крестики в зеленые отметки:



На приведенном выше рисунке левая клавиша A0 окрашена в красный цвет. Эта окраска указывает, что эта клавиша выбрана и готова к записи. Для того, чтобы сделать процесс записи как можно более простым и для снижения физического взаимодействия с устройством, ЭФТ автоматически распознает нажатую клавишу. Используется следующая цветовая схема для клавиш:

- Если распознанный звук фортепиано совпадает с выбранной красной клавишей, ее цвет меняется на оранжевый, а затем — после успешной записи — на зеленый. В тот же момент зеленая галочка появится над клавишей, указывая успешную запись.
- Если вы нажмете на фортепиано клавишу, не совпадающую с выбранной, ЭФТ сообщит вам, что вы играли неверный тон, на короткое время выделив соответствующую клавишу серым цветом. Никаких действий не будет предпринято.
- Единственное исключение: если распознанный звук находится рядом с выбранной клавишей, выбор будет перемещаться к этому звуку до начала процесса записи. Это позволяет вам записывать все звуки слева направо, просто играя один тон за другим. Для фортепиано, которые в значительной степени фальшивы, этот автоматический переход может быть отключен в настройках.
- Если выбранная клавиша уже **зеленая**, вы можете извлечь этот звук снова, чтобы повторить его запись еще раз.

Вы можете выбрать любую клавишу с помощью мыши, нажав на нее. В качестве альтернативы вы можете перемещать выделение с помощью клавиш со стрелками на клавиатуре компьютера.



С помощью кнопки, показанной слева, или выбрав соответствующий пункт меню, можно удалить все синие маркеры записи (см. далее).

## Принудительное распознавание звука

Иногда может случиться, что конкретный звук не распознается правильно. В этом случае вы увидите серую окраску, появляющуюся где-то еще, как правило, со смещением на квинту или октаву.

*Справочная информация:* ЭФТ распознает звуки на основе определения частоты обертонов. Для этого мы предполагаем эмпирическое распределение интенсивности частичных тонов спектра. Однако на практике может случиться так, что специфические свойства инструмента (например, резонансы деки) могут привести к неожиданному усилению или подавлению определенных частичных тонов. В этом случае алгоритм распознавания может не сработать. Мы надеемся на улучшение качества распознавания звуков в будущих версиях ЭФТ.

Если ЭФТ не распознает определенную клавишу фортепиано, можно заставить его сработать, нажав соответствующую клавишу дважды. В качестве альтернативы вы можете нажать клавишу ввода (Enter) для переключения между нормальным и принудительным распознаванием. Принудительное распознавание обозначается темно-красным и темно-зеленым окрашиванием.

Здесь мы снова даем краткий обзор цветовой схемы:

	Выбранная клавиша готова к записи
	Выбранная клавиша в процессе записи
	Выбранная клавиша записана успешно
	Распознан тон на невыбранной клавише
	Принудительно выбранная клавиша готова к записи
	Принудительно выбранная клавиша записана успешно

## Процедура записи и контроль качества

Запишите все звуки последовательно слева направо. Если фортепиано не слишком расстроено, вы можете записать звуки, как они есть. Тем не менее, для клавишей с двумя или тремя струнами (двух- и трехструнные унисоны) можно значительно улучшить качество записи, если заглушить одну или две струны клинком, чтобы звучала только одна струна.

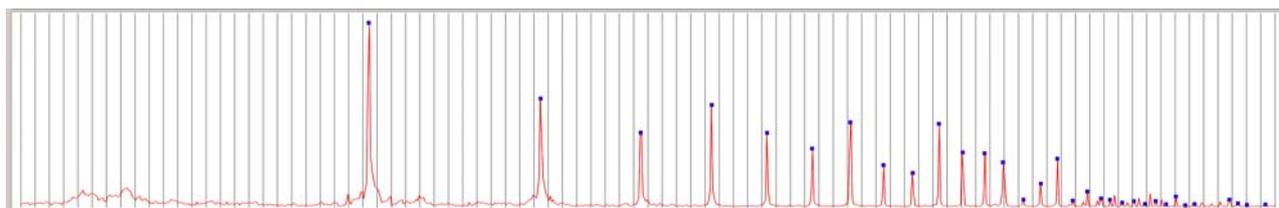


Во время записи следует избегать внешних шумов, насколько это возможно. Если нежелательный шум возник во время записи или если вы не удовлетворены качеством записи, вы можете легко повторить запись, снова сыграв ту же ноту.

Для того, чтобы получить представление о качестве записанного сигнала, ЭФТ предлагает несколько индикаторов качества:

- **Спектр**

Интегрированный спектр — это набор фактически измеренных данных, который служит в качестве основы для всех дальнейших расчетов. Спектр отображается прямо над клавиатурой. Например, ниже показан типичный спектр звука A2:

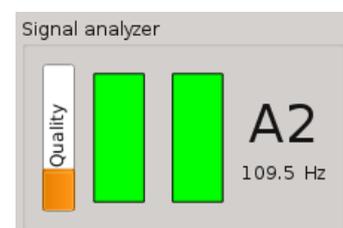


Красная линия отражает меру интенсивности спектра мощности, и ее горизонтальная координата соответствует изображенным ниже клавишам. Как вы можете видеть, струны фортепиано обладают богатым спектром с множеством обертонов. В данном примере основная частота показывает наиболее выраженный пик, но это не всегда так. Кроме того, есть целый ряд высших обертонов. ЭФТ распознает эти частичные тоны и отмечает их небольшим синим квадратом в вершинах пиков.

Если красная кривая исключительно нерегулярна, или если пики сильно смещены, или если синие точки не на своих местах, это может означать, что запись должна быть повторена.

- **Индикатор качества**

Анализатор сигналов — небольшая панель в правом верхнем углу — отображает символ записи, название ноты и ее частоту. Небольшая



вертикальная полоса на левой стороне указывает на качество записываемого сигнала. Степень качества также отражена цветом индикатора, который непрерывно меняется с красного на зеленый.

Индикатор качества измеряет, насколько записанные данные совпадают с теоретической формулой негармоничности для цилиндрических стальных струн. В басах, где струны с медной навивкой, совпадение, как ожидается, будет умеренным (~ 40%, оранжевый), а в середине вы должны получить очень хорошие результаты (> 80%, зеленый). В самой верхней октаве индикатор не срабатывает, потому что в высоких звуках не хватает обертонов, которые можно было бы измерить.

- **Эхо-сигнал**

В случае успешной записи вы услышите краткое эхо записанного звука в наушниках или в динамике. Если вы не слышите этот эхо-сигнал, проверьте настройки аудио приложения (*Инструменты-Настройки-Аудио*).

