

УДК 681.84.083:534.3

А.В. Бакаев

ОСОБЕННОСТИ СПЕКТРАЛЬНЫХ ХАРАКТЕРИСТИК ВОКАЛЬНОЙ РЕЧИ ПЕВЦА ПРИ ПРОФЕССИОНАЛЬНЫХ ЗАБОЛЕВАНИЯХ*

Рассматриваются теории образования высокой певческой форманты, предложенные Е.А. Рудаковым и В.П. Морозовым, а именно образование ее посредством эффекта «краевого тона» или ее резонансная теория происхождения. Изложены результаты моделирования процесса формирования высокой певческой форманты на основе ее экспериментально полученной временной диаграммы и предлагаемой ее математической модели в виде периодической последовательности импульсов с огибающей в форме усеченных косинусоид с высокочастотным заполнением. Делается вывод о взаимном дополнении существующих теорий, ранее выступающих как противоборствующих. В подтверждение данного вывода приводятся спектры записей голоса профессионального певца в больном и здоровом состоянии.

Акустические сигналы; вокальная речь; высокая певческая форманта.

A.V. Bakaev

PECULIARITIES OF SPECTRAL CHARACTERISTICS OF A SINGER'S VOCAL SPEECH IN COURSE OF PROFESSIONAL DISEASES

The article deals with theories of the higher singing formant formation suggested by E.A. Rudakov and V.P. Morosov, namely the higher singing formant formation by means of "edge tone" or the resonance theory of its origin. The modeling results of the higher singing formant formation process are set forth based on its experimentally obtained time-diagram and proposed mathematical model of it presented as a periodic pulse sequence with an envelope in the form of truncated cosine curves having high-frequency filling. The conclusion is drawn out that the two theories are mutually complementary though earlier being considered opposing each other. In support of this conclusion the spectra of a professional singer's voice records are given, one made during an illness, the other – in good health.

Acoustic signals; vocal speech; high singing formant.

На современном этапе развития техники и технологий методы точных наук все более широко используются в гуманитарных областях. Электроакустические устройства и компьютерная техника применяются также в музыкознании и изучении особенностей процессов фонации.

Традиционной областью применения акустических методов является искусство вокального пения. Новые возможности компьютерной техники позволяют анализировать, синтезировать акустические сигналы и разрабатывать методы и алгоритмы их обработки. Получение новых знаний об основных характеристиках вокальной речи представляет научный и практический интерес.

Известно, что тембр певческого голоса связан, прежде всего, с его спектральными характеристиками, которые зависят как от частотного состава звука, создаваемого голосовым источником, так и от использования резонансных свойств артикуляционных органов. Поэтому особые требования к тембру певческого голоса приводят к особенностям в настройке резонансов голосового тракта, т.е. его формантных частот.

Одним из главных отличий вокальной речи от разговорной является высокая певческая форманта (ВПФ) – это группа усиленных обертонов в области 2000–2700 Гц у мужчин и 2700–3500 Гц у женщин. Также в спектре голоса певца присутствуют область низкой певческой (первой речевой) форманты (НПФ) (200 Гц – 1200 Гц) и область средней певческой (второй речевой) форманты (СПФ) (800 Гц – 1800 Гц).

* Работа выполнена при поддержке РФФИ. Проект № 10-06-0011а.

Как известно, в спектре вокальной речи наибольшей интенсивностью обладает третья форманта, называемая высокой певческой формантой; ее наличие свойственно голосам профессиональных вокалистов (рис. 1).

