

УДК 621.391(045)

DOI 10.22213/2410-9304-2018-1-26-32

Н. В. Пономарева, соискатель
ИжГТУ имени М. Т. Калашникова

ПРОБЛЕМЫ КОМПЬЮТЕРНОЙ СПЕКТРАЛЬНОЙ ОБРАБОТКИ СИГНАЛОВ В МУЗЫКАЛЬНОЙ АКУСТИКЕ

Изложены проблемы компьютерной спектральной обработки сигналов в музыкальной акустике. Рассмотрены этапы преобразования музыкально-акустического сигнала. Дан анализ причин проявления проблематики спектральной обработки сигналов в музыкальной акустике на основе дискретного преобразования Фурье (Discrete Fourier Transform – DFT). Рассмотрена эффективность и результативность скользящего дискретного преобразования Фурье (Sliding Discrete Fourier Transform) в задачах компьютерной спектральной обработки сигналов в музыкальной акустике. Рассмотрены алгебраические формы параметрического дискретного преобразования Фурье (Parametric Discrete Fourier Transformation) и скользящего параметрического дискретного преобразования Фурье (Sliding Parametric Discrete Fourier Transformation). Проведен системный анализ методов и алгоритмов компьютерной спектральной обработки музыкально-акустических сигналов с целью выявления их достоинств и недостатков, выдвинута рабочая гипотеза решения порождаемой ими проблематики. Сформулированы основные задачи по решению проблем компьютерной спектральной обработки сигналов в музыкальной акустике. Приведены результаты экспериментальных исследований по выделению основного тона музыкально-акустических сигналов на основе дискретного преобразования Фурье. Проиллюстрировано на реальных музыкально-акустических сигналах, насколько повышается детализация представления спектрально-временной картины звуков музыкальных инструментов в случае перехода от скользящего дискретного преобразования Фурье к параметрическому дискретному преобразованию Фурье.

Ключевые слова: дискретное преобразование Фурье, параметрическое дискретное преобразование Фурье, скользящее параметрическое дискретное преобразование Фурье, музыкально-акустический сигнал, частотный спектр.

Методы и алгоритмы цифровой обработки различного рода сигналов (ЦОС) играют важнейшую роль в компьютерных информационных технологиях (ИТ) (*Information Technology – IT*), в том числе и в компьютерных музыкальных технологиях (*Music Technology – MT*). С помощью потоков информации (в том числе семантической (смысловой) и эстетической (эмоциональной)), переносимых сигналами, осуществляется восприятие музыки, реализуется управление сложными системами искусственного и естественного происхождения, организуется их функционирование и жизнедеятельность.

В музыкальной акустике компьютерная обработка музыкально-акустических сигналов (МАС): вокала, вокальной и инструментальной музыки, музыкальных произведений – многопланова и во многом определяется тем, что решение о качестве звучания МАС принимается слушателями (экспертами) на основе их индивидуального воспри-

ятия звуков и, следовательно, носит заведомо субъективный, качественный и вербальный характер.

В связи с этим для решения проблем определения параметров МАС, влияющих на восприятие их органами слуха человека, определения параметров различных преобразователей МАС в звуковой технике, широкое применение получили так называемые *психоакустические методы* [1], разрабатываемые в рамках *психоакустики* [2] – науки, изучающей восприятие звуковых сигналов человеком. Данные методы, основанные на знании особенностей слуховой системы человека, важны при решении задач звуковой техники, возникающих при дискретизации, записи, хранении, передаче, восстановлении, воспроизведении и обработке МАС.

В то же время для решения задач компьютерной обработки МАС, а также развития арсенала методов *музыкальной акустики* [3] важное значение имеют и *аналитические методы*, к которым относятся и компью-

терные спектральные методы обработки сигналов. Среди задач компьютерной спектральной обработки МАС, решаемых с той или иной степенью эффективности классическими спектральными методами, отметим следующие основные задачи:

- выделение основного тона музыкально-акустического сигнала;
- определение тембра музыкально-акустического сигнала.