Цель этого эхо-сигнала двоякая. С одной стороны, эхо подтверждает, что звук был успешно записан, и таким образом, нет необходимости постоянно смотреть на экран. С другой стороны, синтезированное эхо имитирует записанный звук струны и, таким образом, оно должно звучать аналогично. То, что вы на самом деле слышите, не просто воспроизведение записанного сигнала, а ЭФТ синтезирует искусственный звук на основе обнаруженной конфигурации частичных тонов. Это позволяет быстро обнаружить возможные ошибки на интуитивной основе. Например, при неправильном распознавании частичных тонов будет генерироваться звук, который немедленно воспринимается как непохожий на оригинал. В этом случае вы должны записать тот же звук еще раз.

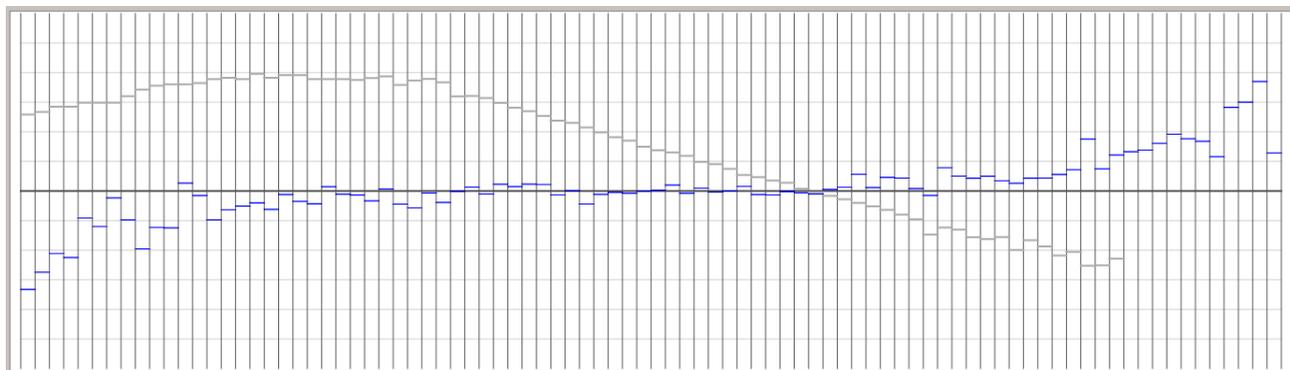


Эта кнопка позволяет отключить динамик и звук эха. Заметим, что эта кнопка отображается только на достаточно больших устройствах. В противном случае используйте элементы управления устройства.

После того, как вы записали все клавиши (все они отмечены зелеными галочками), нужно сохранить свою работу. Это может быть сделано выбором “*Файл-Сохранить*” из меню или нажатием **Ctrl-S**.

## Настроечная кривая и негармоничность

Во время записи во втором окне, расположенном выше спектра, появляются различные маркеры. После завершения записи всех клавиш типичный внешний вид этой панели должен быть похож на следующее:



**Синие маркеры** указывают на отклонение измеренной частоты от математической равномерной темперации. Серые горизонтальные линии сетки фона расположены на расстоянии 10 центов друг от друга (цент = 1/100 полутона), так что все окно охватывает немного больше, чем полутона. В записанных данных вы можете видеть

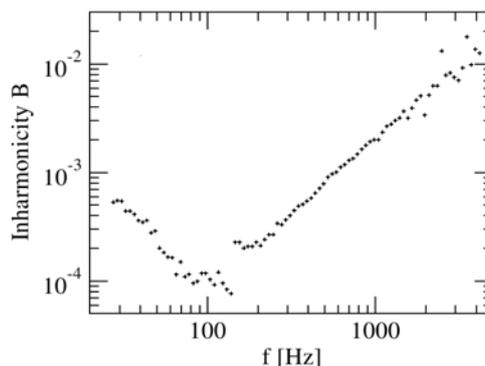
растяжку строя, то есть занижение настройки в басах и ее повышение в дискантах. Если фортепиано не слишком расстроено, синие маркеры могут быть интерпретированы как кривая настройки, произведенной здесь ранее.

**Серые маркеры** отражают *негармоничность* звуков. Мера негармоничности отражается одним числом, так называемым коэффициентом негармоничности  $B$ . На графике справа вы можете видеть, что негармоничность изменяется более чем на два порядка. Но изменения от клавиши к клавише невелики, за одним исключением на переходе от басового штега к дискантовому. Здесь наблюдается скачок величины  $B$ .

Поскольку серые маркеры негармоничности размещаются на одном графике с синими маркерами настройки, мы решили показать их в перевернутом виде. Для пользователей данного ПО конкретные значения  $B$  не представляют особого интереса, скорее для него важно, чтобы серые маркеры (кроме упомянутого перехода от басов к дискантам) изменялись плавно, образуя более или менее гладкую кривую. Скачки обычно означают, что что-то пошло не так. В этом случае рекомендуется записать соответствующую клавишу еще раз. Таким образом, основная цель индикации меры негармоничности – это дополнительный контроль.

Если одна из клавиш обнаруживает существенное отклонение негармоничности даже после повторной записи, это скорее всего вызвано специфической нерегулярностью самого фортепиано, например, нежелательным резонансом струн, деки или интерференцией с незаглушенными струнами в дискантах. Если вы не сможете определить и устранить причину отклонения, придется принять измерение, как есть.

В самой верхней октаве, где обертонов почти нет, измерение негармоничности оказывается невозможным. Здесь ЭФТ не дает серых маркеров.



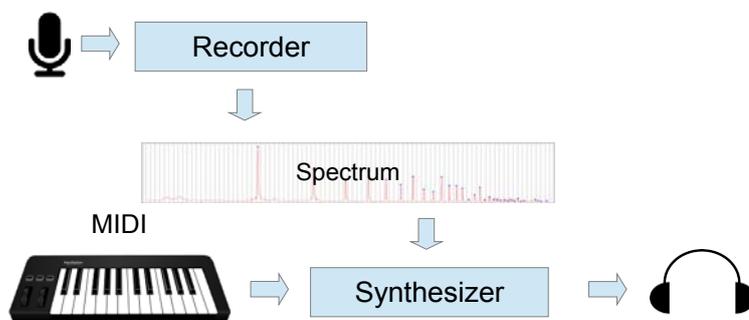
## Финальный контроль качества записи

Если вы используете настольный компьютер или ноутбук, выберите одну из клавиш (она станет зеленой) и затем перемещайте выбор стрелками “←” и “→” вдоль всей клавиатуры. Следите при этом за индикатором качества в правом верхнем углу экрана (см. выше). Это поможет легко обнаружить клавиши со слишком низким качеством записи. Выясните возможные причины низкого качества записи и запишите эти клавиши еще раз. Значения качества ниже 1/3 (красный индикатор) будут проигнорированы.

## Слуховой контроль записанных данных с помощью MIDI-клавиатуры

Дополнительный, но очень эффективный способ проверить качество записи – прослушать звучание получившегося строя на MIDI-клавиатуре. Подключите ваше MIDI-устройство к вашему компьютеру (обычно через USB или bluetooth) и убедитесь, что операционная система распознала устройство. Если вы запустили ЭФТ *после* подключения MIDI-устройства, оно подключится автоматически. В противном случае выберите MIDI в установках *Аудио*.

