

УДК 004.4'277

## МЕТОД ОПРЕДЕЛЕНИЯ ТЕМПА МУЗЫКАЛЬНОЙ КОМПОЗИЦИИ

Курьян А.В., Деменковец Д.В.

Белорусский государственный университет информатики и радиоэлектроники  
г. Минск, Республика Беларусь

Парамонов А.И. – канд. тех. наук

**Аннотация.** Рассматривается метод определения значения BPM музыкальных композиций с использованием алгоритма дискретного преобразования Фурье и анализа корреляции полученного частотного спектра со спектром реальных нот, воспроизводимых на музыкальных инструментах.

**Ключевые слова.** BPM, дискретное преобразование Фурье, частотно-временной анализ.

Удары в минуту (*Beats per minute, BPM*) в музыке – это показатель, определяющий скорость исполнения или воспроизведения композиции [1]. Для большинства произведений он лежит в диапазоне от 30 до 240. Существует соответствие между диапазонами значений данного показателя и традиционными обозначениями темпа, используемыми музыкантами, такими как граве, лярго, анданте, модерато и т. д.

Большинство имеющихся на данный момент методов определения BPM используют анализ графика зависимости энергии сигнала от времени для нахождения тем или иным способом пиков энергии, принимаемых за единичные биты. Однако потенциально существует возможность добиться большей точности, если принимать во внимание понятие BPM с точки зрения нотной записи.

Как известно, в музыке ноты классифицируются по их относительной длительности на целые, половинные, четвертные и т.д. Значение BPM есть ни что иное как количество четвертных долей нот в одной минуте. Таким образом, для точного аналитического нахождения параметра достаточно иметь нотное представление композиции и соответствие хотя бы одной относительной длительности ее абсолютной длительности в секундах.

В частотном спектре каждой ноте соответствует одна основная или фундаментальная частота, а также несколько обертонов, количество, амплитуда и смещение которых по частоте во многом зависят от музыкального инструмента. Однако в общем случае частоты всех обертонов примерно кратны частоте основного тона [2], что позволяет с некоторой точностью смоделировать частотный спектр для любой из 12 нот в выбранной октаве. После чего поточечное произведение каждого из смоделированных спектров со спектром, полученным в результате разбора композиции, позволит оценить вероятность наличия тех или иных нот в анализируемом интервале времени.

Для разложения исходного сигнала на спектр частот используется алгоритм оконного дискретного преобразования Фурье (ДПФ). Данный алгоритм позволяет представить сигнал на заданном интервале в виде суммы синусоидальных составляющих вида (1).

$$f(x) = A * \cos(2\pi f_0 x + \varphi_0), \quad (1)$$

где  $A$  - амплитуда;  $f_0$  - частота;  $\varphi_0$  - начальная фаза.

В отличие от обычного дискретного преобразования Фурье, оконное ДПФ вычисляется из произведения исходного сигнала на ограниченном интервале и некоторой оконной функции, предназначенной для уменьшения эффекта растекания ДПФ [9]. В зависимости от конкретной задачи могут использоваться разные виды оконных функций, улучшающие значения одних параметров и ухудшающие значения других, менее существенных в данной задаче.

Однако главной проблемой ДПФ является принцип неопределенности Гейзенберга, в основе которого лежит тот факт, что невозможно точно определить, какая частота присутствует в сигнале в данный момент времени (можно говорить только про диапазон частот), и невозможно определить, в какой точно момент времени частота присутствует в сигнале (можно говорить лишь про период времени) [3]. В связи с этим возникает проблема разрешающей способности.

Поскольку для определения BPM необходимо как высокое разрешение по частоте (для определения наличия тех или иных нот), так и высокое разрешение по времени (для определения абсолютной длительности нот), то в данном методе используется разложение сигнала на частотном спектре в 2 этапа.

На первом этапе осуществляется оконное преобразование Фурье с широким окном, обеспечивающим высокое разрешение по частоте, но низкое по времени. На втором этапе производится ДПФ с узким окном, обеспечивающим высокое разрешение по времени, но низкое по частоте. После чего спектр, полученный преобразованием с окном меньшего размера, состоящий из меньшего количества отсчетов, аппроксимируется многочленом Лагранжа до размерности спектра, полученного ДПФ с окном большего размера. В конце вычисляется поточечное произведение двух

спектров с целью получения максимальных значений в тех точках, где максимальную амплитуду имеют как спектр с большим разрешением по частоте, так и спектр с большим разрешением по времени. Результат вычисления произведения принимается за итоговый спектр, который затем анализируется на возможность наличия тех или иных нот.

В качестве результата предыдущих двух этапов имеется некоторое приближение нотной записи в виде расположения нот разных частот на временной шкале. Однако имея только абсолютную длительность нот, невозможно однозначно определить их относительную длительность, т. к. одной и той же длительности в секундах при разных значениях BPM могут соответствовать несколько относительных длительностей. К счастью, имеются исследования [4], в которых делается попытка вывести среднее процентное соотношение относительных длительностей нот в музыкальных композициях.

