

4. Vetrov Ju. P., Igropulo I. F. Psihologo-pedagogičeskaja podgotovka prepodavatelej vuza k ispol'zovaniju metodov interaktivnogo obučeniya // Vysshee obrazovanie v Rossii. 2012. № 5. S. 89–96.
5. Knjazeva E. M. Laboratornye raboty novogo pokolenija // Fundamental'nye issledovaniya. 2012. Ch. 3. № 6. S. 587–590.
6. Morozov M. N., Tanakov A. I., Gerasimov A. V., Bystrov D. A., Cvirko V. E., Dorofeev M. V. Razrabotka virtual'noj himičeskoj laboratorii dlja škol'nogo obrazovaniya // Obrazovatel'nye tehnologii i obščestvo (Educational Technology & Society). 2004. T. 7. № 6. S. 155–164.
7. Oksenchuk V. V., Babintseva E. I., Dekunova N. A., Gavronskaja Ju. Ju. Sozdanie virtual'nyh laboratornyh rabot po himii // Novye obrazovatel'nye strategii v sovremennom informacionnom prostranstve: Sb. nauchnyh statej. SPb: Lema, 2014. S. 236–241
8. Noskova T. N. Vyzovy veka: pedagogika setевой sredy: Monografija. SPb.: Izd-vo RGPU im. A. I. Gercena, 2013. 112 s.
9. Truhin A. V. Vidy virtual'nyh komp'juternyh laboratorij // Otkrytoe i distantsionnoe obrazovanie. 2003. № 03. S. 12–20.

*И. Б. Горбунова, С. В. Чибирев*

### КОМПЬЮТЕРНОЕ МОДЕЛИРОВАНИЕ ПРОЦЕССА МУЗЫКАЛЬНОГО ТВОРЧЕСТВА

*Рассматривается способ применения математического моделирования к процессу создания музыкальных партитур в формате MIDI как к абстрактному тексту, основанный на анализе статистических параметров, с последующим моделированием процесса музыкального творчества на основе полученных данных.*

**Ключевые слова:** моделирование, идентификация, трудноформализуемые предметные области, музыкально-компьютерные технологии.

*I. Gorbunova, S. Chibirev*

### Computer Modeling of Musical Composition Process

*The article describes an attempt of mathematical modeling approach to analyzing MIDI-formatted musical fragments as an abstract text, based on calculating the statistical parameters and musical composition process modeling based on calculated parameters.*

**Keywords:** modeling, identification, hard-examining subject areas, music computer technologies.

Во второй половине XX — начале XXI в. появилось новое направление в музыкальном искусстве и в моделировании закономерностей музыкального творчества, обусловленное быстрым развитием электронных музыкальных инструментов (от простейших синтезаторов до мощных музыкальных компьютеров). Возникла новая междисциплинарная сфера профессиональной деятельности, связанная с созданием и применением специализированных музыкальных программно-аппаратных средств, требующая знаний и умений как в музыкальной сфере, так и в области информатики, — *музыкально-компьютерные технологии* (далее — МКТ) [3]. Это послужило действенной основой для построения модели музыкального творчества, позволяющей проводить анализ и синтез музыкальных текстов на основании статистических параметров фрагментов музыкальных произведений [1; 4; 10].

Во многих научных центрах мира ведутся исследования в области моделирования логических закономерностей музыки, цифрового синтеза, анализа и преобразования звуков на базе МКТ: University of Hertfordshire, The University of Salford, Access to Music Ltd., Bedford College в Великобритании; Institut fur Musik und Akustik (Zentrum fur Kunst und Medientechnologie) в Германии; СЕМАМу (Centre d'Etudes Mathematiques et Automatiques Musicales), Институт исследований и координации акустики и музыки (IRCAM) при Центре имени Ж. Помпиду во Франции; Центр музыкального эксперимента University of California; центры компьютерных исследований музыки и акустики (CCRMA) Stanford University, New York University, Full Sail University (Флорида) в США) и др.