Если клавиатура подключена правильно, вы сможете на ней играть. Как уже сказано, в ЭФТ встроен синтезатор, формирующий звук из синусоидальных сигналов, соответствующих записанному спектру. Следовательно, то, что вы слышите — не простое воспроизведение записанного звука, а синтезатор производит искусственный звук, реконструированный из спектральных данных. Вы, возможно, заметите, что звук очень похож на звук данного фортепиано, особенно, в басах.

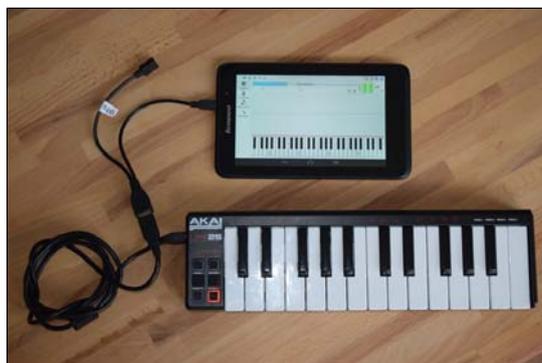


MIDI-синтезатор ЭФТ динамический и полифонический, то есть, вы можете играть на нескольких клавишах одновременно и с разной громкостью. В режиме записи синтезатор формирует звуки клавиш точно на той высоте, на какой они записаны. Следовательно, расстроенные интервалы записанного инструмента при воспроизведении их MIDI-синтезатором будут также расстроенными.

При наличии MIDI-клавиатуры, мы рекомендуем в качестве окончательного контроля прослушать все записанные звуки, обращая внимание на возможные нерегулярности. Если вы обнаружите, что на какой-либо клавише звук необычный или выпадает из облика соседних звуков, мы советуем эту клавишу записать заново.

ЭФТ позволяет использовать MIDI-клавиатуру даже с планшетами и смартфонами. Устройства Android должны иметь разъем USB, поддерживающий **OTG** (on-the-go). При этом понадобится специальный OTG-кабель (см. рисунок). Список OTG-совместимых устройств можно найти [здесь](#).

Аналогичным образом, ЭФТ поддерживает MIDI на iPad. Для этого необходим адаптер USB-камеры. Более подробную информацию о функционировании MIDI можно найти в Приложении А на странице 25.

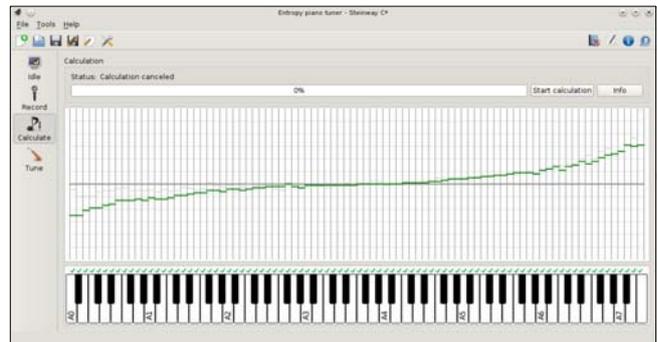


*Android tablet supporting OTG*

# Вычисления



Настало время переключиться в **режим вычисления** нажатием соответствующей кнопки в левой панели инструментов или клавиши **ТАВ**. Вы увидите, что вид графика изменился. В частности, спектр отсутствует, а настроечная кривая занимает все окно.



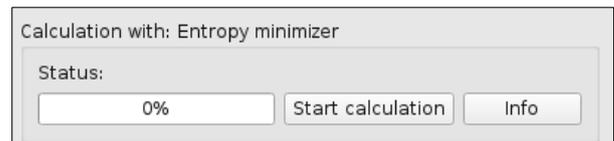
ЭФТ был спроектирован как модульная платформа для тестирования различных алгоритмов настройки, которые можно будет встроить в него позже. Нужный алгоритм можно выбрать, нажав кнопку *Инфо* в правом верхнем углу экрана. Кроме того, эта кнопка открывает информацию об авторах и некоторые инструкции. Запустите вычисления нажатием кнопки “**начать вычисления**”.

В режиме вычислений маркеры имеют следующий смысл. Как и ранее, жирная горизонтальная линия соответствует математической модели равномерной температуры, параллельные ей тонкие линии сетки индицируют отклонение на 10 центов каждая. **Темно-зеленые маркеры** показывают высоты звуков, вычисленные алгоритмом, и формируют настроечную кривую, в соответствии с которой ваше фортепиано будет настроено на следующем этапе. **Серые маркеры** представляют записанные высоты, нормализованные по отношению к заданной высоте А4. Это позволяет вам видеть предыдущую настройку вместе с новой.

## Принятый алгоритм настройки

Нажатием кнопки **Info** вы можете выбрать алгоритм настройки и проверить его установки. Сейчас доступны следующие три возможности:

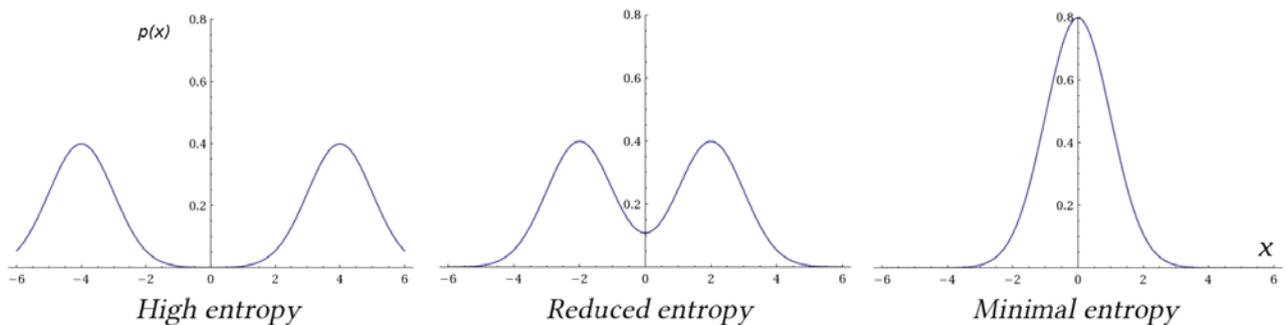
1. **Минимизатор энтропии**, для которого ЭФТ и был спроектирован.
2. **Алгоритм Pitch-raise** для сильно спустивших строй инструментов, позволяющий сгенерировать приблизительную настроечную кривую для быстрого подъема строя.
3. Простой **Алгоритм копирования**, который только фиксирует записанные высоты в настроечной кривой. Это позволяет вам воспроизвести записанный строй, что может быть использовано для его сохранения.



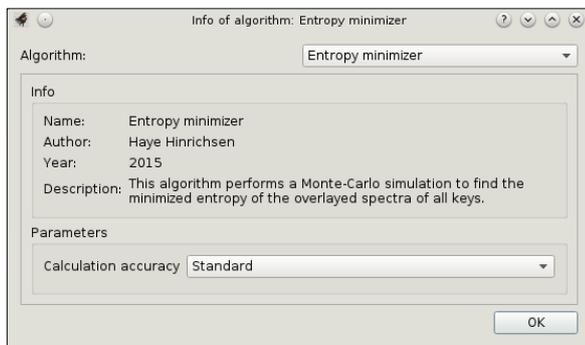
Далее мы обсудим эти алгоритмы более подробно.

