

## КОМПЬЮТЕРНЫЙ АНАЛИЗ ПЕВЧЕСКОГО ГОЛОСА.

**Е. А. Ананьева, аспирант, А. Б. Ананьев, канд. тех. наук, доц.**  
*НТУУ «КПИ», г. Киев, Украина*

Рассматривается методика выделения вибрато из фрагментов певческого голоса, и обсуждаются вопросы его исследования. Рассмотрены вопросы выделения отдельной гармонической компоненты из многокомпонентного музыкального звука с учетом амплитудной и частотной модуляции (вибрато) этого звука. Приводятся характеристики вибрато, выделенного из фрагментов голосов ряда известных певцов.

### ВВЕДЕНИЕ

Иногда говорят «чем выше голос, тем ниже должность». В этом шутовском высказывании отражено укоренившееся массовое представление о том, что значительная личность должна обладать «значительным» голосом и, наоборот, обладатель раздражающе тонкого голоса с непривлекательными дефектами артикуляции и интонации не может претендовать на значительное место в обществе.

Исследования свойств голоса приобрели особую важность в связи с задачами автоматического распознавания речи, идентификации говорящего по голосу, экспертизы целостности фонограмм. В этих исследованиях отмечено, что наиболее важные, и вместе с тем некоррелированные между собой признаки голосов имеют отношение к артикуляционным особенностям речи, к тембру и высоте голоса, к темпу речи и ее интенсивности [1], хотя собственно критерии качества голоса до сих пор носят преимущественно субъективный характер.

Особый интерес и особую сложность представляет исследование интонационных особенностей речи, тем более что оказывается крайне трудным указать, какой интонационный вариант является предпочтительным в конкретной ситуации [1].

Вместе с тем, существует особая область голосовой деятельности, в которой, именно потому, что артикуляционные, звуковысотные, темповые и интонационные требования предопределены, удастся сформулировать наиболее важные критерии высокого качества. Эта область – классическое пение, и по нашему мнению, отработка эффективных методов и средств анализа голоса в этой области, помимо собственной ценности, является школой для последующих исследований в значительно более сложной сфере разговорной речи.

### МЕТОДИКА ИССЛЕДОВАНИЯ ПЕВЧЕСКОГО ВИБРАТО

В 1934 г. В. Бартоломью опубликовал в журнале JASA статью [2], в которой перечислил 4 главных свойства хорошего певческого голоса: ровное глубокое вибрато, значительная общая мощность, выразительная нижняя певческая форманта, выразительная верхняя певческая форманта. Развитие электронных средств обработки звука позволяет сегодня корректировать недостатки трех последних характеристик голоса и лишь высококачественное вибрато – периодическая пульсация громкости и высоты тона с частотой порядка 4..8 Гц – остается неизменным признаком собственного профессионализма вокалиста.

Известные ранние исследования вибрато в певческом голосе относятся, преимущественно, к амплитудным пульсациям [3]. Однако, характерное для пульсирующих звуков обогащение тембра и обусловленный этим художественный эффект более связаны с влиянием именно частотной модуляции. Заметим, что реализованные до настоящего времени средства, позволяющие выделять модулирующую функцию частоты музыкального сигнала, не обеспечивают точного объективного анализа качества певческого голоса.

Принятый нами способ анализа вибрато ориентирован на столь возможно точное выделение функций, модулирующих частоту (а также и амплитуду) отдельных гармоник в голосе певца, а также функции, модулирующей общий уровень исполняемого звука. В связи с этим в качестве средства такого анализа нами принято известное преобразование Гильберта [4], которое позволяет определить непрерывные функции мгновенной частоты и амплитуды узкополосного сигнала, каким является гармоника музыкального звука при исполнении фиксированной ноты. Важным фактором в этом случае является также высокая эффективность вычислительного алгоритма, основанного на Быстром Преобразовании Фурье, в соответствии с блок-схемой рис. 1