Отметим также усиление интереса отечественных ученых к проблеме моделирования процесса музыкального творчества в последние годы (работы С. А. Филатова-Бекмана, А. С. Фадеева и др.), к музыкальному программированию [6; 8]. Отдельную группу исследований составляют практические разработки, среди которых выделим работы московской компании Widisoft, в частности, программу WIDI Recognition System, предназначенную для распознавания музыки с помощью компьютера и направленную на получение читаемой нотной записи в формате MIDI из музыкальной аудиозаписи формата mp3 и wave. Сегодня можно выделить два класса разработок в данной области: системы, сравнивающие аудиоотпечатки мелодии, и системы, работающие с объектным форматом мелодии, ориентированные, как правило, на широкого пользователя (например, TrackID, Sylvain Demongeot и др.). Данные системы либо существуют в виде специализированного программного обеспечения, либо могут быть интегрированы в сервисы сотовых операторов для различных мобильных устройств (подробнее это рассмотрено рассмотрено в работе [2]).

В предлагаемом подходе музыкальные фрагменты в формате MIDI (партитуры) рассматриваются как абстрактный текст. Основное внимание уделяется обработке и структуризации статистической информации, полученной при анализе текста стандартными методами. Исследования на данном этапе позволяют выделить большее количество закономерностей (по сравнению со стандартным подходом), сделать возможными моделирование и интерактивные эксперименты и в перспективе обеспечить возможность проведения семантического анализа. Такой инструмент исследования дает возможность получить конкретные результаты в следующих теоретических и практических областях:

- построение моделей звуковых последовательностей, удовлетворяющих заданным условиям;
- изучение особенностей восприятия звуковых сигналов как информационного потока; установление принадлежности различных звуковых фрагментов к определенным типам; установление авторства звуковых записей;
- восстановление утраченных фрагментов звуковых записей; имитации звуковых сигналов заданного характера и т. п.

#### **Предлагаемые методы исследования и подходы**

В качестве методов исследования в нашей работе используются статистический анализ, теория графов, целочисленные методы решения статистических задач. Компьютерная реализация разработанных алгоритмов проводилась на основе объектно-ориентированного подхода.

*Разработаны следующие новые подходы:*

1. Модель, состоящая из отдельных независимых блоков, отражающих закономерности звуковой последовательности, что позволяет изучать закономерности как независимо, так и в их связи друг с другом, рассматривать как внутренние связи конкретного блока модели, так и роль каждого блока в модели самостоятельно.

2. В модели не используются различного рода жесткие шаблоны, содержащие части готовых звуковых фрагментов.

3. Модель построена таким образом, что изменение параметров в процессе ее работы не вызывает ошибок в расчете и позволяет вносить изменения в процессе работы модели, что обеспечивает проведение экспериментов в интерактивном режиме.

Особо подчеркнем, что разработанный подход может быть использован для анализа других типов абстрактных трудноформализуемых текстов в различных предметных областях, например при исследовании биологических и социальных процессов.

Указанные особенности выделяют предлагаемую модель среди аналогов и обеспечивают ее преимущества как инструмента изучения закономерностей в звуковых записях по сравнению с существующими моделями. Предлагается метод поэтапного анализа потока звуковых событий, нацеленный на выявление закономерностей в анализируемом потоке:

- 1) определение анализируемых параметров и типа их значений;
- 2) определение области допустимых значений для всех параметров;
- 3) предварительный частотный анализ значений параметров;
- 4) поиск циклов/периодов;
- 5) вторичный частотный анализ с учетом периодов;
- 6) анализ корреляции частотности с периодами;
- 7) анализ матриц переходных коэффициентов;
- 8) семантический анализ внутри периодов.

Также в качестве одного из подходов используются способы формализации музыкальной нотации, в том числе соотнесение современных форм компьютерной нотации с общей математической теорией множеств и с математическими моделями, учитывающими вероятностно-статистические параметры музыкальной логики [2; 5; 7].

Музыкальный текст рассматривается как конечный набор звуков, характеризующихся положением на временной шкале (время возникновения, время звучания), высотой (основной частотой), громкостью (мощностью звукового давления) и тембром (частотно-временными характеристиками), определяемыми традицией. Таким образом, музыкальный фрагмент — это набор векторов вида:

$$A_i = (t_i, T_i, F_i, V_i, D_i(k, t)),$$

где  $t_i$  — время начала звука;  $T_i$  — продолжительность звука;  $F_i$  — основная частота звука;  $V_i$  — громкость;  $D_i(k, t)$  — спектр, набор  $k$  гармоник, являющихся функциями от времени  $t$ .

