

М. Ю. КНЯЗЕВ

Воронежская государственная академия искусств

УДК 781.1:534.3

ОПТИМИЗАЦИЯ АЛГОРИТМА ДИНАМИЧЕСКОЙ НАСТРОЙКИ С УЧЁТОМ ОБЪЕКТИВНЫХ ХАРАКТЕРИСТИК МУЗЫКАЛЬНОГО ЗВУКА

Проблема поиска идеального строя на сегодняшний день является актуальной задачей музыкальной акустики. История проблемы насчитывает не одну сотню лет. В соответствии со своего рода «общественным мнением» музыкантов, такой строй должен был бы обладать полной симметрией относительно транспозиции, но при этом все интервалы (по крайней мере, консонантные) оставались бы акустически чистыми – как правило, это означает, что соотношение частот выражается простой дробью. Несмотря на огромное количество теоретических разработок, на практике широкое применение нашли только три основных строя: пифагоров, чистый и равномерно темперированный. Каждый имеет целый ряд вариаций, связанных с технической реализацией настройки того или иного инструмента, но ни один из них по разным причинам под определение «идеального» не подходит.

На настоящий момент сложились два пути приближения реального строя к идеальному. Наиболее очевидный (и исторически более ранний) заключается в делении октавы на более чем 12 равных или неравных интервалов. Первые опыты подобного рода были предприняты ещё до появления темперированного строя итальянским композитором Николо Вичентино в XVI веке. Построенные им архиорган (36 звуков в октаве) и архичембало (24 звука в октаве) до наших дней не сохранились, но по отдельным источникам можно установить, что для их настройки использовался аналог среднетонного строя с очень малой величиной темперации [8].

Наиболее совершенной в звуковом отношении является 53-звуковая равномерная темперация, дающая возможность осуществить с большим приближением интервалы как чистого, так и пифагорова строя. Впервые система с 53 звуками в октаве была построена и объяснена Н. Меркатором в конце XVII века, но никакого развития и практического применения не получила. В 1872 году Т. А. Дженнингсом в Лондоне была изготовлена фисгармония этого строя по проекту Р. Бозанкета¹. Несмотря на то, что для традиционной техники игры на клавишных инструментах она оказалась не применима, при определён-

ной подготовке на данном инструменте вполне возможно исполнение некоторых произведений.

История применения динамического строя

Система Н. Меркатора с точки зрения чистой теории представляет на сегодняшний день вершину поисков идеального строя. Формально строй отвечает критериям чистоты интервалов и инвариантности транспозиции. Но его практическое использование серьёзно ограничено из-за избыточной сложности клавиатуры. Поэтому в последние годы появились идеи принципиально новой организации строя. В англоязычных источниках используются термины «dynamic tonality» или «dynamic tuning (system)» (например, см.: [9]). Действительно, если исходить из потребности сохранения конструкции инструмента и приёмов игры на нём, гораздо удобнее иметь систему (механическую или электронную), которая по ходу исполнения или воспроизведения может изменять настройку инструмента.

Несмотря на то, что вопросы динамической настройки получили своё развитие только в работах, вышедших в XXI веке, её история насчитывает как минимум полтора столетия. Ведь формально к техническим средствам динамической настройки можно отнести и квартвентили медных духовых инструментов, и сложный педальный механизм арфы, позволяющий с помощью набора из семи струн в октаве воспроизводить полную хроматическую гамму.

Среди теоретических работ, подготовивших систему динамической настройки, отметим труды по теории управления хором. В частности, подход с применением динамически переменного строя прослеживается у П. Г. Чеснокова [5, с. 58–88], где автор при анализе произведений использует специальные обозначения для коррекции исходного строя в пределах нескольких десятков центов в зависимости от ладотональных особенностей конкретного фрагмента. Несмотря на то, что количественных оценок Чесноков не приводит, и при исполнении произведения дирижёр и хор опираются лишь на субъективные звуковые ощущения, сама идея о возможности постоянной коррекции строя нашла применение в наши дни.