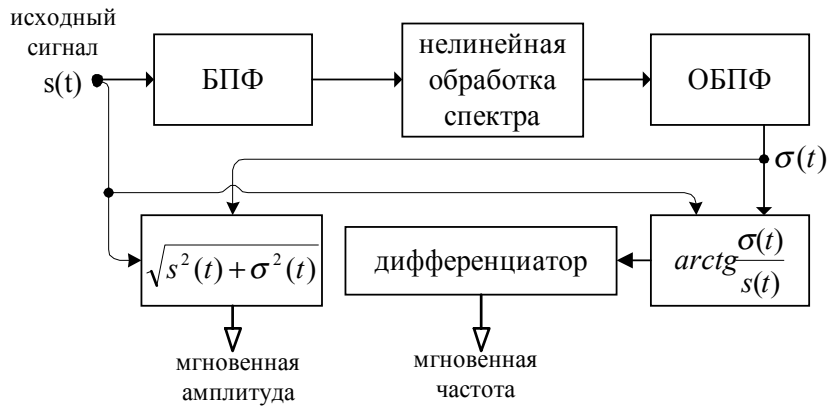


Рис. 1

На приведенной блок-схеме «нелинейная обработка спектра» учитывает свойства спектра сопряженной по Гильберту функции  $\sigma(t)$  [4], тригонометрический преобразователь формирует непрерывную функцию, не приводя угол к диапазону  $0..2\pi$ .

## ПАРАМЕТРЫ ИССЛЕДОВАНИЯ

Очевидно, что основная проблема при проведении исследования состоит в точной предварительной фильтрации многокомпонентного звукового сигнала для выделения единственной выбранной гармоники звука. Именно гармоника представляет собой узкополосный процесс, в отношении которого можно применить указанный выше алгоритм

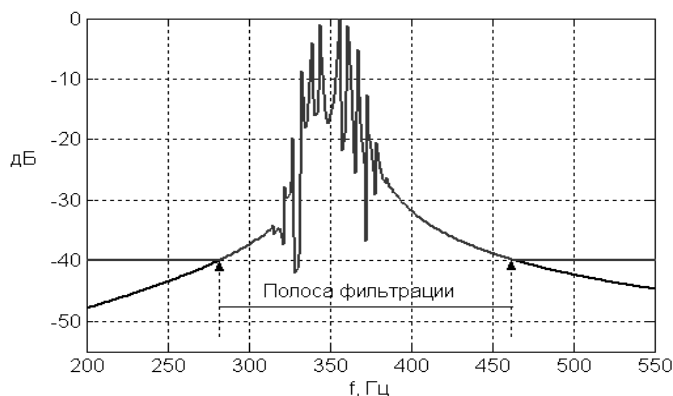


Рис. 2

вычисления мгновенной амплитуды и частоты. Выбор полосы фильтра при этом является важной проблемой, определяющей качество проводимых измерений. Модель выделяемой гармоники представляет собой гармонически модулируемое по амплитуде и частоте синусоидальное колебание, мощность которого экспоненциально изменяется во времени:

$$s(t) = e^{-\alpha t} \cdot (1 + m \cos(2\pi f_m t)) \cos(2\pi f_0 t + \frac{\delta f \cdot f_0}{f_m} \sin(2\pi f_m t)) \quad (1)$$

где  $f_0$  – частота гармоники,  $f_m$  – частота модуляции,  $\delta f = \frac{\Delta f}{f_0}$  – относительное отклонение частоты,  $\Delta f$  – девиация частоты модулированного колебания,  $m$  – глубина амплитудной модуляции,  $e^{-\alpha t}$  – множитель, моделирующий затухание/нарастание звука. Характерная форма спектра такого сигнала при значениях его параметров, соответствующих типичным записям певческого голоса при глубокой модуляции, показана на рис. 2

Как показывают предпринятые нами многочисленные модельные исследования,

- затухание сигнала, соответствующее  $\alpha < 1.5$ , позволяет выбирать полосу фильтрации гармоники на уровне -40..50 дБ от максимума без наложения на спектры соседних гармоник, при этом величина полосы (ширина спектра гармоники) практически не зависит от величины  $\alpha$ ;
- при наличии частотного виврато, выбирая полосу фильтра, можно практически не считаться с наличием в гармонике периодической амплитудной модуляции вплоть до значения  $m=0.5$ ;
- расширение полосы фильтрации, выбранной по ширине спектра на уровне -40 дБ, не приводит к видимому улучшению результата, в то время как сужение ее до 80% приводит к ухудшению качества фильтруемого колебания;
- в случае ошибки в определении центральной частоты гармоники, смещение полосы фильтра на 10% в сторону от истинного центра практически не сказывается на качестве выделения модуляционных составляющих, смещение же более, чем на 20%, приводит к их заметному искажению.

Заметим, что при проведении модельных исследований контроль выполнялся путем сравнения исходных модулирующих функций модельного сигнала с функциями, выделенными на основе алгоритма рис.1 после соответствующей фильтрации. Высокая степень совпадения этих функции позволила сделать перечисленные выше выводы.