Выбор конкретных характеристик для каждого звука определяется творческой фантазией композитора/музыканта и традицией создания и исполнения произведений заданного вида в данной стране и эпохе. Таким образом, выбор этих характеристик определяется двумя факторами: стохастическим и детерминированным. Творческая фантазия представляет собой стохастическую величину, в настоящий момент не формализованную и описываемую последовательностью случайных чисел. (Существует также возможность использования в этом качестве живого композитора.) Традиции целиком определяют форму произведения, рамки допустимых и предпочтительных (т. е. вероятных) значений.

При изучении стохастической составляющей в ней можно заметить вероятностные закономерности, которые сразу же переводят полученный закон в разряд вероятностно-детерминированного, в результате роль недетерминированных факторов сильно снижается и позволяет целиком сосредоточиться на изучении традиционных закономерностей.

Таким образом, задача моделирования состоит в описании наибольшего числа закономерностей, определяемых различными традициями, налагаемыми на случайную последовательность, чтобы «отфильтровать» из нее музыкальный текст.

*Исполнение.* Для того чтобы сократить границы модели, выделим те характеристики звуков, которые зависят от исполнения и исключим их из рассмотрения. В характеристики, определяющие исполнение, будем включать:

- *тембр* — индивидуальный тембр инструмента, определяемый конструктивными особенностями инструмента, индивидуальными особенностями звукоизвлечения, присущими музыканту, артикуляцией, указанной в партитуре;

- *громкость*, определяемую конструктивными особенностями инструмента и условий прослушивания, желаемую громкость инструмента, устанавливаемую при прослушивании, подачу и артикуляцию, указанную в партитуре.

Выделенные закономерности исполнения достаточно сложны и подлежат отдельному изучению. В нашей работе не рассматривается их анализ, однако реализованы минимальные возможности синтеза. При моделировании синтеза достаточно ограничиться возможностями существующих синтезаторов, позволяющих воспроизводить звук различных музыкальных инструментов с каким-либо фиксированным тембром и громкостью.

*Ритм и звуковысотность (основные параметры).* Для первоначальных экспериментов введем ограничение в рассматриваемую модель, которое позволит нам исключить еще одну характеристику — продолжительность звука. Звук большей части инструментов имеет короткое время нарастания и длительное время затухания; таким образом, наибольшее значение имеет время начала звука по сравнению со временем его окончания. Будем считать время окончания звука совпадающим с моментом начала последующего. Длительностью звука будем считать временной интервал между временем начала звука и временем начала последующего звука. Данное допущение существенно для инструментов, имеющих непрерывный звук, однако такие инструменты в абсолютном большинстве являются однопольными (т. е. не могут издавать одновременно несколько звуков); следовательно, для них смещения предыдущего и последующего звука также не происходит.

Таким образом, после ряда упрощений, музыкальный фрагмент будет представлять собой набор векторов вида

$$A=(t_i, F_i),$$

где  $t_i$  — время начала звука;  $F_i$  — основная частота звука (высота тона).

Нотная запись в таком виде и будет представлять объект анализа/синтеза модели. Кроме того, можно попытаться анализировать оба параметра отдельно, т. е. рассматривать отдельно набор значений времен ( $t_i$ ) и набор значений тона ( $F_i$ ). Набор ( $t_i$ ) будем называть ритмом, а набор ( $F_i$ ) — звуковысотностью.

*Дискретизация длительностей.* Для описания значений времен возникновения звуков достаточно выбрать систему временных координат, т. е. начало отсчета и минимальный квант отсчета (обычно составляет 0,2 с). Поскольку во всех известных музыкальных традициях длительности кратны друг другу, удобно за минимальный квант измерения принять минимальную длительность элементарного звука внутри музыкального фрагмента или класса музыкальных произведений (обозначаемого нотой). Например, музыкальную длительность «1/64».