## 1. Минимизатор энтропии

Как уже было кратко сказано в предисловии, новый алгоритм поиска минимума энтропии был нами впервые предложен в 2012 г. в бразильском физическом журнале. Исходным пунктом было предположение, что интервал воспринимается как настроенный в случае, если его верхние частичные тоны совпадают между собой наилучшим возможным образом. Ввиду того, что негармоничность фортепианных струн препятствует совершенному совпадению частичных тонов, цель настройки заключается в поиске разумного компромисса. Идея состоит в том, что энтропия Шеннона, как мера беспорядка в системе, обнаруживает локальный минимум в момент достижения такого компромисса. Это вытекает из того факта, что энтропия несовпадающих спектральных линий достигает минимума при их совпадении:



Поиск минимума энтропии осуществляется в алгоритме методом проб и ошибок. Алгоритм моделирует случайные изменения высоты звука случайно выбранной клавиши. Если такое изменение ведет к уменьшению энтропии всего строя, оно принимается, в противном случае, оно отменяется, и выбирается другая клавиша. Энтропия рассчитывается по простому суммированию спектра мощности всех клавиш фортепиано, то есть как бы всех клавиш, нажатых одновременно. Такой очень простой подход обеспечивает алгоритму независимость от имеющегося строя. В ЭФТ этот алгоритм реализован в его оригинальном виде.



Кнопкой *Информация* открывается диалоговое окно, показанное слева. Здесь вы можете выбрать меру точности вычислений, которая определяет время, затрачиваемое на вычисления. Рекомендуем выбрать “infinite”, в этом случае вам придется вручную остановить работу алгоритма, когда вы почувствуете, что результат стабилизировался.

Для запуска процесса вычислений нажмите соответствующую кнопку в правом верхнем углу

главного окна. Вы увидите, что ЭФТ работает в три этапа:

- Вначале записанные спектры фильтруются с учетом частотного диапазона и частотного разрешения человеческого слуха.
- На втором этапе ЭФТ рассчитывает настроечную кривую, которая используется как исходная для следующего этапа. Эта начальная кривая вычисляется детерминировано, путем прямого сравнения обертонов и установления компромисса между различными частичными тонами.
- В заключение запускается алгоритм Монте-Карло (вышеописанный метод проб и ошибок). Вы можете в реальном времени наблюдать, как изменяется настроечная кривая. Фиксируются те изменения, которые ведут к уменьшению энтропии.

Чем дольше алгоритм работает, тем все менее и менее вероятными будут становиться изменения. Как только вы почувствуете, что кривая стала неподвижной, вы можете остановить вычисления, снова нажав ту же кнопку.

Результаты, полученные с помощью такого алгоритма, не являются ни правильными, ни неправильными. Вы обязательно заметите, что повторные вычисления дают сходные, но не идентичные настроечные кривые. На самом деле, проблема настройки фортепиано имеет много возможных решений, и ЭФТ просто выбирает одно из них. Возможно, вы предпочтете какое-то одно решение другим. Поэтому рекомендуется запустить процесс расчета несколько раз и сравнить результаты с помощью MIDI-клавиатуры.

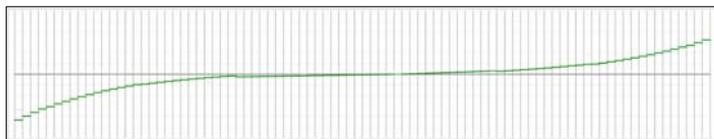
## 2. Алгоритм Pitch-Raise (предварительная версия)

На практике часто приходится сталкиваться с инструментами, которые либо сильно расстроены, либо должны быть перестроены со значительным повышением или понижением общего строя. Обычно такие инструменты настраиваются в несколько проходов. На первом из них достаточна приблизительная настроечная кривая. Алгоритм pitch-raise<sup>2</sup> позволяет быстро сгенерировать такую кривую. При этом достаточно записать только несколько клавиш.

Для подъема строя ранее не записанного инструмента перейдите в режим записи и запишите, например, клавиши A0, A1, A2, A3, A4, A5, A6. По возможности, заглушите клинками вторые и третьи струны хоров, чтобы звучала только одна струна. Поскольку эти клавиши не соседние, они не будут распознаны автоматически, и вам придется выбирать их для записи вручную.

Перейдите в режим вычислений и выберите алгоритм pitch raise. Этот алгоритм основан на предположении, что коэффициент негармоничности экспоненциально изменяется по мере изменения номера клавиши в басовой и дискантовом участках струн. Тем не менее, между этими двумя секциями может быть скачок негармоничности. В связи с этим, алгоритм должен знать номер клавиши, с которой начинается дискантовый участок. По умолчанию это клавиша № 28.

Теперь запустите вычисления, нажав соответствующую кнопку. Будет создана кусочно-гладкая кривая настройки. Если хотите, вы можете эту кривую сохранить. И наконец, переключитесь в режим настройки и выберите нужную высоту строя (клавиша F9). Предупреждение о том, что не все клавиши записаны, проигнорируйте.



Процесс настройки проходит как обычно. Единственное отличие в том, что индикация высоты не записанных клавиш менее точна. Проблемы могут возникнуть в случае сильно расстроенного фортепиано – может не сработать автоматическое распознавание клавиш. В этом случае мы рекомендуем отключить автораспознавание в меню (*Инструменты-Настройки-Окружение-Настройка*) и выбирать звуки вручную, используя клавиши “←” и “→” вашего ноутбука.

**Примите во внимание, что алгоритм pitch-raise пока еще не позволяет точно рассчитать меру перетяжки. Мы продолжаем работать над этой проблемой.**

---

2 Мы реализовали алгоритм Pitch-Raise по предложению Ville Päivinen (Финляндия).

### 3. Алгоритм копирования (*Restore recorded frequencies*)

Этот алгоритм просто переносит записанные частоты в настроечную кривую. Это полезно, если вы хотите сохранить существующую настройку, например, удачную настройку на слух, которую вы хотели бы воспроизвести позже. Обратите внимание, что точное воспроизведение частот требует, чтобы высота строя совпадала с высотой записанного звука А4. В противном случае частоты будут смещены.

### Слуховой контроль рассчитанной настройки

Проще всего проверить результат расчета настроечной кривой на слух с помощью MIDI-клавиатуры. Это позволит вам виртуально поиграть на «настроенном фортепиано» до того, как оно будет реально настроено. Вы можете играть на MIDI-клавиатуре даже во время вычисления и услышать, как ваш инструмент фактически настроен.

Есть даже возможность сравнить новую настройку с тем, как был настроен инструмент во время записи. Просто переключайтесь между режимами записи и вычисления во время игры на MIDI-клавиатуре.