На основании проведенных модельных экспериментов можно сделать итоговый вывод, что гармоническая составляющая в многокомпонентном музыкальном звуке может быть успешно подвергнута анализу, если соотношение спектрального максимума гармоники и спектрального уровня шумов в ее окружении не хуже 40 дБ а показатель затухания  $\alpha$  существенно меньше 1.5. Относительная полоса фильтрации гармоники при этом должна быть не менее 30% (т.е. примерно треть октавы), если центральная частота гармоники определена с точностью не менее 3%. При менее уверенном выборе центральной частоты (точность не менее 10%) относительная полоса может быть расширена до 40%.

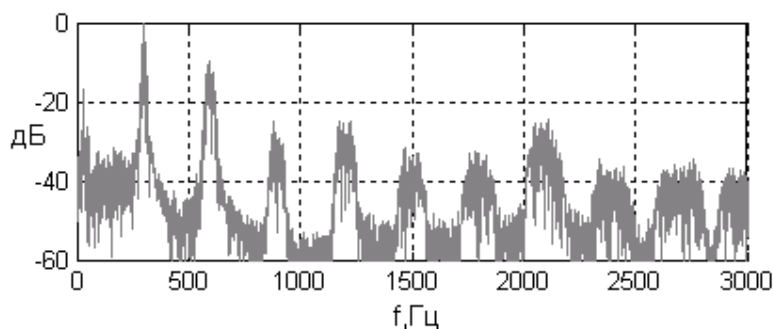


Рис. 3

На рис.3 показана спектральная картина певческого звука, извлеченного для анализа из весьма старой архивной записи. Даже в этом случае, как это видно, запись дает материал, удовлетворяющий требованиям анализа.

### РЕЗУЛЬТАТЫ АНАЛИЗА

Рисунки 4 и 5 содержит иллюстративные результаты, относящиеся к молодым перспективным певцам - призерам украинского телевизионного проекта «Шанс» (телеканал «Интер»). Звук голоса Александра Воевцукго (рис.4) обладает отчетливыми гармониками, выразительной верхней певческой формантой, амплитудным и частотным вибрато. Анализируемый звук завоевавшей симпатии зрителей Натальи Валевской (рис.5) обладает достаточно ровным частотным вибрато, но уступает ему по качеству верхней форманты.

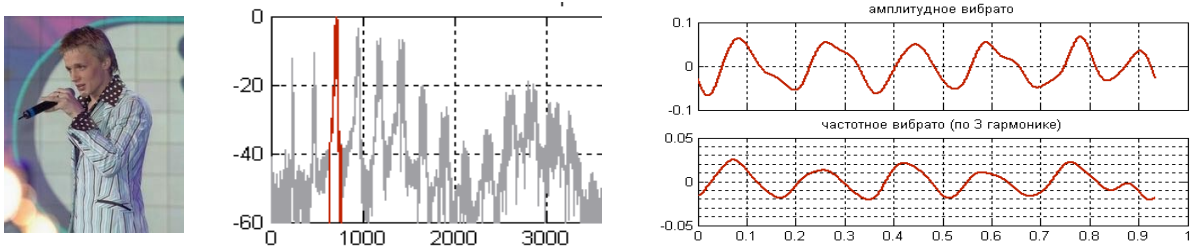


Рис. 4

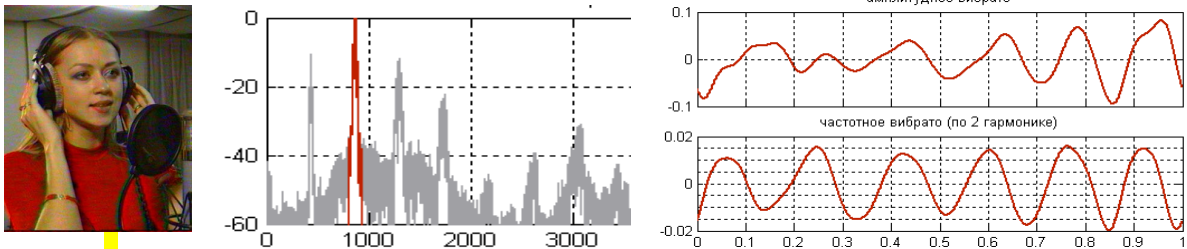


Рис. 5

Мы обязаны указать, что выбранный здесь отдельный звук не характеризует вокальные данные певца в целом, а лишь иллюстрирует возможности технологии анализа.

Для сравнения на рис.6 приведены данные знаменитого, в прошлом, юного итальянского певца Робертино Лоретти с весьма выразительной верхней формантой и неустойчивым, но глубоким частотным вибрато.