Тогда подавляющее большинство длительностей может быть описано формулой

$$D = C / 2^n,$$

где  $C$  — длительность целой ноты;  $n$  — натуральное число диапазона [1...6]. Проблема продолжения длительности на следующую долю такта (простейший пример — «нота с точкой»); также в разделе «Фразировка и лад») решается путем присоединения необходимой добавочной длительности (длительностей) из этого же ряда, сливающейся с основной в процессе звучания. При анализе существующей музыки проводится обратный процесс выделения добавочной длительности. За начало отсчета логично принимается начало музыкального фрагмента.

*Дискретизация тона. Хроматическая гамма.* Представим звук функцией мгновенной амплитуды от времени. Если исходить из математических законов, то становится ясно, что любая функция может быть представлена ее спектром, т. е. бесконечной суммой гармонических колебаний с частотами  $F, 2F, 3F, 4F, \dots$  называемыми *гармониками*:

$$f(t) = A_0 \sin(F) + A_1 \sin(2F) + A_2 \sin(3F) + A_3 \sin(4F) + \dots$$

Частота  $F$  является *основной частотой*. При этом наибольшее значение имеют гармоники с 4-й по 7-ю, соотношения которых близки к соотношениям тонов традиционной аккордики. При физическом описании движения колеблющегося тела (например, струны) можно также заметить роль колебаний его половины, трети, четверти и т. д. Частоты таких колебаний также будут являться кратными целым долям от основной частоты колеблющегося тела, таким образом, ту же картину можно получить, исходя из физических законов.

В основе большинства музыкальных традиций лежат тоны, частоты которых кратны друг другу или относятся как целые числа. В спектрах таких колебаний некоторые младшие гармоники будут совпадать по частоте, в то время как другие — различаться. При восприятии совпадающие гармоники вызывают ощущение гармонии (консонанса), несовпадающие — ощущение диссонанса. На сочетании этих явлений и построена основная часть традиционных ладовых систем. Однако различные традиции по-разному производят построение ладов и используют не все возможные интервалы и даже различное их число. В наших работах [1; 2; 6 и др.] подробно проанализированы европейские натуральные лады. Интервал между квартой ( $4/3$ ) и квинтой ( $3/2$ ) исторически стал единицей измерения и получил название *Тон*. Его половину называли *Полутоном*. Если разделить октаву на полутоны (логарифмически), то их уложится примерно 12, и целочисленные интервалы натурального звукоряда в пределах 4, 5 октав будут очень близко совпадать с получившимися частотами.

За гаммой из 12 звуков, разделенных полутонами, в Новое время утвердилось название *хроматической*. Для задания параметра звука «высота», мы должны указать одно из дискретных значений хроматической гаммы:

$$F = C 2^{(n/12)},$$

где  $C$  — константа определяющая начало звукоряда, заданная согласно той или иной традиции. Параметр  $n$  будем называть *ступенью хроматической гаммы*. В рассматриваемой модели диапазон высот ограничен тремя октавами, поэтому параметр  $n$  принимает натуральные значения в интервале [1...36].

*Лад.* Если рассмотреть диаграммы частотности употребления различной высоты тона в некоторых музыкальных произведениях, можно обнаружить, что некоторые интервалы используются часто, другие же не используются совсем. Основная причина этого явления — в использовании конкретного традиционного звукоряда, в основе которого в той или иной степени лежат целые отношения между частотами. В различных культурах используют

различный состав и число музыкальных интервалов. Таким образом, возможны случаи, когда все звуки выбранного музыкального фрагмента будут соответствовать (с высокой точностью) некоторым ступеням хроматического звукоряда, но не все ступени хроматического звукоряда будут использованы. Это видно из того, что во многих проявлениях европейской традиции используются звукоряды, имеющие всего семь ступеней. Кроме того, в различных традициях указывается роль ступеней гаммы в музыкальном фрагменте: например, некоторые ступени имеют тенденцию использоваться в окончаниях музыкальных фраз (завершающий тон, полукадансовые звуки и т. п.), другие, согласно традиции, объявляются «неустойчивыми», и после них всегда следуют «устойчивые» и т. д. Рассмотрим роли ступеней ниже, при обсуждении структуры музыкальных фраз. Здесь же для определения лада ограничимся заданием используемых и неиспользуемых ступеней хроматического звукоряда.