В современной отечественной музыковедческой литературе термин «динамическая настройка» не является общепринятым и практически не встречается. Однако это не означает полного отсутствия интереса к данной проблеме. Если в зарубежных исследованиях на первое место ставятся технические аспекты, то в нашей стране приоритетным направлением остаётся изучение прикладных аспектов теории строя в связи с конкретными музыкальными произведениями, в основном хоровыми. Именно хоровая музыка, будучи полностью свободной от ограничения числа звуков в октаве, представляет собой своего рода слепок акустического мышления музыкантов соответствующей эпохи. Например, точные расчёты структуры звуко-рядов, приведённые в работе В. Э. Девуцкого [3] не всегда можно напрямую применять в ходе исполнения произведений, но подобная информация оказывается чрезвычайно полезной для создания алгоритмов автоматического функционирования систем динамической настройки. При таком подходе возможна дополнительная оптимизация строя, исходящая из акустического анализа произведения в целом, а не его малого фрагмента.

В зарубежной музыкальной науке теория динамической настройки развивается в направлении технической реализации. Как недостаток подобного подхода можно отметить довольно значительный разрыв между собственно теорией и практикой публичного исполнительства и звукозаписи. В то же время учёные имеют возможность не только математически разрабатывать алгоритмы функционирования систем динамической настройки, но и воплощать свои идеи технически, ведь обычно подобные исследования поддерживаются производителями музыкальных инструментов. Как правило, в основе технических устройств реализации динамического строя лежит аналог системы автоаккомпанемента, уже давно применяемой на синтезаторах. То есть, система распознаёт текущую вертикальную структуру созвучия и достаточно быстро (время реакции системы сопоставимо со временем нарастания звука) «вычищает» интервалы для достижения максимально чистого звучания в соответствии с заложенной схемой. Обычно системы настроены на реализацию интервалов чистого строя.

В 2003 году американец Джим Племондон (Jim Plamondon) основал компанию «Thumtronics», которая приступила к мелкосерийному выпуску устройства с коммерческим названием «Thummet». Оно представляет собой две отдельные кнопочные клавиатуры для левой и правой руки, устроенные по аналогии с клавиатурой баяна. При исполнении употребляются только 4 пальца, а большой палец управляет отдельными контроллерами, позволяющими менять громкость и управлять эффектом вибрато. Изначально устройство создавалось для любителей музыки, не имеющих музыкального образования, в связи с чем инвариантная аппликатура имела весьма суще-

ственное преимущество. Позднее обнаружилось, что данное устройство путём изменения программного обеспечения можно адаптировать для игры в самых разных строях. Например, комплекс программ, разработанный коллективом авторов из США², позволяет оперативно (в процессе исполнения) изменять строй, причём используя как устройство «The Thummet», так и обычную компьютерную клавиатуру. Нельзя утверждать, что это в полном смысле система динамической настройки, поскольку строй изменяется по команде человека, но первый шаг к ней был сделан.

Более совершенной разработкой стал программный комплекс «Groven.Max», созданный 2002 году [7]. Он представляет собой алгоритм, позволяющий анализировать интервальный состав произведения и «очищать» интервалы в реальном времени, то есть в процессе исполнения. Название получил в честь норвежского композитора и этномузыковеда Эйвинда Гровена, который ещё до войны изобрёл систему механической перестройки органа для исполнения как академической музыки, так и фольклорных произведений. Традиционная органная клавиатура при помощи модифицированной телефонной станции соединялась с тремя независимыми системами труб, при этом в октаве было 36 неравномерно темперированных звуков, из которых в соответствии с текущими интервальными условиями выбирались 12. Естественно, быстроедействие системы ограничивалось инертностью сложной механики, поэтому долгое время проект не имел дальнейшего развития.