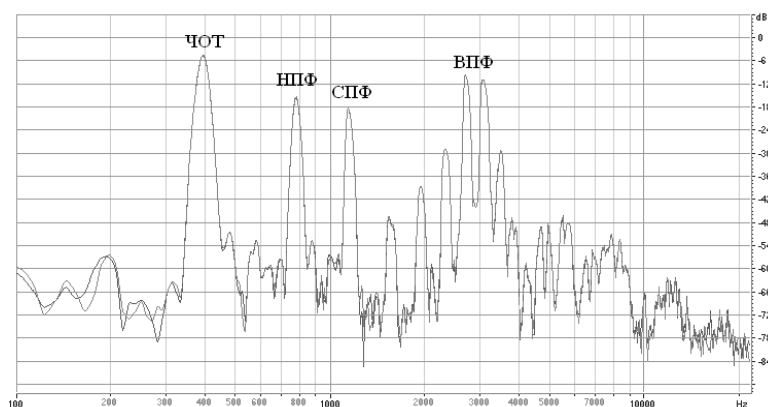


Рис. 1. Спектр вокальной гласной «А» (сопрано) (ЧОТ – частота основного тона, НПФ – низкая певческая форманта, СПФ – средняя певческая форманта, ВПФ – высокая певческая форманта)

Высокая певческая форманта у профессиональных певцов обладает постоянной большой интенсивностью – это достигается благодаря правильной постановке голоса, в ходе которой используются специфические музыкальные, физические и дыхательные упражнения и которая требует нескольких лет занятий под руководством опытных педагогов-вокалистов. Однако вопрос о механизме формирования ВПФ пока не до конца выяснен.

Например, Е.А. Рудаков предлагал теорию образования певческих формант, учитывающую «принципиальную разницу между формированием спектров (тембра) певческих звуков и спектров музыкальных инструментов»; в своей работе он «вскрыл весьма важную функцию гортани, работающей при фонации как генератор прерывистых импульсов». По его мнению, механизмом, образующим высокую певческую форманту, является «краевой тон» голосовых связок, формируемый подобно свисту: в момент смыкания и размыкания голосовых связок между ними на очень короткое время создается небольшое отверстие, через которое прорывается подсвязочное давление, создающее «вихри» и «краевые тоны» с частотой приблизительно около 3000 Гц. Е.А. Рудаков писал: «Это значит, что если певец поет звук *la*, равный 110 Гц, то его связки 110 раз в секунду смыкаются и размыкаются и, следовательно, 110 раз в секунду образуется между ними небольшое отверстие, создающее очень короткий импульс свиста на частоте 3000 Гц. Эти прерывистые импульсы свиста, быстро следующие один за другим, и создают верхнюю форманту, интенсивность которой оказывается совершенно независимой от интенсивности других составляющих спектра и от поведения ротоглоточного рупора» [1]. Таким образом, из теории Рудакова следует, что интенсивность верхней форманты зависит от геометрической формы отверстий, возникающих между голосовыми связками и от интенсивности подсвязочного давления. Из этой теории также следует, что составляющая, образующая в спектре голоса верхнюю форманту, должна представлять собой серии прерывистых колебательных импульсов. В доказательство этого приводятся фотографии колебаний импульсов верхней форманты на электронном осциллографе или шлейфовом осциллографе.

В противоположность изложенной теории В.П. Морозов утверждает, что ВПФ имеет резонансное происхождение. В одной из своих последних книг [2] он подверг критике теорию Е.А. Рудакова, считая ее малоубедительной, поскольку «спектр голосового источника не содержит сколько-нибудь выраженных максимумов». Однако края голосовых связок при пении тонов разной силы и высоты сильно изменяют свои физические свойства (плотность смыкания, длину колеблющейся части, просвет голосовой щели в фазе размыкания и др.). Это должно было бы сказываться и на изменении частотных характеристик высокой певческой форманты, однако этого не происходит, и у хороших певцов частота высокой форманты при изменении силы и высоты голоса остается практически неизменной. Поэтому В.П. Морозов говорит «скорее о резонансном механизме ее происхождения». «Наконец, – пишет В.П. Морозов, – как известно из музыкальной акустики, в образовании звука в лабиальных системах, использующих в качестве возбудителя шум струи воздуха, рассекаемой щелью, т.е. «краевые тоны» по Рудакову (свистки, органные трубы, флейты), прилежащий резонатор всегда является неотъемлемой и важнейшей частью, формирующей звуковысотные, громкостные и тембровые свойства системы» [2]. (Следует отметить, что последнее высказывание не противоречит теории Е.А. Рудакова.)