Для описания высоты звука в музыкальном фрагменте достаточно задать число  $n_T$  в диапазоне  $[1...k]$ , обозначающее номер ступени традиционной гаммы (в пределах европейской музыкальной традиции). Здесь  $k$  называется размерностью традиционной гаммы и принимает значения меньше или равные 12 (часто 7 или даже 5). Для получения значения частоты звука надо сначала произвести преобразование  $n_m \rightarrow n$ , а затем  $n \rightarrow F$  по формуле из предыдущего раздела.

Преобразование  $n_T \rightarrow n$  запишем в виде одномерной матрицы (вектора), содержащей  $k$  значений в диапазоне  $[1...12]$ , и константы, определяющей тонику, т. е. высоту первой ступени.  $n = M_L(n_m) + C_L$ , где  $M_L$  — матрица преобразования, однозначно определяющая традиционный лад;  $C_L$  — тоника — первая нота традиционного звукоряда.

Согласно музыкальной терминологии,  $M_L$  определяет лад, а  $M_L$  вместе с  $C_L$  — тональность произведения.

*Интервалы.* Применив преобразование  $M_L$  к музыкальному отрывку и вновь проведя статистический анализ использования высот тона, можно снова заметить неравномерность использования различных высот звука. Здесь действует вторичная причина неравномерности. Объясняется она, скорее всего, особенностями традиций, характерными особенностями творческой личности автора и конкретным художественным замыслом. Для описания неравномерности использования ступеней традиционных гамм воспользуемся марковскими сетями. Пространством вершин является набор значений  $[1...k]$ , т. е. его размерность будет совпадать с размерностью традиционной гаммы. Для описания частотности использования ступеней в зависимости от предыдущей ступени воспользуемся матрицей переходных вероятностей между ступенями традиционного лада:

$$n_m = M_p(n_{m \text{ prev}}),$$

где  $n_m$  — номер ступени последующего звука;  $n_{m \text{ prev}}$  — номер ступени предыдущего звука;  $M_p$  — матрица переходных вероятностей. Согласно с номером ступени предыдущего звука выбирается номер строки матрицы. Строка матрицы представляет собой значения дискретной функции распределения вероятности. Сумма значений по строке равна 1. Значение в столбце говорит о величине вероятности выбора последующего значения с номером, равным номеру данного столбца. Согласно заданному вероятностному закону, происходит выбор последующего значения.

*Ритм.* Поскольку длительности являются дискретными и описываются законом  $D = C/2^n$ , для задания длительности необходимо определить лишь число  $n$ , лежащее в диапазоне  $[1...6]$  (как это было определено ранее). При анализе существующего музыкаль-

ного отрывка следует определить вероятность возникновения всех возможных длительностей из данного набора. В результате характеристикой ритма будет вектор вероятностей.

При создании музыкального фрагмента надо сгенерировать случайное число в диапазоне [1...6] согласно заданным вероятностям, а затем вычислить длительность по описанной выше формуле.

Однако этого недостаточно. Традициями разных культур устанавливаются различные периоды возможной повторяемости ритма: фразы, музыкальные предложения, такты. В европейской музыкальной традиции Нового и частично Новейшего времени минимальным периодом в этом отношении является *такт*. Будем считать, что такт не всегда означает обязательное повторение ритма, однако является минимальным ритмическим построением, которое должно иметь начало и окончание. Для первых опытов примем, что все такты музыкального отрывка имеют одинаковую продолжительность. Следовательно, сумма длительностей внутри всех тактов должна иметь одинаковое значение. Для обеспечения работы данного ограничения воспользуемся следующим простейшим алгоритмом:

- 1) Обнулить значение аккумулятора.
- 2) Сгенерировать случайное число диапазона [1...6] согласно дискретной функции распределения вероятности.
- 3) По формуле  $D = C / (2^n)$  определить длительность временного интервала.
- 4) Если значение аккумулятора + значение длительности  $D$  больше заданного размера такта, увеличить  $n$  на 1 (т. е. сократить длительность вдвое) и перейти к п. 3.
- 5) Добавить значение длительности к значению аккумулятора.
- 6) Если значение аккумулятора равно заданному размеру такта — задача завершена, иначе — перейти к п. 2

В музыкальной практике могут присутствовать и другие повторяющиеся временные структуры, в том числе размер которых меньше размера такта и которые тоже играют определенную роль в рамках некоторых традиций. Для их учета спроектирован специальный эвристический алгоритм, который будет рассмотрен отдельно.