С появлением электронных инструментов и формата музыкальных данных MIDI отпала необходимость иметь прямую связь с исполнительным механизмом. Комплекс «Groven.Max», созданный на основе специального языка для работы с MIDI-данными, обеспечивает его совместимость практически со всеми существующими устройствами, поддерживающими формат. В частности, программа устанавливается на «Yamaha Disklavier» – акустическом рояле, который полностью управляется электроникой, позволяющей оперативно изменять настройку каждой отдельной клавиши. Важно, что программа использует сведения только об уже взятых звуках, то есть предварительный анализ сочинения не производится. Переключение происходит в течение 15–30 мс после нажатия клавиш. Для звука фортепиано это вполне приемлемо, но для органа с его меньшим временем атаки и незатухающим звуком перестройка в некоторых случаях заметна на слух.

Альтернативный подход к функционированию системы динамической настройки

Если речь идёт об исполнении произведений с постоянным звуковысотным составом (без элементов импровизации), то представляется целесообразным применить несколько другую стратегию динамической настройки. В отличие от существующих систем,

которые срабатывают после клавиатурного воспроизведения того или иного созвучия, предлагается выполнить предварительный анализ и определить оптимальные моменты переключения. При этом можно полностью избежать ситуаций, когда программа неправильно «угадывает» направление следующей модуляции или переключает настройку в момент звучания аккорда. Наиболее важным преимуществом такого подхода является алгоритм оптимального выбора момента переключения от одной настройки к другой. Когда в произведении есть ярко выраженный тональный план, то точки переключения довольно легко определить, однако для музыки, в которой отсутствуют привычные тонально-функциональные отношения (именно для неё динамическая настройка является наиболее актуальной), обозначить алгоритм, действующий без участия человека, оказывается значительно сложнее.

Очевидным недостатком имеющихся систем динамической настройки является полная несогласованность алгоритма с психоакустическими особенностями восприятия человека. То есть, заложенная программа ориентирована на возможно более точное математическое воспроизведение интервалов чистого (или любого другого) строя, безотносительно к тому, почувствует ли человек разницу воспроизведённых созвучий или нет. Большую роль играют также стилистические особенности исполняемого произведения, которые тоже обычно не учитываются существующими системами. Учёт двух указанных обстоятельств даёт возможность значительно упростить работу системы динамической настройки, в первую очередь за счёт сокращения количества выполняемых операций.

Программная и, тем более, техническая реализация, остаётся за рамками настоящего исследования. Здесь мы рассмотрим отдельные факторы, влияющие на принятие системой решения о переключении. К объективным факторам можно отнести длительность каждого отдельного звука, характер его затухания (нарастания), интенсивность звучания и довольно сложные зависимости от структуры реальных тембров инструментов. К субъективным – различные эффекты, вызванные нелинейностью человеческого слуха и эффекты звуковой маскировки. Также следует принимать во внимание общемзыкальные соображения, так как далеко не всегда чистый строй является наиболее удачным с точки зрения замысла композитора или, например, достижения максимальной аутентичности.

Итак, важной частью алгоритма системы динамической настройки является определение условий, при которых какое бы то ни было отличие строя от темперированного будет заметно на слух. Как правило, учёт всех этих факторов (особенно субъективных) приводит к необходимости проведения довольно сложных экспериментов с участием большого числа опрашиваемых, однако даже это не гарантирует до-

стоверности результатов. Однако при правильном выборе исходных предположений о весомости того или иного фактора можно добиться желаемого упрощения алгоритма функционирования системы без проведения сложного анализа. Очевидно, что в первую очередь должны быть исследованы зависимости от объективных характеристик каждого отдельно взятого звука, поскольку такой подход отличается универсальностью и не определяется психофизиологией человека, а значит, удобен для формализации.

Как известно, отдельный музыкальный звук имеет четыре основные характеристики: частоту, амплитуду, длительность и тембр (спектральный состав). Если первые три являются некоторыми элементарными величинами с определённым значением, то спектр представляет собой сложную совокупность данных, содержащих в себе всю информацию о звуке. Спектр отображает состав обертонов, их относительные амплитуды, а также даёт возможность оценить, насколько точно улавливается частота (субъективная высота) того или иного звука.