### Ручная коррекция вычисленной настройки

Если вы не удовлетворены настройкой конкретного звука, вы можете исправить ее вручную. Щелкнув левой кнопкой мыши по соответствующему столбцу графика, вы переместите зеленый маркер в эту точку. Можно также двигать маркер вверх и вниз, удерживая его нажатой левой кнопкой мыши. Учтите, что синтезатор воспроизведет эти изменения только после нового нажатия соответствующей клавиши на MIDI-клавиатуре.



Когда качество вычисленной настройки вас будет удовлетворять, желательно еще раз сохранить вашу работу.

## Настройка



*Важное замечание: Если вы не профессионал-настройщик, не пытайтесь ни при каких обстоятельствах самостоятельно настроить ваше фортепиано. В большинстве случаев это может привести к обрывам струн и другим необратимым повреждениям. Пожалуйста, поручите эту деликатную работу опытному фортепианному мастеру.*



Третий и последний этап работы с ЭФТ — настройка фортепиано в соответствии с рассчитанной кривой. Переключитесь в **режим настройки** нажатием соответствующей кнопки или клавишей **ТАВ**. В этом режиме ЭФТ функционирует как обычный тюнер.

В режиме настройки экран ЭФТ снова меняется. Как вы можете видеть, в правом верхнем углу появляется новая панель, предназначенная для индикации отклонений высоты звуков. Главное окно больше не показывает вычисленную настроечную кривую в сравнении с равномерной температурой, оно индицирует отклонения высот звуков от рассчитанной кривой, представленной здесь в виде горизонтальной прямой линии.

Обратите внимание, что ЕРТ был разработан исключительно для фортепиано и что записанные данные должны исходить от реального инструмента, который вы собираетесь настраивать.

ЭФТ снабжен четырьмя индикаторами настройки, о которых сказано ниже.

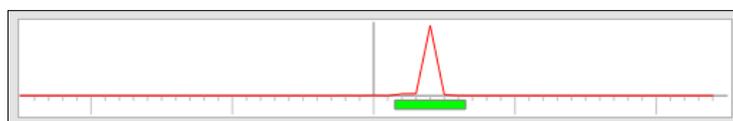
### Индикаторы настройки

#### *Стробоскоп*

Стробоскоп расположен в верхнем правом углу и показывает интерференционную картину в цветах радуги. Картина перемещается влево, если струна настроена низко и вправо, если струна настроена высоко, то есть струну нужно настроить так, чтобы картина остановилась. Отображаемые горизонтальные полосы в окне соответствуют частичным тонам настраиваемой клавиши, в то время как яркость полос зависит от интенсивности частичных тонов. Обратите внимание, что по стробоскопу вы можете настраивать только одну струну в каждый данный момент. Кроме того, важно, чтобы запись должна быть сделана на этом же инструменте. Прикасаясь или щелкнув мышью это окошко, или путем изменения выбора в настройках можно переключаться между стробоскопическим и спектральным режимом, который описан далее.

#### *Индикатор отклонения высоты*

Новая панель в правом верхнем углу является главным индикатором настройки. Он функционирует по существу, как и

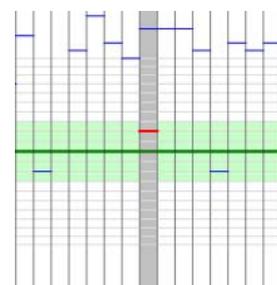


большинство обычных тюнеров. Окно имеет общую ширину +/- 25 центов. Индикатором служит подвижный прямоугольник на нижней линии. Струна настроена правильно, когда маркер находится точно в середине окна. Для визуальной поддержки прямоугольник изменяет свой цвет, как светофор: с красного через оранжевый на зеленый и обратно.

Над прямоугольником расположен индикатор совмещения частичных тонов. Струна настроена правильно, если мы видим один сфокусированный пик в центре этого окна. Появление нескольких пиков говорит об интерференции или аномальной негармоничности струны. Например, раздвоенный пик чаще всего сигнализирует о том, что две струны колеблются с близкими, но не совпадающими частотами. Множественные пики также могут быть вызваны нарушением во время записи, или они могут указывать о повреждении струны.

### ***Маркеры высоты звуков клавиш***

В процессе настройки ЭФТ также помещает красные маркеры основного тона в окне настройки кривой над каждой из клавиш. Как уже было сказано, вычисленная кривая настройки теперь представлена горизонтальной линией в середине графика. Таким образом, звук настроен должным образом, если красный маркер находится где-то внутри зеленой полосы близко к средней линии. Обратите внимание, что горизонтальные линии сетки в центральной части обозначают отклонения в один цент, в то время как крупные линии сетки за пределами центрального участка расположены на расстоянии 10 центов. Иначе говоря, вертикальное представление носит нелинейный характер, масштаб отклонения вокруг средней линии увеличен.



### ***Синтезированный эталонный звук***

В зависимости от настроек встроенного синтезатора ЭФТ воспроизводит эталонный звук в наушниках, обеспечивая очень легкую и естественную невизуальную обратную связь. Сгенерированный звук состоит из измеренных частичных тонов с соответствующими измеренными амплитудами, то есть он обладает точно такой же негармоничностью, как и сама струна. Таким образом, струна настроена, если биения между искусственным звуком и фактическим звучанием струны исчезают полностью. Громкость эталонного звука регулируется автоматически в зависимости от фактической громкости пианино. Если вы не используете наушники, пожалуйста, не забудьте отключить громкоговоритель вашего устройства, так как в противном случае эталонный звук может привести к нежелательной обратной связи.

Насколько нам известно, ЭФТ — это первое настроечное ПО, предоставляющее негармоничный опорный звук.

### ***Процедура настройки***

Каждый настройщик имеет свой личный способ настройки фортепиано, и давать советы, безусловно, не является целью данного руководства. Тем не менее, мы хотели бы суммировать несколько общих руководящих принципов для эффективного использования ЭФТ:

- При настройке струны всегда начинайте с понижения высоты, пока вы не услышите четко ответ. Это снижает риск неправильного выбора колка и обрыва струны.

- Если инструмент сильно расстроен или если вы хотите изменить общую высоту строя, сначала настройте его грубо (Pitch-Raise), а затем через несколько дней более точно.
- В унисонах (хорах из двух и трех струн) мы рекомендуем одну из них настроить по ЭФТ (заглушив клинком остальные) и затем настроить остальные в унисон к первой на слух.
- Низкие звуки в басах можно довольно точно настроить по синтезированным опорным звукам в наушниках. Визуальные индикаторы здесь не так эффективны, поскольку реагируют медленно.
- В середине диапазона мы рекомендуем использовать наушники вместе с визуальными индикаторами.
- В верхних дискантах опорные звуки малоэффективны, и визуальные индикаторы становятся важнее. Будьте осторожны, не завышайте тон при настройке слишком сильно, чтобы не оборвать струны.
- В зависимости от вашего возраста и опыта может быть удобной настройка каждой из трех струн в высшей октаве отдельно по ЭФТ. Здесь, в особенности, в самых верхних звуках, индикаторы ЭФТ могут оказаться точнее человеческого слуха.
- Не стремитесь к чрезмерной точности. Нет никакого смысла в получении нуля центов на индикаторах. Отклонения в один-два цента вполне приемлемы. Найдите вашу оптимальную точность.
- Для наилучшей стабильности строя старайтесь настраивать так, чтобы все колки в конечном итоге оставались с примерно одинаковым остаточным торсионным напряжением в вирбельбанке.
- И, наконец, если вы хотите проверить, насколько точно фортепиано было настроено в соответствии с рассчитанными частотами, вы можете вернуться в режим записи и повторить процедуру записи. Вычисленная и фактическая настроечные кривые должны совпадать в пределах нескольких центов.