*Фразировка.* Для музыкальных произведений в любой традиции характерна повторяемость (или частичная повторяемость) отдельных частей, по времени превышающих такт, которые составляют структуру фрагмента. Будем называть эти части *музыкальными фразами*. Будем считать, что музыкальный фрагмент состоит из некоторого количества музыкальных фраз с заданными длинами:

$$\{ A(1, 1..i1), A(2, 1..i2), A(3, 1..i3), \dots, A(J, i - Ij) \},$$

где  $J$  — количество музыкальных фраз;  $Ij$  — длина  $j$ -й музыкальной фразы.

Очевидно, что существует множество зависимостей, привязанных к моментам начал и окончаний музыкальных фраз, а также связанных с корреляцией фраз между собой. При создании модели необходимо учесть все замеченные зависимости.

*Фразировка и лад.* Как уже упоминалось, ступени традиционного лада выполняют различную функцию, в частности, определенные ступени могут преимущественно использоваться в определенных местах произведения, фрагмента, такта. Преимущество использования может быть задано высоким значением вероятности в матрице переходных вероятностей. Однако в этом случае эта вероятность будет высокой в любой части музыкального фрагмента. Отсюда следует, что эти вероятности должны быть различны в различных местах музыкального фрагмента, фразы, такта. Для учета этой закономерности логично ввести несколько различных матриц  $M_p$  для различных случаев, возникновение которых полностью определяется структурой музыкальных фраз и тактов.

Итак, в процессе создания музыкального отрывка перед выбором очередного значения ступени сначала необходимо определить характеристику места в музыкальном фрагменте, после чего выбрать соответствующую матрицу переходных вероятностей. Характеристики случаев могут иметь следующий вид:

- основная матрица (используется по умолчанию);
- вторая сильная доля такта;
- сильная доля такта;
- конец музыкальной фразы;
- конец музыкального фрагмента.

Поскольку случаи перечислены по степени «устойчивости», имеется возможность использования матриц для соседних в списке случаев вместо непосредственно вычисленных.

*Фразировка и корреляция музыкальных фраз.* В любых традициях для музыкальных фраз характерна повторяемость. В данной модели корреляция музыкальных фраз описывается вероятностными законами. Поскольку, войдя в состояние повторения, система остается в этом состоянии некоторое время, удобно описать группу законов корреляции в виде пространства состояний с вероятностными переходами между ними. Для каждого состояния введем вероятности перехода во все остальные состояния. Это снова удобно сделать в виде матрицы переходных вероятностей между состояниями. Будем называть эти состояния *микростильями*.

$$s = M_s(s_{prev}),$$

где  $s$  — последующий микростиль;  $s_{prev}$  — предыдущий микростиль;  $M_s$  — матрица переходных вероятностей между стилями.

Эта формула показывает, как переключается микростиль, т. е. какой микростиль будет выбран последующим. Для того чтобы определить, в какой момент следует переключить микростиль, т. е. каково время пребывания в заданном состоянии или какова вероятность выхода из него, введем вектор вероятностей выхода из состояния  $M_{out}$ . Проверка возможности выхода из состояния может осуществляться после генерации каждого звука или на границах тактов. На границах музыкальных фраз смена микростиля осуществляется с большей вероятностью, поскольку новая музыкальная фраза должна иметь по возможности отличный от предыдущей характер. Для этого можно ввести отдельный вектор вероятностей или просто всегда осуществлять смену микростилей на концах фраз.