Успешное решение указанных задач позволяет осуществлять выделение отдельного инструмента или голоса, синхронизацию разных инструментов и голосов (когда есть небольшие сдвиги в записи отдельно инструментов и голосов, связанные с их живым исполнением, а при сведении нужно их синхронизировать), таймирование лирики (задача определения момента начала звучания слов).

Основой компьютерных методов спектральной обработки до последнего времени были методы дискретного преобразования Фурье (ДПФ) (*Discrete Fourier Transform – DFT*) и скользящего ДПФ (СДПФ) (*Sliding Discrete Fourier Transform*) и алгоритмы быстрого их вычисления.

Эффективность и результативность применения ДПФ и СДПФ для компьютерной спектральной обработки МАС объясняется целым рядом причин, главная из которых возможность наглядной физической интерпретации и толкования полученных результатов, поскольку математические аппараты ДПФ и СДПФ адекватны структуре данного вида сигналов.

Практика применения методов компьютерной спектральной обработки сигналов на основе ДПФ и СДПФ выявила кроме существенных достоинств данных методов также и ряд их принципиальных недостатков: проявления как во временной, так и в частотной областях эффектов периодизации, наложения, частотола, утечки, гребешкового эффекта [4].

Для решения проблематики методов спектральной обработки в работе [5] пред-

ложено множество полных, ортогональных, параметрических экспоненциальных базисных систем, на основе которых разработано обобщение ДПФ в виде параметрического ДПФ (ДПФ-П) (*Parametric Discrete Fourier Transformation*) и скользящего ДПФ-П (СДПФ-П) (*Sliding Parametric Discrete Fourier Transformation*). Данные преобразования существенно расширили функциональные возможности классических методов ЦОС, дополнили их математический инструментарий, сохранив при этом возможность наглядной физической интерпретации и толкование получаемых результатов. Соотношениями (1) и (2) определяются алгебраические формы данных преобразований.

Алгебраическая форма ДПФ-П:

$$S_N(k, \theta) = \frac{1}{N} \sum_{n=0}^{N-1} x(n) W_N^{(k+\theta)n},$$

$$k = \overline{0, N-1}; 0 \leq \theta < 1, \quad (1)$$

где $x(n)$ – дискретизированный во времени (дискретный) МАС (ДМАС), $n = \overline{0, N-1}$; θ – параметр ДПФ-П, $0 \leq \theta < 1$; $S_N(k, \theta)$ – коэффициенты ДПФ-П, совокупность которых определяет амплитудно-частотный и фазо-частотный спектры ДМАС (коэффициенты ДПФ-П, так же как и коэффициенты ДПФ, часто называют бинами¹;

$$W_N = \exp\left(-j \frac{2\pi}{N}\right), \quad k = \overline{0, (N-1)}.$$

Алгебраическая форма СДПФ-П:

$$S_N^r(k, \theta) = \frac{1}{N} \sum_{n=0}^{N-1} x(n+r) W_N^{(k+\theta)n}, \quad (2)$$

где r – смещение ДМАС в прямоугольном временном окне влево, т. е. $r = 0, 1, 2, \dots$

Проведенный системный анализ методов и алгоритмов компьютерной спектральной обработки музыкально-акустических сигналов [6–11] показал, что, с одной стороны, МАС могут быть описаны математическими моделями в виде суммы ангармонических

¹Отдельные коэффициенты (отсчеты) ДПФ-П называют также бинами (*Bin* – в переводе с английского «хранилище», «ларь»), что подчеркивает тот факт, что энергия сигнала под кривой $\frac{\sin(N \cdot x/2)}{N \sin(x/2)}$ (передаточная характеристика фильтра ДПФ-П) попадает в «хранилище» данного коэффициента ДПФ-П.

сигналов (вокал, звуки музыкальных инструментов) и шумовых музыкальных сигналов (звуки маракасов, щеток и т. п.), с другой – выявил широкое применение классических методов спектральной обработки, которые, как указано выше, обладают не только существенными достоинствами, но и принципиальными недостатками.