Поясним изложенное простым примером. Допустим, имеются два чистых (синусоидальных) тона с небольшой разницей в частоте. Если соответствующие им пики в спектре окажутся достаточно узкими (как будет показано ниже, это достигается увеличением времени звучания), то мы можем идентифицировать их как два различных звука с помощью прибора или на слух. В случае, если пики пересекутся на половине своей высоты или выше (что в данных графиках соответствует малому времени звучания при прочих равных условиях), то мы получим один, хотя и более широкий, пик (см. рис. 1).

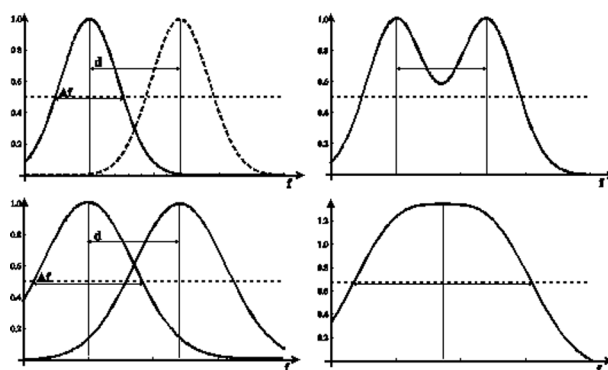


Рис. 1. Абстрактный пример, иллюстрирующий смысл неопределённости частоты

Итак, любой звук (точнее, любой отдельно взятый обертоном) изначально имеет некоторую неустранимую погрешность частоты, обусловленную только объективными факторами. Принципиально важно, что данная погрешность никак не связана с зонной природой слуха, поскольку ширина зоны определяется физиологией человека и особенностями восприятия. В итоговых таблицах приводятся оценки для шири-

ны пиков как простых (искусственно генерированных звуков), так и сложных реальных созвучий. Сравнивая полученные значения с характерной разницей между разными строями можно сделать вывод о целесообразности той или иной корректировки строя.

Наиболее простым случаем для анализа является звук, представляющий собой чистый (синусоидальный) сигнал с заданной частотой и продолжительностью. Более сложные реальные звуки всегда можно свести к совокупности простых, при этом характер зависимости неопределённости частоты сохраняется. Для простых звуков довольно легко можно оценить влияние длительности звука на восприятие высоты.

Общие положения показывают, что чем короче звук, тем с меньшей точностью мы можем оценить его высоту⁴. Количественный критерий, позволяющий выявить этот эффект, можно получить, используя преобразование Фурье для синусоидального сигнала. Его физический смысл состоит в том, что с помощью определённой процедуры мы преобразуем существующую зависимость амплитуды от времени в зависимость амплитуды от частоты. В отличие от разложения в ряд Фурье, которое даёт нам амплитудные значения частотных составляющих лишь в отдельных точках (как правило, выбираются значения кратных частот), преобразование Фурье содержит полную информацию о распределении энергии колебания по спектру и позволяет найти не только высоту, но и ширину каждого пика. Математические аспекты преобразований описаны в работе автора статьи [4]. Здесь же приведём только конечный результат. Очевидную зависимость полуширины пика отдельной гармоники (в герцах и в центах соответственно) от длительности сигнала и частоты демонстрирует формула:

$$\Delta\nu = k \frac{1}{T}$$

$$\Delta p = \frac{1200}{\ln 2} \ln \left(1 + \frac{\Delta\nu}{\nu} \right) = \frac{1200}{\ln 2} \ln \left(1 + \frac{k}{N} \right)$$

Здесь T – длительность звука, ν – частота, $N = T\nu$ – число полных периодов колебаний, k – коэффициент пропорциональности, физический смысл которого описан ниже.

Следующим приближением к анализу реальных звуков является учёт атаки, особенно актуальный для клавишных инструментов (клавесин, фортепиано), так как при взятии звука амплитуда колебаний струны довольно быстро достигает максимального значения, а затем резко убывает. Аналитически построить модель, отражающую процесс атаки довольно затруднительно, но в этом нет необходимости, так как для анализа требуется лишь среднее время, соответствующее выходу на периодические колебания. Для каждого конкретного инструмента это есть величина практически постоянная, и для фортепиано она составляет порядка 20–40 мс. Численный анализ показывает, что для качественного учёта влияния атаки

на восприятие высоты достаточно лишь вычесть из длительности всего звука длительность фазы атаки.