Имея это соотношение, можно последовательно сопоставлять абсолютные длительности нот, полученные в результате предыдущих этапов метода, к относительным длительностям, для которых имеются процентные соотношения. На каждом шаге минимальной имеющейся относительной длительности сопоставляется очередное в порядке возрастания абсолютное значение в секундах. Абсолютные длительности, соответствующие последующим относительным длительностям, получаются путем умножения минимальной абсолютной длительности на степень числа 2. При этом ноты с абсолютными длительностями, значения которых оказались в интервале между двумя полученными эталонными значениями, включаются в число нот с относительной длительностью, соответствующей ближайшему абсолютному значению. Затем рассчитываются процентные соотношения количества нот всех имеющихся относительных длительностей к общему количеству нот и оцениваются отклонения полученных значений от средних значений, имеющих в исследовании [4]. Значение абсолютной длительности четвертной ноты на том шаге, где было получено минимальное отклонение, принимается за итоговое, после чего искомое значение BPM вычисляется по формуле:

$$\frac{60 * \text{sampleRate}}{\text{duration} * \text{windowSize}} \quad (2)$$

где *duration* - длительность четвертной ноты, выраженная в окнах дискретного преобразования Фурье; *windowSize* - размер окна ДПФ в отсчетах сигнала; *sampleRate* - частота дискретизации исходного сигнала.

Для тестирования эффективности метода были созданы две выборки, соответствующие двум видам композиций: исполняемым полностью на фортепиано и сгенерированным синтезатором нескольких музыкальных инструментов. В обоих случаях выборка была получена путем выделения звуковой дорожки из видеозаписей, размещенных в открытом доступе на видеохостинге YouTube. Для получения эталонных значений BPM каждая видеозапись была вручную проанализирована с целью точного измерения длительностей четвертных долей нот. С этой целью видеозаписи специально были подобраны таким образом, чтобы начало и конец каждой ноты можно было визуально определить либо по клавиатуре фортепиано, либо по отрезкам, соответствующим нотам в графическом окне синтезатора.

В качестве ближайших аналогов для сравнения были выбраны онлайн-сервисы GetSongbpm [5], Tunebat [6] и Vocalremover [7], а также подключаемая библиотека для языка программирования Scala - scala-audio-file [8]. Результаты сравнительного анализа данных аналогов с рассматриваемым методом представлены на рисунках 1 и 2.

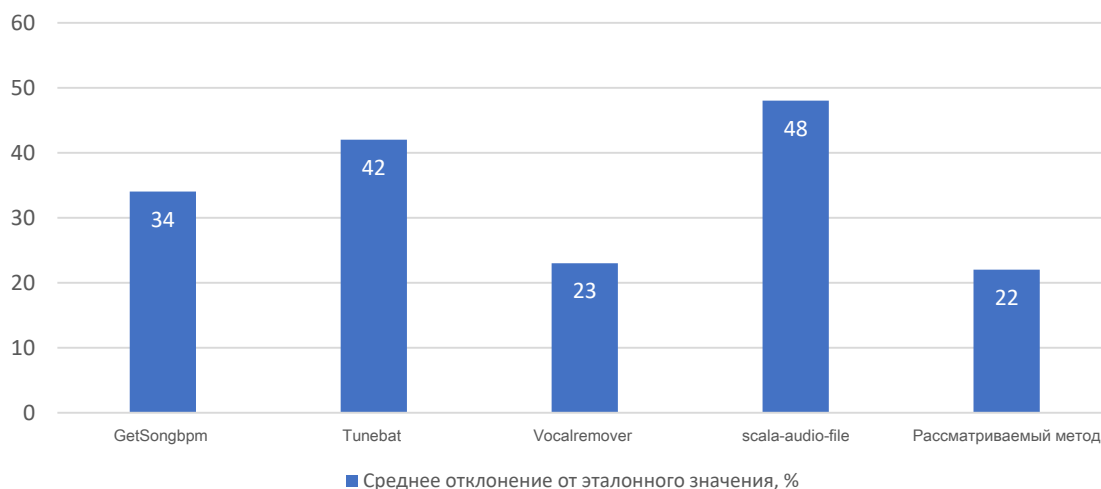


Рисунок 1 – Сравнительные результаты, полученные в результате тестирования рассматриваемого метода и аналогов на выборке из 10 композиций, исполняемых на фортепиано