Опираясь на результаты и выводы проведенного системного анализа методов и алгоритмов компьютерной спектральной обработки МАС, автором была выдвинута рабочая гипотеза решения проблематики методов спектральной обработки музыкально-акустических сигналов: *важная и актуальная научная задача разработки новых и совершенствования существующих методов и алгоритмов компьютерной спектральной обработки музыкально-акустических сигналов может быть эффективно (то есть с получением обладающих новизной результатов) решена на основе параметрического дискретного преобразования Фурье и скользящего параметрического дискретного преобразования Фурье.*

Системный анализ сформулированной научной задачи позволяет представить ее как совокупность взаимоувязанного решения следующих основных задач:

1. Разработка новых и совершенствование существующих методов и алгоритмов спектральной обработки МАС на основе ДПФ-П.

2. Проведение экспериментальных и модельных исследований разработанных методов и алгоритмов спектральной обработки МАС.

Рассмотрим результаты экспериментальных исследований по выделению основного тона МАС некоторых музыкальных инструментов (рис. 1–2 (на рисунках зона неопределенности МАС и его спектра обозначена ступенькой)). Для компьютерной спектральной обработки выбирался стационарный участок музыкального акустического сигнала того или иного музыкального инструмента при следующих значениях параметров: частота дискретизации МАС – 44100 Гц; число разрядов АЦП – 16; длительность МАС – 1024 отсчета; $\theta: -\theta = k/16, k = \overline{0,15}$.

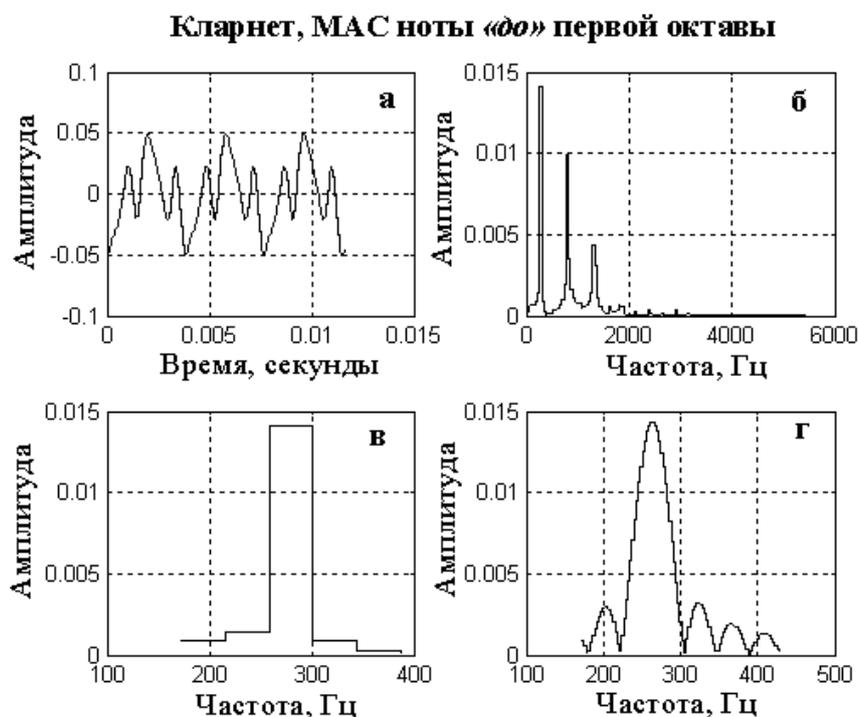


Рис. 1. Компьютерная спектральная обработка МАС: а – МАС; б – энергетический спектр МАС, ДПФ; в – энергетический спектр МАС, ДПФ, увеличенный масштаб; г – энергетический спектр МАС, ДПФ-П, увеличенный масштаб