Необходимо заметить, что вышеприведённые рассуждения были получены при анализе простых синусоидальных сигналов. Однако на практике музыканты, как правило, работают со звуками, имеющими намного более сложный спектр. Как уже отмечалось, обобщение расчётов на случай реальных звуков качественно не меняет характер зависимости от параметров звука (частота, длительность), а согласие с экспериментальными данными достигается подбором феноменологического параметра – коэффициента k .

Человек определяет высоту звука не по частоте основного тона (что на первый взгляд кажется вполне очевидным), а по разности частот ближайших обертонов; при этом основная частота может вообще отсутствовать в спектре или быть значительно меньше по амплитуде своих обертонов. С одной стороны, это должно приводить к более точной идентификации коротких звуков, поскольку обертоны имеют более высокую частоту и, соответственно, меньшую центовую величину неопределённости. С другой стороны, высокие гармоники имеют больший параметр затухания, что приводит к дополнительному расширению, кроме того, при «вычислении» расстояния между обертонами наш мозг работает с примерно вдвое большей погрешностью. В среднем по ходу экспериментов со звуками фортепиано было установлено, что для хорошего согласия упрощённой оценки с собственными ощущениями феноменологический коэффициент пропорциональности k должен быть выбран в пределах 0,5 – 0,7. Чем меньше выбранный коэффициент, тем больше оказывается предполагаемая субъективная точность определения высоты.

Говоря о реальных звуках, нельзя оставить в стороне такой исполнительский приём, как вибрато. С точки зрения физики вибрато представляет собой некоторый процесс периодического изменения параметров колебаний: частоты, амплитуды, фазы. Эффекта вибрато можно достичь периодическим перемещением в пространстве самого музыкального инструмента либо периодическим изменением свойств окружающей среды, как это реализовано в вибраторе. Если говорить о влиянии вибрато на величину неопределённости частоты, то оказывается почти не принципиальным способ, которым достигается эффект. Обычно, если мы говорим о вибрато, то подразумевается, что длительность звука превышает период вибрато в несколько раз. Тогда в первом приближении можно считать, что вклад от вибрато в значение полуширины пика практически отсутствует. Вместо этого в спектре наблюдаются дополнительные пики, что, впрочем, никак не сказывается на высотной идентификации такого звука (см. рис. 2).

Если поместить в формулу (см. выше) частоты звуков среднего диапазона (от 100 до 1000 Гц) и характерные длительности порядка 1/4–1/8 секунды, то

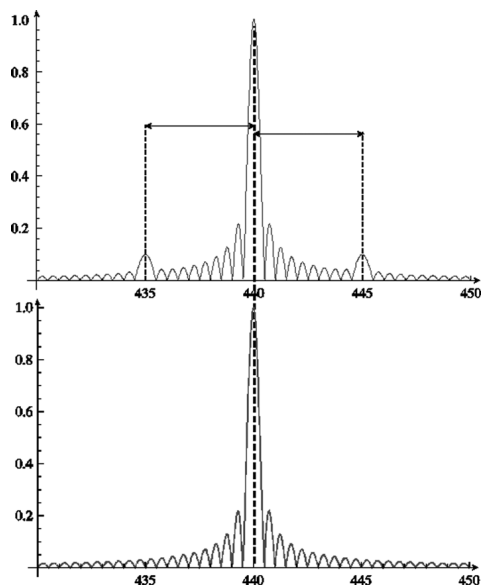


Рис. 2. Влияние вибрато на спектр синусоидального сигнала. Частота основного тона – 440 Гц, вибрато – 5 Гц

неопределённость частоты для звуков малой октавы может доходить до 25 центов, первой октавы – до 12, второй – в среднем около 5. При оценке погрешности восприятия интервалов эти цифры следует удваивать. В то же время разница между строями для отдельно взятого звука заведомо не превышает величин пифагоровой коммы (23,5 цента). Сопоставление величин показывает, что динамическая перестройка теряет смысл, если величина предполагаемого изменения меньше неопределённости частоты в конкретных условиях. Проверка выполнения данного условия существенно упрощает реализацию системы динамической настройки за счёт сокращения необходимых операций.