В данной статье предлагается взгляд на эту проблему с точки зрения радиотехнической модели исследуемого явления.

Используя данные, полученные при анализе приведенных в статье Е. А. Рудакова временных диаграмм высокой певческой форманты, с помощью современной вычислительной техники был вычислен спектр такого колебания. Модель формирования высокой певческой форманты голосовыми связками была представлена в виде периодической последовательности импульсов с огибающей в форме усеченных косинусоид с высокочастотным заполнением (рис. 2, 3).

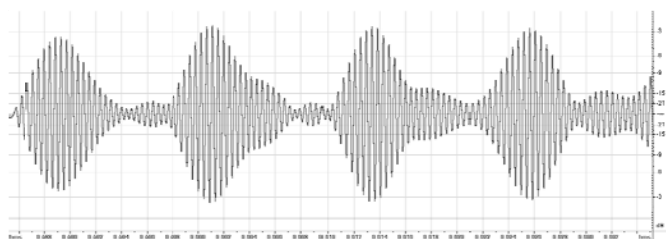


Рис. 2. Экспериментально полученная временная диаграмма ВПФ

Для упрощения модель формирования высокой певческой форманты голосовыми связками была представлена в виде периодической последовательности импульсов с огибающей в форме усеченных косинусоид с высокочастотным заполнением (рис. 3).

Расчет показывает, что спектр такой последовательности (рис. 4) имеет гармоники (с номерами 21–28) большой интенсивности именно на частоте высокой певческой форманты¹. При вычислении спектра частоту основного тона взяли равной 123 Гц (что соответствует тону b), а частоту высокочастотного заполнения усеченных косинусоид – 3000 Гц.

¹ Следует отметить, что аналогичный механизм формирования верхних голосов существует в тувинском горловом пении; спектр сигнала типа «прерывистого свиста» содержит при этом только гармоники частоты следования импульсов, т.е. основного тона голоса, что обеспечивает его постоянную консонантность с основным тоном [4].

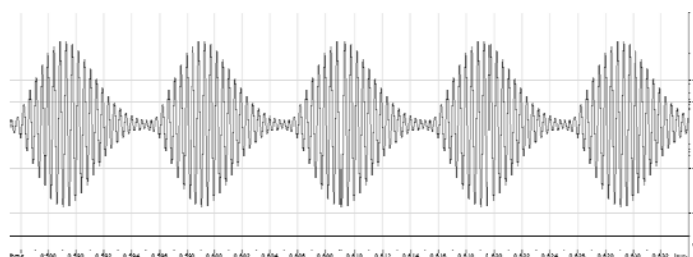


Рис. 3. Временная диаграмма выбранной модели ВПФ

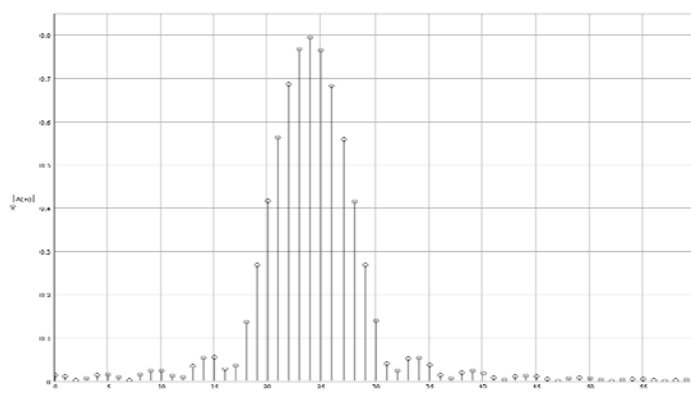


Рис. 4. Спектр периодической последовательности импульсов с огибающей в форме усеченных косинусов с высокочастотным заполнением с параметрами ВПФ

Опираясь на обе теории (Е.А. Рудакова и В.П. Морозова), можно сделать вывод, что высокочастотные колебания, формируемые голосовыми связками (согласно теории Рудакова), далее попадают в грудные и головные резонаторы, где (согласно теории Морозова) благодаря резонансным явлениям и соответствующей «настройке» этих резонаторов образуют высокую певческую форманту большой интенсивности.