Будем полагать, что для каждого микростиля характерна своя зависимость и степень корреляции музыкальных фраз, т. е. свой *алгоритм корреляции*. Алгоритмы корреляции могут быть различными, и число их может быть расширяемо в процессе работы над моделью. Создание новой мелодии/ритма, согласно описанным выше алгоритмам, является частным (но наиболее часто используемым) случаем. Повторение может быть как полным, так и частичным, например, повторение ритмического рисунка (т. е. точная копия длительности при других значениях высоты тона) или мелодическое (т. е. точное соблюдение такой же высоты тона, но на основе другого ритмического рисунка). Таким образом, можно разделить микростили для временных характеристик звука (т. е. ритма) и микростили корреляции для звуковысотности и рассматривать их отдельно.

Перечислим некоторые из возможных микростилей для звуковысотности: создание новой мелодии согласно алгоритмам зависимостей звуковысотности; копирование мелодии из указанной в параметре фразы; копирование мелодии от начала данной фразы; создание



новой мелодии, применение правила преобразования ступеней к другому инструменту оркестра; использование альтернативных матриц звуковысотностей для разных микростилей.

Микростили для ритмического состояния построения фразы: создание нового ритма согласно вероятностным параметрам; копирование ритма (т. е. всех значений длительностей) из указанной в параметре фразы; копирование ритма (т. е. всех значений длительностей) от начала данной фразы; умножение ритма (т. е. удвоение длительностей) указанного инструмента оркестра; деление ритма (т. е. уменьшение длительностей) указанного инструмента оркестра; использование альтернативных вероятностных параметров для разных микростилей.

Отметим, что анализ корреляции музыкальных фраз — это достаточно сложная задача, и в настоящее время происходит лишь поиск путей ее решения.

Разработанный инструмент исследования позволяет получить результаты в следующих музыкально-теоретических и практических областях: создание новых музыкальных произведений с заданными характеристиками звучания, удовлетворяющих замыслу композитора; изучение особенностей восприятия звуковых сигналов и музыкальных произведений в целом как информационных потоков; установление принадлежности музыкальных фрагментов к определенным типам; установление авторства музыкальных произведений; восстановление утраченных фрагментов музыкальных произведений; создание звуковых фрагментов заданного характера.

Отметим, что в настоящий момент, с одной стороны, возникла необходимость в подготовке музыкантов, разбирающихся в современных МКТ и информационных технологиях в музыке; с другой — специалистов технического профиля, имеющих основы общего музыкального образования и владеющих знаниями в области программирования звука, звуко-синтеза, аудиоинжиниринга, звукотембрального программирования, моделирования музыкально-творческих процессов и профессионально владеющих технологиями студийной звукозаписи, специализированным программным обеспечением; специалистов, способных заниматься моделированием как одним из перспективных методов объективного исследования музыкального творчества.

#### **Список литературы**

1. Горбунова И. Б. Информационные технологии в музыке. Т. 1: Архитектоника музыкального звука: Учебное пособие. СПб.: Изд-во РГПУ им. А. И. Герцена, 2009. 175 с.
2. Горбунова И. Б. Информационные технологии в музыке. Т. 3: Музыкальный компьютер: Учебное пособие. СПб.: Изд-во РГПУ им. А. И. Герцена, 2011. 412 с.
3. Горбунова И. Б. Феномен музыкально-компьютерных технологий как новая образовательная творческая среда // Известия РГПУ им. А. И. Герцена: Научный журнал. 2004. № 4 (9). С. 123–138.
4. Горбунова И. Б., Заливадный М. С. Информационные технологии в музыке. Т. 4: Музыка, математика, информатика: Учебное пособие. СПб.: Изд-во РГПУ им. А. И. Герцена, 2013. 190 с.
5. Горбунова И. Б., Заливадный М. С. Опыт математического представления музыкально-логических закономерностей в книге Я. Ксенакиса «Формализованная музыка» // Общество — Среда — Развитие: Научно-теоретический журнал. 2012. № 4(25). С. 135–139.
6. Горбунова И. Б., Заливадный М. С., Кибиткина Э. В. Основы музыкального программирования: Учебное пособие. СПб.: Изд-во РГПУ им. А. И. Герцена, 2012. 195 с.
7. Горбунова И. Б., Заливадный М. С. О математических методах в исследовании музыки и подготовке музыкантов // Проблемы музыкальной науки. 2014. № 1(12). С. 272–276.
8. Горбунова И. Б., Кибиткина Э. В. Музыкальное программирование: вопросы подготовки специалистов // Искусство и образование. 2010. № 5 (67). С. 104–111.