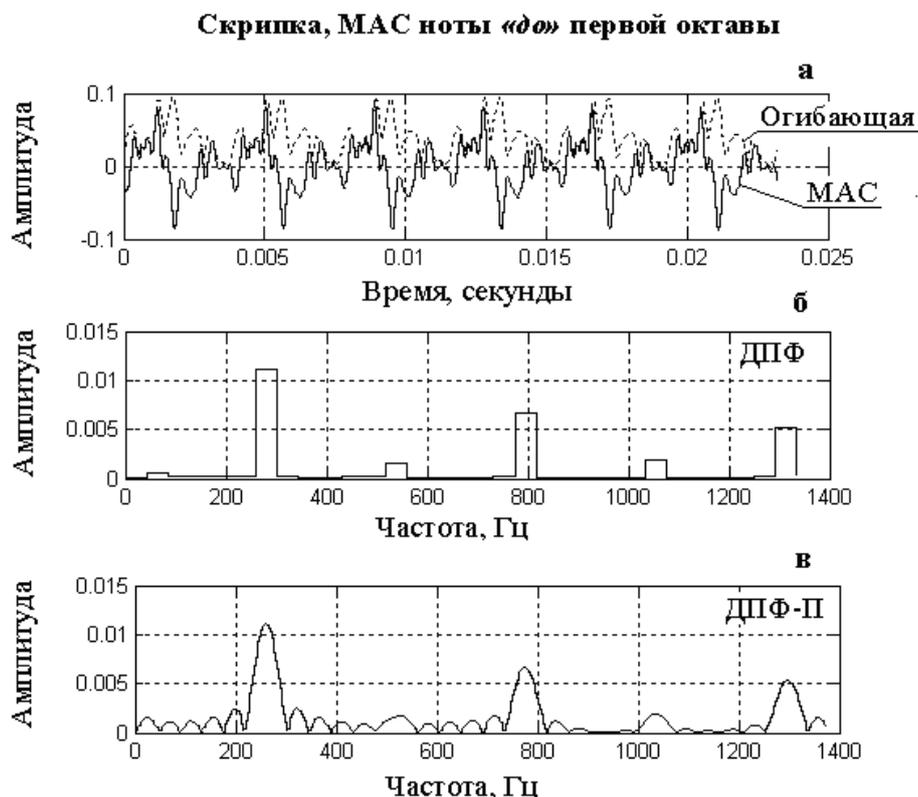


Рис. 2. Компьютерная спектральная обработка огибающей МАС: а – МАС и его огибающая; б – энергетический спектр огибающей МАС, ДПФ; в – энергетический спектр огибающей МАС, ДПФ-П

Экспериментальные исследования МАС музыкальных инструментов и вокала показали, что совместное применение метода ДПФ-П и метода огибающих позволяет надежно определять их основной тон, понизив при этом максимальную погрешность определения основной частоты в $1/\theta$ раз (в нашем случае в 16 раз).

На рис. 3 проиллюстрировано, насколько повышается детализация представления спектрально-временной картины МАС музыкального инструмента флейты в случае перехода от СДПФ к СДПФ-П.