## Перетяжка при подъеме строя (new)

На практике часто приходится сталкиваться с ситуацией, когда пианино не было настроено в течение длительного времени, так что весь строй оказывается существенно ниже, например, более, чем 10 центов, но относительно равномерно. В этом случае необходимо выполнить подъем строя.

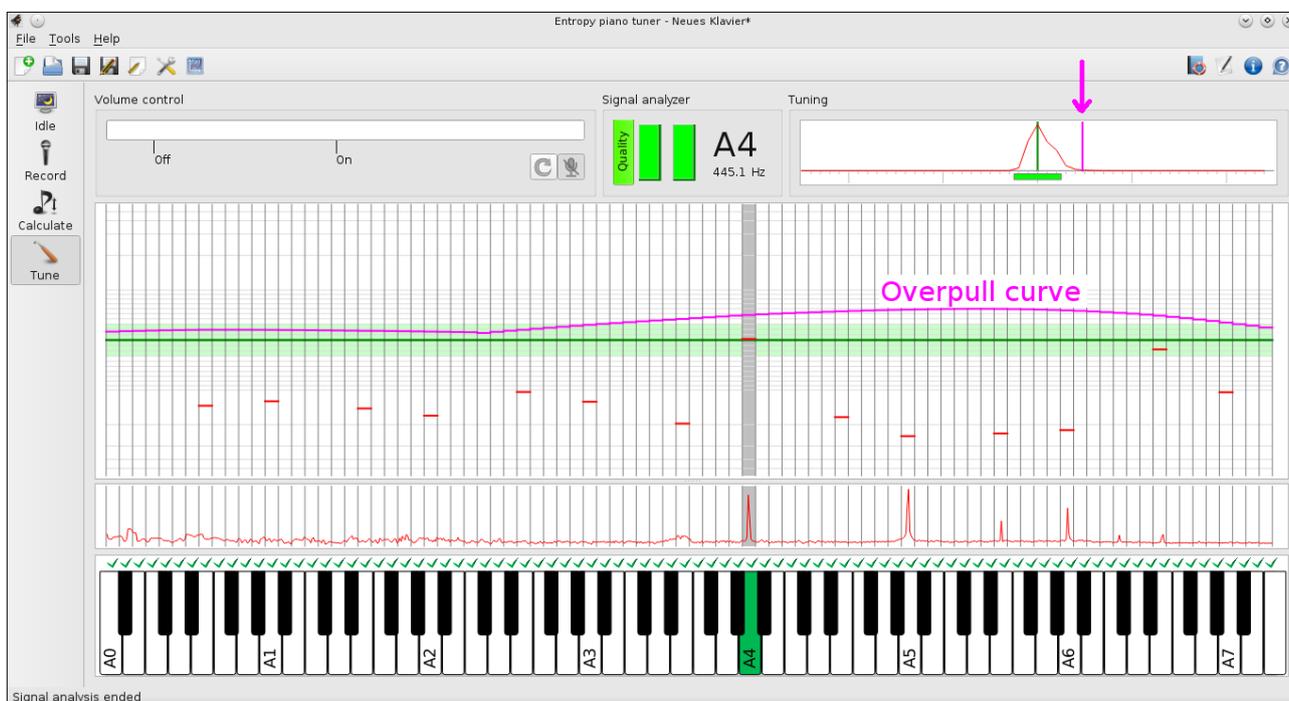
Основной проблемой, возникающей при подъеме строя, является деформация резонансной деки. Когда натяжение всех струн увеличивается, растет и их давление на штеги, что немного деформирует деку. Несмотря на то, что влияние роста натяжения каждой струны ничтожно, оно суммируется в процессе подъема строя. В результате, подняв высоту звука каждой струны, скажем, на 50 центов, мы за счет упомянутой деформации поднимем строй только примерно на 40 центов.

Термин «перетяжка» относится к технике, которая компенсирует эту предсказуемую потерю высоты строя путем настройки струн немного выше, чем предусмотрено вычисленной настроечной кривой. ЭФТ включает в себя алгоритм (пока что предварительный) для вычисления соответствующей меры перетяжки. Этот алгоритм запускается автоматически в фоновом режиме без каких-либо дополнительных элементов управления.

Для того, чтобы провести подъем строя с перетяжкой, пожалуйста, действуйте следующим образом:

- Сначала сформируйте кривую настройки с одним из алгоритмов, описанных выше. Если вы настраивали это фортепиано ранее, вы можете также загрузить соответствующий файл \*.ert.

- Установите приблизительную высоту строя в паспорте фортепиано (**F9**) по имеющейся (низкой) настройке. Это обеспечит ЭФТ уверенное распознавание клавиш.
- Перейдите в режим настройки, при необходимости очистите красные маркеры из предыдущей настройки и сыграйте несколько клавиш. Например, можно сыграть все черные клавиши или двигаться по одинаковым интервалам, но не более квинты. Это сформирует красные маркеры настройки по всей клавиатуре. Эта процедура занимает несколько минут, и необходима, так как ЭФТ должен оценить существующий строй.



- После записи достаточного количества красных маркеров выберите нужную высоту строя в окне паспорта фортепиано (**F9**). Если инструмент спустил строй, маркеры должны располагаться ниже кривой настройки.
- Если имеется достаточное количество красных маркеров и если фортепиано ниже выбранной высоты строя в среднем более чем на 5%, то ЭФТ автоматически покажет вычисленную кривую настройки с перетяжкой пурпурного цвета выше горизонтальной линии.
- Теперь вы можете настроить фортепиано, как обычно, единственное отличие заключается в том, что вы настраиваете инструмент по кривой пурпурного цвета вместо зеленой прямой линии. То же самое относится к индикатору настройки в верхнем правом углу, где появляется дополнительная линия для перетяжки (см. рисунок).
- Вы можете настроить струны в произвольном порядке. Двух- и трехструнные хоры должны быть сведены в унисон, то есть, все струны хора должны быть настроены на новую высоту.
- Как вы заметите, мера перетяжки вычисляется постоянно и со временем уменьшается. Кроме того, вертикальное положение красных маркеров корректируется в соответствии с ожидаемой осадкой всего строя. Если все работает, как надо, в конечном итоге красные маркеры и пурпурная кривая перетяжки должны совпасть с зеленой горизонтальной линией.
- Следует иметь в виду, что некоторые фортепиано не подходят для перетяжки. Для того, чтобы уменьшить риск разрыва струн, ЭФТ ограничивает максимальную перетяжку до +25 центов. Мы предполагаем использование алгоритма перетяжки для фортепиано, спустивших 

строй от 10 до 50 центов. Для инструментов, спустивших строй более чем на 50 центов, мы рекомендуем настройку в несколько проходов.