Выводы, полученные в результате анализа неопределённостей частоты, значительно превышают общеизвестные показатели. Возникает вопрос: почему так происходит, ведь опытные настройщики при желании могут зафиксировать разницу в 1–2 цента? Ответ довольно прост. Предельное отношение частот, различимое на слух при последовательном либо одновременном прослушивании составляет $1/9$ тона, то есть 11–12 центов (своего рода физиологическое ограничение). При уменьшении времени прослушивания эта величина может только возрасти. Но есть такое физическое явление – биения. При столь близких частотах наиболее заметное на слух биение (то есть, периодическая пульсация амплитуды звуковых колебаний) имеет частоту, по порядку величины равную разности двух частот. То есть, с помощью секундомера можно зафиксировать частоту биений и вычислить интервальное соотношение. Подобный способ (так называемый метод синхронизации) в настоящее время широко используется настройщиками фортепиано, его подробное описание содержится в книге А. В. Яновского [6]. Однако простая оценка показывает: чтобы зафиксировать биения частотой

порядка нескольких герц, необходимо прослушивать интервал минимум 3–4 секунды. Для реальной музыки – довольно значительная продолжительность звука. К тому же, наличие биений с низкой частотой никак не отражается на том, что сочетание звуков столь близкой высоты воспринимается как один звук.

Итак, изучив зависимость неопределённости воспринимаемой высоты звука от наиболее простых объективных свойств, можно значительно упростить алгоритм динамической настройки. Даже с учётом некоторой перестраховки, в реальных произведениях эффект от применения более чистых интервалов бывает замечен не так уж часто, особенно если речь идёт о произведениях с достаточно быстрой ритмической пульсацией. Строго говоря, для создания полной и исчерпывающей картины можно было бы учесть разную чувствительность слуха к *расстройке* разных интервалов (то есть разную допустимую ширину зоны, внутри которой интервал не теряет своей индивидуальности), а также принять во внимание несколько отличный механизм восприятия мелодических и гармонических интервалов. Но столь подробный анализ с точки зрения поставленных задач избыточен, поскольку вклад от описанных выше параметров в большинстве случаев является определяющим.

Рассмотрим стратегию функционирования системы динамической настройки применительно к произведениям различных эпох. Музыка эпохи барокко представляет собой благодатную почву для применения различных вариантов динамической настройки, но особенно актуальны такие попытки для музыки И. С. Баха, так как акустическая сложность его музыки значительно превышала технические возможности инструментов. Для произведений с хоральной фактурой наиболее удобно пользоваться следующим правилом: при гармоническом соединении аккордов звуки, остающиеся на месте, не перестраиваются, а при мелодическом соединении ориентиром выступает верхний голос, от которого затем вычисляются высоты всех остальных звуков с учётом их фактического времени звучания. То есть, перестройка происходит только в том случае, если звуки в аккорде имеют неопределённость частоты меньшую, чем величина предполагаемого изменения. В качестве грубой оценки можно использовать величину пифагоровой коммы – максимальное отличие между звуками чистого и равномерно темперированного строя не превышает этого значения. Полифоническая фактура требует несколько иной стратегии. Поскольку линейное мышление здесь выходит на первый план, то система динамической настройки должна в первую очередь поддерживать правильные интервальные соотношения в мелодической линии каждого голоса.

Динамическая настройка в произведениях классического периода (в первую очередь венских классиков) применяется по тем же принципам, что и в музыке барокко, с той разницей, что ясный тональный

план существенно упрощает алгоритм. Наиболее заметный эффект перестройка даёт в медленных частях фортепианных сонат. Но даже здесь общее число переключений оказывается невелико. Например, анализ второй части Сонаты Моцарта *C dur* (K.545) показал, что за первые 16 тактов необходимо лишь 4 переключения, в разработочном разделе это число увеличивается в среднем в два раза.