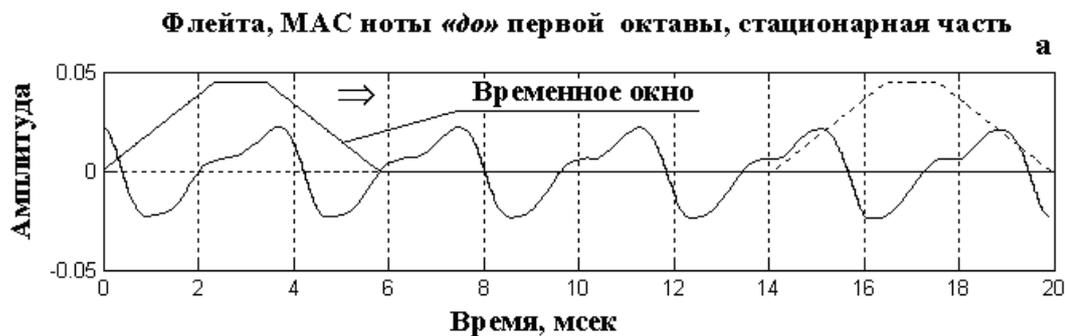
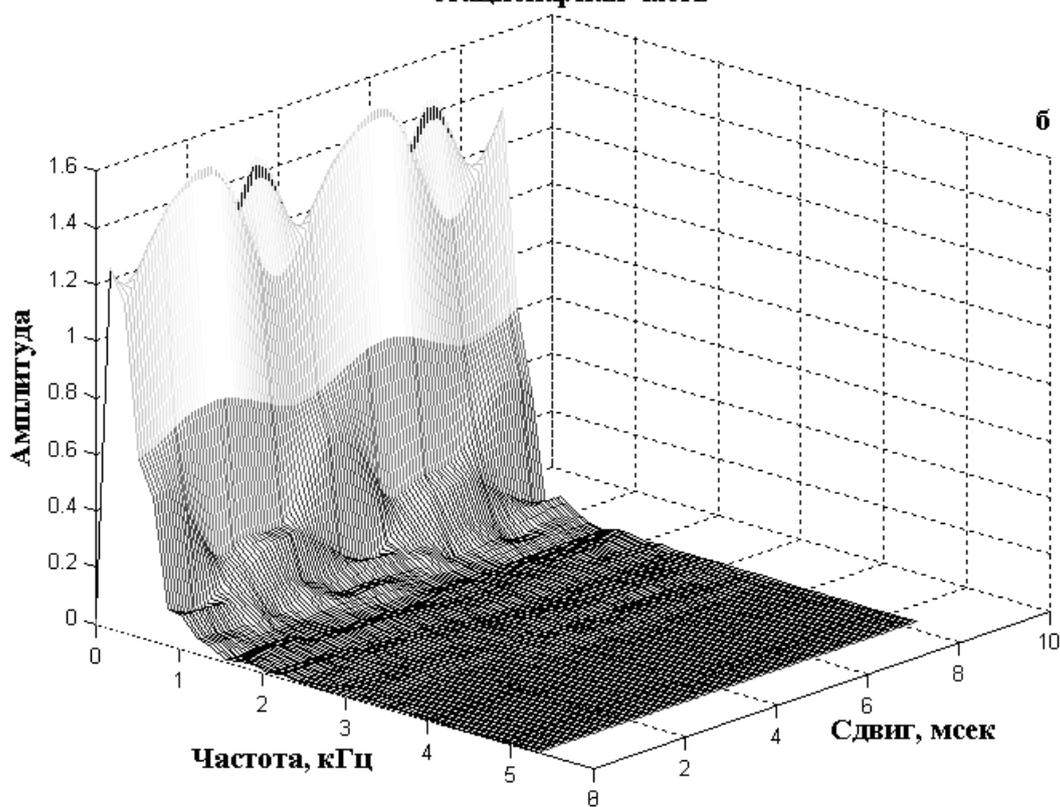


Рис. 3. Компьютерная спектральная обработка МАС ноты «до» первой октавы, флейта, стационарная часть (начало)