- **Обратите внимание, что алгоритм перетяжки пока что находится в экспериментальном состоянии. До сих пор он еще не был проверен на практике. Пожалуйста, сообщите нам, полезна ли эта реализация и как вы оцениваете качество результата.**

**Справочная информация:** алгоритм перетяжки основан на матрице RJK, которая определяет, насколько увеличение высоты звука струны  $k$  понижает высоту струны  $j$ . Для этой матрицы мы разработали теоретическую модель, которая использует различные упрощения и приближения. Вы можете помочь нам улучшить алгоритм, играя все клавиши снова в режиме настройки после завершения настройки с перетяжкой и корректируя вертикальное положение красных маркеров. Теория верна, если они группируются по зеленой линии. Напротив, систематические отклонения от зеленой линии показывают, что модель должна быть пересмотрена. В этом случае, пожалуйста, пришлите нам снимок экрана.

## Обратная связь

Настоящая программа ЭФТ была разработана двумя авторами всего за три месяца, и поэтому данное ПО ни в коем случае не может считаться совершенным. Если у вас есть предложения, как улучшить программное обеспечение, пожалуйста, сообщите нам об этом, отправив сообщение по электронной почте на адрес [info@piano-tuner.org](mailto:info@piano-tuner.org). Благодарим Вас за понимание того, что мы не можем ответить на все письма сразу.

Как уже упоминалось, все желающие приглашаются внести свой вклад в проект. Распознавание клавиш иногда не срабатывает и должно быть улучшено. Точно так же индикаторы настройки далеки от совершенства. И самое главное, есть много свободы при разработке других алгоритмов настройки, используя более совершенные методы Монте-Карло или различные минимизации функционалов. Пожалуйста, посетите нашу страницу [developer page](#) и загрузите программный код с [git repository](#).

*Благодарим за Ваш интерес!*

## Устранение неисправностей

### ЭФТ не распознает нажатую клавишу фортепиано

В режиме записи и настройки ЭФТ распознает клавишу фортепиано по ее звучанию и информирует Вас о результатах, выделив соответствующую отображаемую клавишу. Если она совпадает с выбранной, распознанная клавиша становится оранжевой, в противном случае — серой.

В нормальных условиях ЭФТ должен распознать более 90% клавиш правильно. В сложных случаях можно форсировать распознавание нажатием клавиши дважды (см. с. 11).

Если распознавание не удается часто, наиболее вероятной причиной является превышение уровня входного сигнала. В спектре такое превышение проявляется в виде фонового шума, поднимающего красную линию между пиками.

## Сбои в работе ЭФТ

Сбои — злейший враг людей, пишущих программное обеспечение, потому что они в принципе не могут произойти. В случае сбоя, пожалуйста, попробуйте перезапустить ЭФТ. Должно появиться диалоговое окно, спрашивая вас, хотите ли вы посмотреть log-файл. Попробуйте скопировать последние несколько сообщений в log-файле и отправить их нам по электронной почте. Просьба предоставить также некоторую информацию об оборудовании, которое вы используете, и сообщить, в какой части процедуры настройки произошел сбой.

# Приложения

## А: Функционирование MIDI

Интерфейс MIDI находится пока в процессе разработки. В настоящее время MIDI-клавиатуры поддерживаются на следующих платформах:

<b>Windows</b>	Успешно протестирована с USB-клавиатурой. Клавиатура должна быть подключена перед запуском ЭФТ.
<b>Android</b>	MIDI-клавиатуры USB можно использовать на мобильных устройствах, которые поддерживают OTG. Так называемый OTG-адаптер необходим для подключения клавиатуры USB. Список OTG-совместимых устройств можно найти <a href="#">здесь</a> .
<b>MAC-OS</b>	Успешно протестирована с USB-клавиатурой. Клавиатура должна быть подключена перед запуском ЭФТ.
<b>IOS</b>	Полностью поддерживается на iPad. Необходим адаптер USB-camera-to-lightning.
<b>Linux</b>	Поддерживает все ALSA-совместимые MIDI-устройства, в том числе большинство USB-клавиатур. Клавиатура должна быть подключена перед запуском ЭФТ.

Функционирование MIDI-синтезатора зависит от режима работы:

<b>Ожидание</b>	Воспроизведение чистых синусоидальных звуков, настроенных в выбранной высоте строя в соответствии с математической равномерной темперацией.
<b>Запись</b>	Воспроизведение синтезированных звуков записанных клавиш до настройки. Просим использовать наушники, чтобы избежать нежелательной обратной связи через микрофон.
<b>Вычисления</b>	Воспроизведение синтетических звуков с правильной негармоничностью, какие мы получили бы после настройки на основе текущего результата расчета.
<b>Настройка</b>	Воспроизведение эталонного звука целевой высоты и ожидаемой негармоничности спектра. Струна может быть настроена путем устранения биения между звуками струны и наушников. Громкость регулируется автоматически в зависимости от уровня входного сигнала микрофона.

Если ваша MIDI-клавиатура правильно распознается операционной системой (например, с помощью других приложений), но не работает с ЭФТ, пожалуйста, сообщите нам и дайте нам сведения о конфигурации оборудования.

## В: Инструменты для анализа данных

В качестве экспериментальной платформы ЭФТ позволяет просматривать и экспортировать внутренние данные. В настоящее время возможны два варианта. Вы можете взглянуть на данные, открыв встроенную программу просмотра. В качестве альтернативы вы можете экспортировать и анализировать данные в электронную таблицу.<sup>3</sup>

### Отображение и анализ данных

Чтобы открыть программу просмотра данных необходимо открыть файл и нажать кнопку «график» в верхней панели инструментов. В новом окне откроется график, который показывает измеренные и вычисленные данные.



Работа программы практически не требует объяснений. Четыре цветные кнопки в верхней панели инструментов выбирают тип данных для отображения, т. е. негармоничность или комбинации различных частот. Приведенные данные могут быть увеличены на мобильных устройствах, раздвигая картинку двумя пальцами, а на настольных компьютерах, перетаскивая прямоугольник с помощью мыши. Зеленые стрелки позволяют перемещаться к предыдущему представлению и обратно. Если вы потерялись, вы можете нажать на крайнюю левую кнопку, чтобы восстановить первоначальное масштабирование.



**Закончив анализ данных, закройте окно просмотра, чтобы вернуться к главному экрану ЭФТ.**

<sup>3</sup> Реализацию инструмента просмотра и анализа данных нам предложил Isaac Oleg, Париж.