Целесообразность улучшения акустического качества созвучий в произведениях композиторов-романтиков вызывает довольно много вопросов, что связано с активным использованием модуляций в далекие тональности, в том числе и энгармонических. Сама по себе энгармоническая модуляция не является препятствием для успешной перестройки инструмента под новую тональность, но при этом будет утрачено ощущение модуляции композитором, в то время мыслящим уже категориями равномерно темперированного строя. Причём применительно к фортепианной музыке такое мышление не означало полного равноправия тональностей – асимметричная клавиатура приводит к тому, что тональности с большим числом знаков вынуждают исполнителя играть ближе к чёрным клавишам, что уменьшает плечо и несколько меняет тембр

инструмента. Однако данный эффект никак не связан собственно с настройкой.

Единственно целесообразным применением динамической настройки к музыке эпохи романтизма является изменение отдельных звуков для создания особых выразительных эффектов. В результате экспериментов с синтетическими тембрами было установлено интересное свойство – при выборочном применении модификации строя только от мелодической линии не возникает никаких негативных впечатлений. То есть, ничто не мешает оставить партию левой руки в равномерной темперации, а внутри мелодической линии модифицировать строй максимально близко к пифагорову, чем достигается особая выразительность каждой интонации. При этом даже в самом худшем случае расстройка унисонов (точнее, октав) не превышает значения пифагоровой коммы и не вызывает акустического дискомфорта. В качестве побочного положительного эффекта можно отметить субъективное ощущение весьма ясного разделения мелодии и аккомпанемента. Кроме того, можно поставить вопрос о целесообразности перестройки незвучащих клавиш верхнего регистра для получения обертоновой полифонии и других колористических эффектов.

ПРИМЕЧАНИЯ

¹ В 2006 году инструмент был восстановлен, теперь он находится в Научном музее Лондона.

² William Sethares, Stefan Tiedje, Andrew Milne, Anthony Prechtl. Информация размещена на сайте: <http://www.dynamictonality.com/index.htm>.

³ Формат данных MIDI предполагает хранение информации о длительности момента взятия/снятия звука, громкости

и некоторых других данных, но не самого звукового сигнала. При воспроизведении используются наборы заранее записанных звуков.

⁴ О невозможности определения на слух высоты слишком коротких звуков упоминается, например, в кн.: [2, с. 10].

ЛИТЕРАТУРА

1. Волконский А. М. Вопросы темперации. – М.: Композитор, 2003.
2. Гарбузов Н. А. Зонная природа звуковысотного слуха. – М.; Л.: Изд-во АН СССР, 1948.
3. Девуцкий В. Э. Акустическая платформа развитой хроматики в итальянском мадригале XVI века // Проблемы музыкальной науки. – 2010. – № 2 (7). – С. 32–38.
4. Князев М. Ю. Некоторые математические аспекты вопросов музыкального строя // Музыкальная академия. – 2011. – № 2. – С. 87–90.
5. Чесноков П. Г. Хор и управление им: пособие для хоровых дирижёров. – Изд. 3-е. – М.: Музгиз, 1961.

6. Яновский А. В. Настройка фортепиано в контексте истории и теории музыкального строя. От времени Пифагора до новейшего метода синхронизации. – М.: Композитор, 2010.
7. Code D. L. Groven.Max: An Adaptive Tuning System for MIDI Pianos // Computer Music Journal. – 2002. – Vol. 26. № 2. – P. 50–61.
8. Kaufmann H. W. Vicentino's Arciorgano; an annotated translation // Journal of music theory. – 1961. – № 5. – P. 32–53.
9. Sethares W. A. et al. Spectral Tools for Dynamic Tonality and Audio Morphing // Computer Music Journal. – 2009. – Vol. 33. – № 2. – P. 71–84.

Князев Михаил Юрьевич

аспирант кафедры теории музыки

Воронежской государственной академии искусств