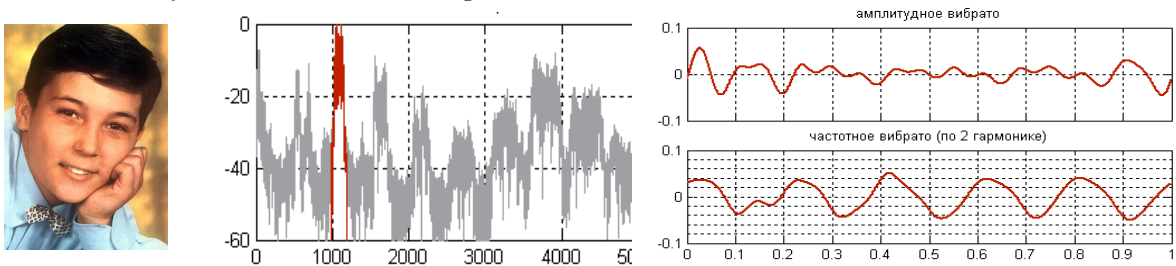


Рис. 6

Самостоятельную ценность, на наш взгляд, представляет результат анализа голоса выдающегося современного баритона Дмитрия Хворостовского (Россия, рис. 7).

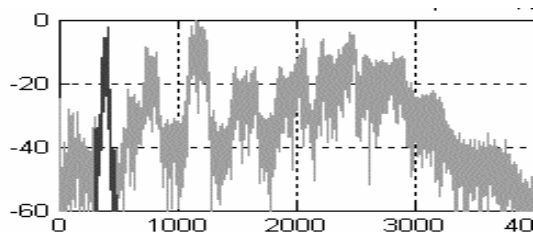


Рис. 7

В длительном звуке народной песни, исполненной без оркестрового сопровождения Д. Хворостовским во время концерта на Красной площади Москвы в мае 2004 г. мы отмечаем необычайно мощную верхнюю певческую форманту, а также частотное вибрато исключительной ровности и стабильности на протяжении 5 секунд (рис.8). В течение этого времени отклонение частоты вибрато от величины 5 Гц не превышает 0.1 Гц. Подобные объективные характеристики свидетельствуют об особой вокальной одаренности голосового аппарата певца и его чрезвычайном профессионализме.

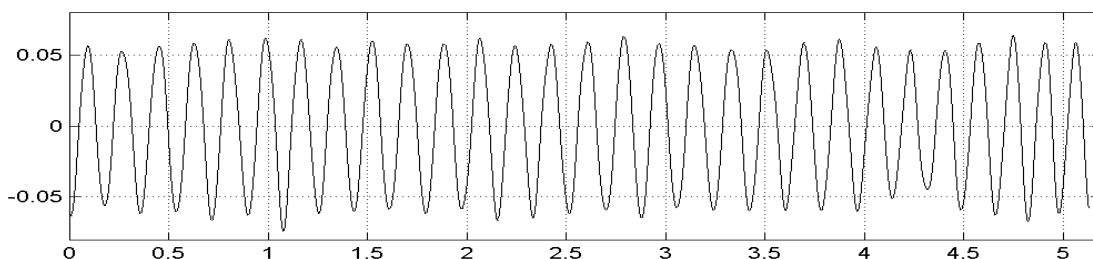
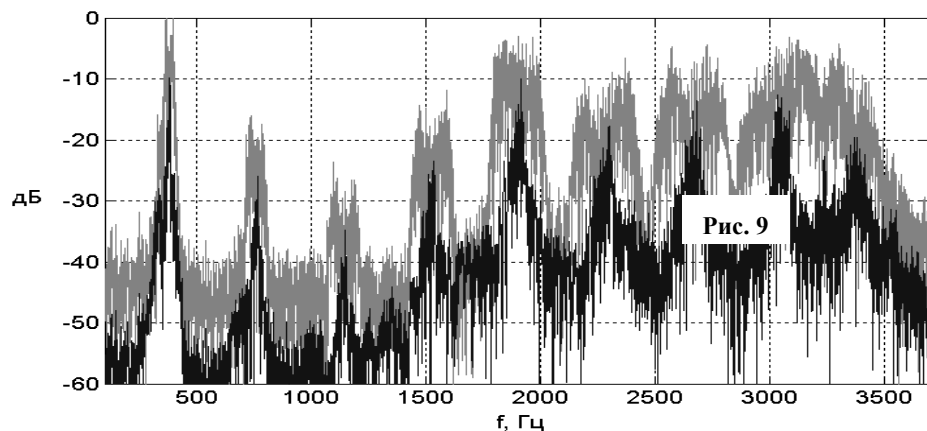


Рис. 8

Разработанные нами средства позволяют не только выделять модуляционные компоненты голоса с целью их экспертизы, но и удалять их из звукового сигнала применительно к каждой гармонике звука, оставляя в нем лишь стабильные спектральные компоненты, которые определяют тембр голоса в узком смысле этого слова.