## Экспорт данных

Функция экспорта позволяет сохранить все данные в отдельном файле и проанализировать его с помощью стандартного редактора электронных таблиц, таких как *Microsoft-Excel* или *OpenOffice*. Из-за ограниченного управления файлами мобильных устройств, эта функция доступна только на настольных версиях ЭФТ (Windows, OS-X, Linux).

Для экспорта данных выберите *File-Export* из меню. Вам будет предложено выбрать место, где вы хотели бы сохранить экспортированный файл.

```
"key index","Inharmonicity","Recorded frequency","Recorded deviation","Computed frequency","Computed deviation","Tuned frequency","Tuned deviation","Quality"
1 , 0.00027, 26.92, -32.9, 27.28, -14.0, 26.93, -32.4, 0.81
2 , 0.00025, 28.61, -27.1, 28.92, -13.0, 28.59, -28.8, 0.76
3 , 0.00022, 30.42, -20.8, 30.69, -10.0, 30.43, -20.9, 0.61
4 , 0.00022, 32.21, -22.1, 32.51, -10.0, 32.19, -23.2, 0.70
5 , 0.00021, 34.39, -8.8, 34.43, -11.0, 34.40, -8.7, 0.69
6 , 0.00021, 36.37, -11.6, 36.52, -9.0, 36.36, -12.6, 0.74
7 , 0.00021, 38.75, -2.0, 38.71, -8.0, 38.75, -2.2, 0.88
8 , 0.00018, 40.88, -9.4, 40.99, -9.0, 40.91, -8.3, 0.86
9 , 0.00015, 43.06, -19.2, 43.55, -4.0, 43.13, -16.9, 0.77
10 , 0.00014, 45.82, -12.0, 46.06, -7.0, 45.81, -12.4, 0.82
11 , 0.00014, 48.54, -12.1, 48.77, -8.0, 48.59, -10.5, 0.82
```

Данные будут записаны в известном формате \* .csv (csv=comma-separated value). Это просто таблица в простом текстовом файле, который может быть прочитан большим разнообразием инструментов анализа данных, в том числе *Microsoft Excel* и *OpenOffice*.



	A	B	C	D	E	F	G	H	I
1	Key index	Inharmonicity	Recorded frequency	Recorded deviation	Computed frequency	Computed deviation	Tuned frequency	Tuned deviation	Quality
2	1	0.00027	26.92	-32.9	27.28	-14.0	26.93	-32.4	0.81
3	2	0.00025	28.61	-27.1	28.92	-13.0	28.59	-28.8	0.76
4	3	0.00022	30.42	-20.8	30.69	-10.0	30.43	-20.9	0.61
5	4	0.00022	32.21	-22.1	32.51	-10.0	32.19	-23.2	0.70
6	5	0.00021	34.39	-8.8	34.43	-11.0	34.40	-8.7	0.69
7	6	0.00021	36.37	-11.6	36.52	-9.0	36.36	-12.6	0.74
8	7	0.00021	38.75	-2.0	38.71	-8.0	38.75	-2.2	0.88
9	8	0.00018	40.88	-9.4	40.99	-9.0	40.91	-8.3	0.86
10	9	0.00015	43.06	-19.2	43.55	-4.0	43.13	-16.9	0.77

## Dropbox

Файлы ЭФТ могут быть обменены довольно легко с помощью Dropbox®. После того, как вы загрузили файл в Dropbox, вы можете напрямую двойным щелчком по нему отправить его на ЭФТ, и он откроется автоматически. Это позволяет, например, переместить файл ЭФТ с рабочего стола на ваш iPad или ваше Android-устройство. Противоположное направление, однако, в данный момент не поддерживается.

## С: Часто задаваемые вопросы

- Какова разрешающая способность ЭФТ по частоте?

ЭФТ работает с разрешением в 1 цент. Мы решили использовать это разрешение, поскольку записанные спектральные линии имеют ширину того же порядка. Некоторые электронные тюнеры имеют разрешение вплоть до 0.2 цента, но мы не понимаем, как можно получить такое высокое разрешение.

- Как насчет исторических температур?

Минимизатор энтропии обрабатывает все клавиши на равных. Это означает, что он генерирует строй, близкий к равномерной температуре. Мы еще не знаем, как относиться к историческим температурам в этой обстановке.

- **Октавы настраиваются чисто?**

Нет. Октавы обрабатываются минимизатором энтропии, как и любой другой интервал. Если это выгодно для настройки в целом, ЭФТ допустит биения в октавах.

- **Какую температуру делает ЭФТ?**

Хороший вопрос. Мы не знаем точно. Конечно, мы получаем что-то близкое к равномерной температуре. Минимизатор энтропии написан таким образом, что все тона обрабатываются на равных. Таким образом, нет встроенного предпочтения для какой-либо конкретной клавиши.

- **Существует только один минимум энтропии. Если это верно, то почему алгоритм снова и снова генерирует разные настроечные кривые?**

Энтропия подобна поверхности горы в 88-мерном пространстве. Алгоритм ищет локальный минимум в этом сложном ландшафте, в основном, как бы сбегая вниз с помощью случайной стратегии поиска. Таким образом, алгоритм находит один из локальных минимумов, а не глобальный.

- **Использует ли Минимизатор энтропии истинные или искусственных случайных чисел?**

Алгоритм поиска минимума энтропии инициализируется истинным случайным числом, которое генерируется внутри на основе перемещения мыши и других подобных событий. Отталкиваясь от этого, мы генерируем псевдо-случайные числа высокого качества, используя алгоритм Мерсенна-Твистера. Фактическая последовательность этих случайных чисел всегда различна, следовательно, результаты вычислений не воспроизводимы. Можно было бы, конечно, использовать один и тот же источник во всех опытах, но при этом можно было бы замаскировать случайный характер алгоритма.

- **Каким образом ЭФТ распознает частоту в режиме настройки?**

Частотный спектр звукового сигнала, линейный по частоте, логарифмически реорганизуется в полосах с шириной 1 цент. Окно настройки в правом верхнем углу показывает *коэффициент свертки* записанного и фактического сигнала. Это означает, что все частичные тоны будут приняты во внимание одновременно. По этой причине индикатор быстро реагирует даже в басах.

- **Где я могу откалибровать ЭФТ?**

Мы проверили различные аппаратные устройства и обнаружили, что отклонения в тактовой частоте очень малы, как правило, они значительно ниже разрешающей способности ЭФТ. Очевидно, что современные устройства довольно точны, и поэтому мы пришли к выводу, что калибровка ЭФТ, скорее всего, не нужна.

Mac, Macintosh, Apple, Apple Macintosh, логотип Macintosh, логотип Apple, интерфейс ОС Apple Macintosh — это торговые марки или зарегистрированные торговые марки Apple, Inc. Google, логотип Google, интерфейс Google — это торговые марки или зарегистрированные торговые марки Google, Inc. Microsoft, Microsoft Windows, Microsoft Windows Vista, логотип Microsoft, логотип Microsoft Windows, логотип Microsoft Windows Vista, интерфейс ОС Microsoft Windows — это торговые марки или зарегистрированные торговые марки Microsoft, Inc.