**Флейта, скользящий спектр ДПФ МАС ноты «до» первой октавы,
стационарная часть**



**Флейта, скользящий спектр ДПФ-II МАС ноты «до» первой октавы,
стационарная часть, $\theta = 0, 1/4, 1/2, 3/4$**

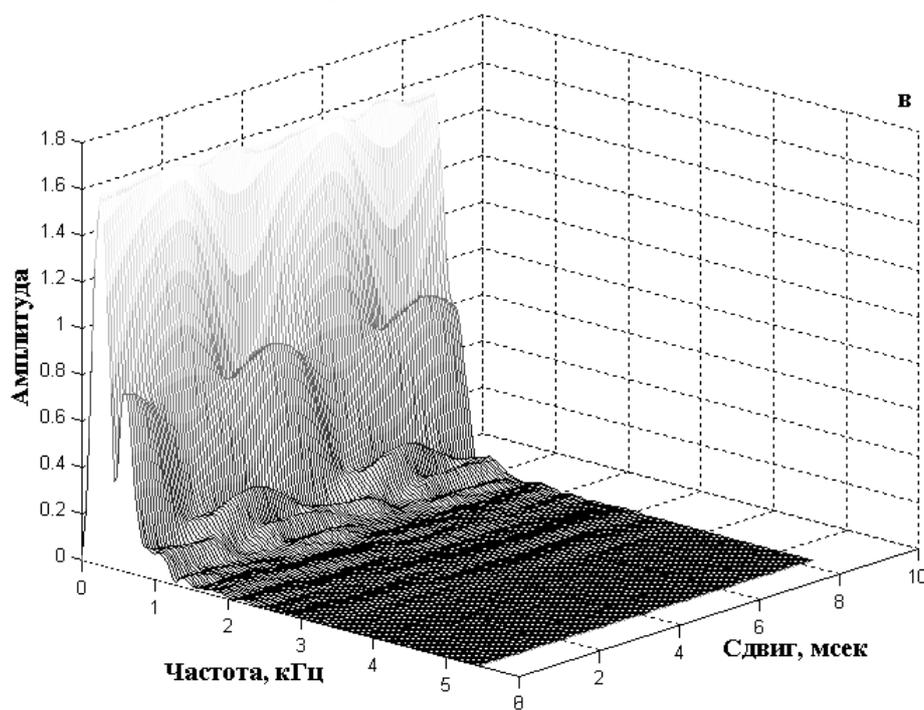


Рис. 3. Компьютерная спектральная обработка МАС ноты «до» первой октавы, флейта, стационарная часть (окончание)

В заключение отметим, что успешное решение поставленных научных задач на основе параметрического дискретного преобразования Фурье является важным, актуальным и своевременным шагом в развитии методов и алгоритмов ЦОС и будет иметь существенное значение для расширения их приложений.

Библиографические ссылки

1. Физика. Большой энциклопедический словарь / гл. редактор А. М. Прохоров. 4-е изд. М., 1998. 994 с.
2. Алдошина И. А. Основы психоакустики. Подборка статей с сайта <http://www.625-net.ru>. URL: <http://www.twirpx.com/file/141630>.
3. Физика. Большой энциклопедический словарь / гл. редактор А. М. Прохоров. 4-е изд. М., 1998. 994 с.
4. Пономарева О. В. Развитие теории и разработка методов и алгоритмов цифровой обработки информационных сигналов в параметрических базисах Фурье: дис. ... д-ра техн. наук: 05.13.01 / Пономарева Ольга Владимировна. Ижевск, 2016. 357 с.
5. Там же.
6. Никаноров С. П. Системный анализ: этап развития методологии решения проблем в США. URL: http://or-rsv.net/Concept/Nikanorov_003.htm.
7. Пономарева Н. В. Предобработка дискретных сигналов при спектральном анализе в системе компьютерной математики – MATLAB // Интеллектуальные системы в производстве. 2016. № 4 (31). С. 32–34.
8. Пономарева О. В. Метод эффективного измерения скользящего параметрического спектра Фурье / В. А. Пономарев, О. В. Пономарева, А. В. Пономарев // Автотметрия. 2014. Т. 50. № 2. С. 31–38.
9. Пономарева О. В., Пономарев А. В. Восстановление значений непрерывных частотных спектров дискретных сигналов методом параметрического дискретного преобразования Фурье // Вестник Ижевского государственного технического университета. 2015. № 3 (67). С. 88–91.
10. Пономарева О. В. Измерение временных спектров дискретных сигналов методом модифицированного параметрического дискретного преобразования Фурье // Интеллектуальные

системы в производстве. 2014. № 2 (24). С. 132–138.