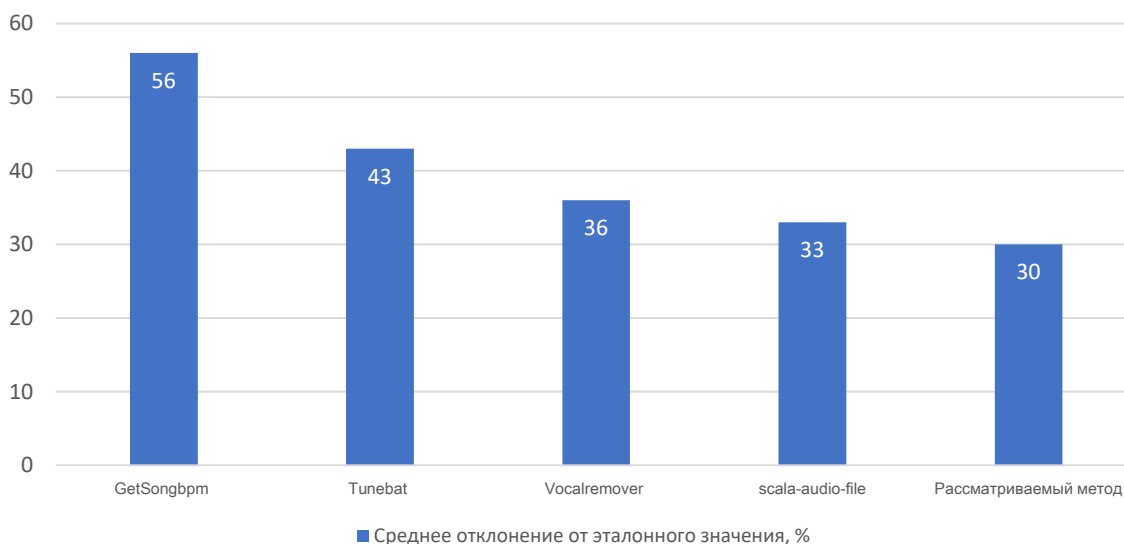


Рисунок 2 – Сравнительные результаты, полученные в результате тестирования рассматриваемого метода и аналогов на выборке из 10 композиций, сгенерированных синтезатором нескольких музыкальных инструментов

На основе полученного сравнения можно сделать вывод, что рассматриваемый метод обеспечивает большую по сравнению с аналогами точность для композиций, включающих партию фортепиано или полностью состоящих из таковой, и сравнимую с аналогами точность для других композиций.

**Список использованных источников:**

1. *Beats per minute, The Free Dictionary by Farlex [Электронные данные]* - Режим доступа: <https://www.thefreedictionary.com/beats+per+minute>. - Дата доступа: 01.04.2021..
2. *Цифровые Синтезаторы Музыкальных Звуков, Audio Electronics [Электронные данные]* - Режим доступа: [https://astersart.net/desktop/synthesators/syntz\\_ms.htm](https://astersart.net/desktop/synthesators/syntz_ms.htm). - Дата доступа: 01.04.2021.
3. *Непрерывное wavelet преобразование, Хабр [Электронные данные]* - Режим доступа: <https://habr.com/ru/post/103899/>. - Дата доступа: 01.04.2021.
4. *Computer Generation and Perception Evaluation of Music-Emotion Associations, ResearchGate [Электронные данные]* - Режим доступа: [https://www.researchgate.net/publication/342081971\\_Computer\\_Generation\\_and\\_Perception\\_Evaluation\\_of\\_Music-Emotion\\_Associations](https://www.researchgate.net/publication/342081971_Computer_Generation_and_Perception_Evaluation_of_Music-Emotion_Associations). - Дата доступа: 01.04.2021.
5. *GetSongbpm [Электронный ресурс]* - Режим доступа: <https://getsongbpm.com/tools/audio>. - Дата доступа: 05.04.2021.
6. *Tunebat [Электронный ресурс]* - Режим доступа: <https://tunebat.com/Analyzer>. - Дата доступа: 05.04.2021.
7. *Vocalremover [Электронный ресурс]* - Режим доступа: <https://vocalremover.org/bpm-finder>. - Дата доступа: 05.04.2021.
8. *mziccard/scala-audio-file, Github [Электронный ресурс]* - Режим доступа: <https://github.com/mziccard/scala-audio-file>. Дата доступа: 05.04.2021.
9. *Функции оконного сглаживания, DSPLIB [Электронные данные]* - Режим доступа: <https://ru.dsplib.org/content/windows/windows.html>. - Дата доступа: 05.04.2021.

UDC 004.4'277

## METHOD FOR DETERMINING THE TEMPO OF A MUSICAL COMPOSITION

*Kuryan A.V., Demenkovets D.V.*

*Belarusian State University of Informatics and Radioelectronics, Minsk, Republic of Belarus*

*Paramonov A.I. – PhD of Computer Science*

**Annotation.** A method for determining the BPM value of musical compositions using the discrete Fourier transform algorithm and analyzing the correlation of the obtained frequency spectrum with the spectrum of real notes played on musical instruments is considered.

**Keywords.** BPM, discrete Fourier transform, time-frequency analysis.