На рис.9 показан спектр звука из оперы «Евгений Онегин» Чайковского в исполнении великого русского тенора прошлого века Сергея Лемешева. Исходный спектр на рисунке имеет светлый оттенок и отчетливо показывает наличие глубокой частотной модуляции в гармониках. На его фоне отображен спектр того же звука с удаленным частотным вибрато. Нужно сказать, что результирующий звук, хотя и сохраняет на слух тембровые признаки исходного голоса, но без вибрато звучит неприятно, что, впрочем, соответствует общепринятому мнению [3].



Такое преобразование музыкального сигнала позволяет разделить собственно спектральные гармоники, характерный уровень которых определяется свойствами формирующих резонаторных компонент источника музыкального звука, и модулирующие функции вибрато, обусловленные профессиональной подготовкой исполнителя.

Дальнейшее развитие проводимых исследований предполагает применение предложенной технологии к исследованиям более длительных интонационных особенностей исполнения музыки. Такие исследования позволяют обнаружить тонкие детали голосового поведения певца и должны содействовать более эффективному и уверенному обучению вокалистов.

На рис. 10 отображена интонационная структура фрагмента мелодии в исполнении квалифицированной украинской оперной певицы. Такие графические образы могут быть получены с помощью известных контурных спектрограмм [1]. На рисунке показан характер изменения двух младших гармоник звука, и видно, что при проведении этого фрагмента мелодии певца непрерывно модулирует звук, хотя на слух это ощущается только в относительно длинных нотах, отмеченных на рисунке.

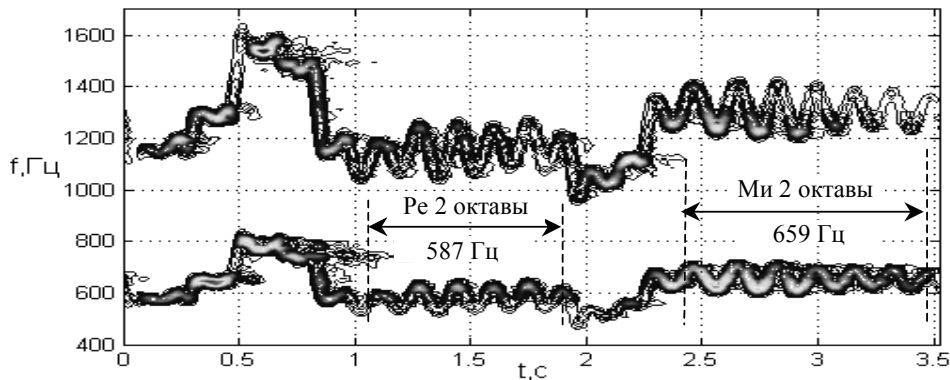


Рис. 10

Однако, спектрограмма, отражая сечения уровня гармоник, не дает исследователю точной частотной трассы основного тона, которая необходима для получения количественных характеристик интонационной линии. Получение такой непрерывной и однозначной трассы возможно выполнить, используя преобразование Гильберта.

## ВЫВОДЫ

Технология выделения вибрато из певческого голоса, основанная на использовании преобразования Гильберта, в ходе тестовых исследований на модельных сигналах показала весьма точные результаты, что позволяет применять ее для анализа реальных музыкальных звуков. Исследование фрагментов вокальных записей дает возможность провести объективную сравнительную оценку качества исполненных звуков. Проведенные исследования дают основание применить предложенную нами методику для изучения интонационных особенностей музыкального исполнения в более широком аспекте.

## ЛИТЕРАТУРА

1. Г.С.Рамишвили, Речевой сигнал и индивидуальность голоса, -Тбилиси: «Мецниереба», 1976, - 183 с.
2. W.T.Bartholomew, A Physical Definition of "Good Voice-Quality" in the Male Voice. J.Acoust.Soc.Am. 1934, v VI, p25-33
3. В.П.Морозов, Биофизические основы вокальной речи., -Л.: «Наука», 1977 - 232 с.
4. А.Л.Зиновьев, Л.И.Филиппов. Введение в теорию сигналов и цепей.-М.: ВШ,- 1975.-264 с.