11. Пономарева О. В., Пономарев А. В., Пономарев В. А. Измерение скользящего взвешенного энергетического дискретно-временного спектра тональных компонент // Интеллектуальные системы в производстве. 2014. № 2 (24). С. 126–132.

References

1. Ed. Prohorov A. M. (1998). *Fizika. Bol'shoj jenciklopedicheskij slovar'* [Physics. The Great Encyclopedic Dictionary]. Moscow, 994 p. (in Russ).
2. Aldoshina I. A. *Osnovy psihoakustiki. Podborka statej s sajta* <http://www.625-net.ru> [Fundamentals of psychoacoustics. Selection of articles from the site <http://www.625-net.ru>], available at <http://www.twirpx.com/file/141630>.
3. Ed. Prohorov A. M. (1998). *Fizika. Bol'shoj jenciklopedicheskij slovar'* [Physics. The Great Encyclopedic Dictionary]. Moscow, 994 p. (in Russ).
4. Ponomareva O. V. (2016). *Razvitie teorii i razrabotka metodov i algoritmov cifrovoj obrabotki informacionnyh signalov v parametricheskix bazisah Fur'e* [Development of the theory and development of methods and algorithms for digital processing of information signals in parametric Fourier bases] (DSc Thesis). Izhevsk (in Russ).
5. Ibid.
6. Nikanorov S. P. *Sistemnyj analiz: jetap razvitija metodologii reshenija problem v SShA* [System analysis: the stage of development of methodology for solving problems in the United States], available at http://or-rsv.net/Concept/Nikanorov_003.htm (in Russ).
7. Ponomareva N. V. (2016). *Intellektual'nye sistemy v proizvodstve* [Intelligent systems in production], no 4 (31), pp. 32-34 (in Russ).
8. Ponomareva O. V., Ponomarev V. A., Ponomarev A. V. (2014). *Avtometrija* [Autometry], vol. 50, no 2, p.p. 31 - 38. (in Russ).
9. Ponomareva O. V., Ponomarev A. V. (2015). *Vestnik IzhG imeni M. T. Kalashnikova* [Bulletin of Kalashnikov ISTU], no 3 (67), pp. 88-91 (in Russ).
10. Ponomareva O. V. (2014). *Intellektual'nye sistemy v proizvodstve* [Intelligent systems in production], no 2 (24), pp.132-138 (in Russ).
11. Ponomareva O. V., Ponomarev A. V., Ponomarev V. A. (2014). *Intellektual'nye sistemy v proizvodstve* [Intelligent systems in production], no 2 (24), pp.126-132 (in Russ).

* * *

N. V. Ponomareva, Applicant, Kalashnikov ISTU

Problems of Computer Spectral Processing of Signals in Musical Acoustics

The problems of computer spectral signal processing in musical acoustics are described. The stages of transformation for a musical acoustic signal are considered. The analysis of the problems of spectral signal processing in musical acoustics based on the discrete Fourier Transform (DFT) and the sliding DFT is given. The efficiency and productivity of the Sliding Discrete Fourier Transform in problems of computer-aided spectral processing of signals in musical acoustics is considered. A generalization of the DFT in the form of parametric DFT (DFT-P) and sliding DFT-P is presented. System analysis of methods and algorithms of computer spectral processing of musical acoustic signals (MAS) is carried out to reveal their advantages and drawbacks; a working hypothesis of solving their problems is suggested. Main issues of solving the problems of computer spectral processing of signals in musical acoustics are stated. The results of experimental studies on getting of the fundamental tone of musical acoustic signals basing on DFT and their sliding spectra are presented. Real musical acoustic signals were used to demonstrate the increase in refinement of representation for the time spectral pattern of sounds of musical instruments in case of transition from the sliding DFT to the parametric DFT.

Keywords: Discrete Fourier Transform, Parametric Discrete Fourier Transformation, Sliding Parametric Discrete Fourier Transformation, musical acoustic signal, frequency spectrum.

Получено: 05.03.18.