9. Горбунова И. Б., Романенко Л. Ю., Родионов П. Д. Музыкально-компьютерные технологии в формировании информационной компетентности современного музыканта // Научно-технические ведомости Санкт-Петербургского государственного политехнического университета. 2013. № 1 (167). С. 39–48.

10. Горбунова И. Б., Чибирев С. В. Музыкально-компьютерные технологии: к проблеме моделирования процесса музыкального творчества: Монография. СПб.: Изд-во РГПУ им. А. И. Герцена, 2012. 160 с.

#### REFERENCES

1. Gorbunova I. B. Informatsionnye tehnologii v muzyke. T. 1: Arhitektonika muzykal'nogo zvuka: Uchebnoe posobie. SPb.: Izd-vo RGPU im. A. I. Gertsena, 2009. 175 s.

2. Gorbunova I. B. Informatsionnye tehnologii v muzyke. T. 3: Muzykal'nyj komp'juter: Uchebnoe posobie. SPb.: Izd-vo RGPU im. A. I. Gertsena, 2011. 412 s.

3. Gorbunova I. B. Fenomen muzykal'no-komp'juternyh tehnologij kak novaja obrazovatel'naja tvorcheskaja sreda // Izvestija RGPU im. A. I. Gertsena: Nauchnyj zhurnal. 2004. № 4 (9). S. 123–138.

4. Gorbunova I. B., Zalivadnyj M. S. Informatsionnye tehnologii v muzyke. T. 4: Muzyka, matematika, informatika: Uchebnoe posobie. SPb.: Izd-vo RGPU im. A. I. Gertsena, 2013. 190 s.

5. Gorbunova I. B., Zalivadnyj M. S. Opyt matematicheskogo predstavlenija muzykal'no-logicheskikh zakonernostej v knige Ja. Ksenakisa «Formalizovannaja muzyka» // Obschestvo — Sreda — Razvitie: Nauchno-teoreticheskij zhurnal. 2012. № 4(25). S. 135–139.

6. Gorbunova I. B., Zalivadnyj M. S., Kibitkina E. V. Osnovy muzykal'nogo programmirovaniya: Uchebnoe posobie. SPb.: Izd-vo RGPU im. A. I. Gertsena, 2012. 195 s.

7. Gorbunova I. B., Zalivadnyj M. S. O matematicheskikh metodah v issledovanii muzyki i podgotovke muzykantov // Problemy muzykal'noj nauki. 2014. № 1(12). S. 272–276.

8. Gorbunova I. B., Kibitkina Je. V. Muzykal'noe programmirovanie: voprosy podgotovki specialistov // Iskusstvo i obrazovanie. 2010. № 5 (67). S. 104–111.

9. Gorbunova I. B., Romanenko L. Ju., Rodionov P. D. Muzykal'no-komp'juternye tehnologii v formirovanii informatsionnoj kompetentnosti sovremennogo muzykanta // Nauchno-tehnicheskie vedomosti Sankt-Peterburgskogo gosudarstvennogo politehnicheskogo universiteta. 2013/ № 1 (167). S. 39–48.

10. Gorbunova I. B., Chibirjov S. V. Muzykal'no-komp'juternye tehnologii: k probleme modelirovaniya protsesssa muzykal'nogo tvorchestva: Monografija. SPb.: Izd-vo RGPU im. A. I. Gertsena, 2012. 160 s.

*А. А. Денисевич, А. В. Ляцев*

#### КОМПЬЮТЕРНОЕ МОДЕЛИРОВАНИЕ ПРОЦЕССОВ САМООРГАНИЗАЦИИ В ПРОСТЕЙШИХ МЕХАНИЧЕСКИХ СИСТЕМАХ

*Рассмотрена компьютерная модель, иллюстрирующая образование пространственных структур на траектории движения частицы в бильярде. Приводятся результаты численных расчетов, а также анализ возможных аттракторов в зависимости от параметров модели.*

**Ключевые слова:** процессы самоорганизации, математическая модель, пространственные структуры, компьютерное моделирование.