Анализ голосов профессиональных исполнителей (Д. Хворостовского, Б.Христова, Н. Гяурова, С. Лемешева, М. Ланца, Е. Образцовой и др.) показал, что добротность резонансных полостей, настроенных на область высокой певческой форманты, имеет значения в пределах от 3 до 7. Такие значения добротности резонаторов сами по себе не могут обеспечить высокую интенсивность ВПФ, которая наблюдается в спектрах голосов этих профессиональных вокалистов. Вычисление интенсивности ВПФ в районе голосовых связок по известной добротности и интенсивности ВПФ на выходе голосового тракта указывает на то, что интенсивности спектральных составляющих в области высокой форманты разговорной речи и вокальной речи существенно отличаются – в спектре разговорной речи третья форманта значительно меньше, чем в спектре вокальной. С увеличением громкости разговорной речи и при переходе на крик интенсивность третьей речевой форманты возрастает незначительно, что позволяет в этом случае говорить об отсутствии механизма формирования высокой форманты посредством эффекта «краевых тонов». Это подтверждает то, что одних резонаторов недостаточно для формирования достаточно интенсивной ВПФ. Таким образом, теории образования высокой певческой форманты Е.А. Рудакова и В.П. Морозова являются взаимодополняющими.

Еще одним подтверждением того, что голосовые связки также участвуют в образовании ВПФ, служит исследование спектров голоса профессионального певца (баса) А.Б. в больном состоянии с диагнозом «ларингит» (рис. 5–8).

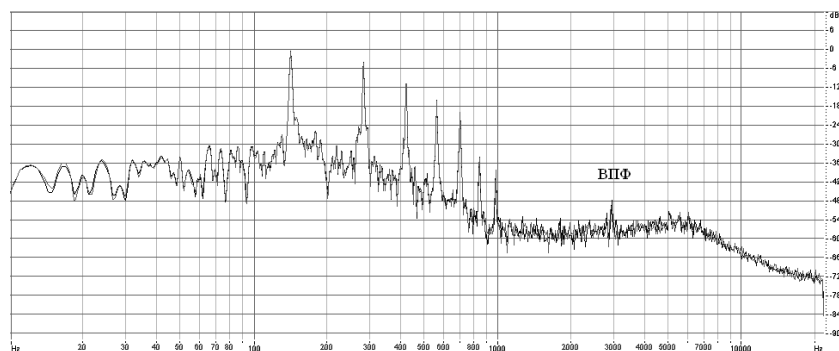


Рис. 5. Спектр вокальной гласной «У» в исполнении певца с диагнозом «ларингит», тон *d* (частота основного тона 146 Гц)

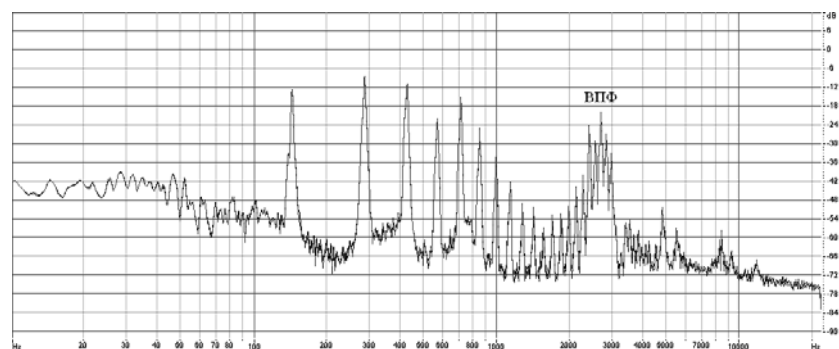


Рис. 6. Спектр вокальной гласной «У» в исполнении выздоровевшего певца, тон *d* (частота основного тона 146 Гц)

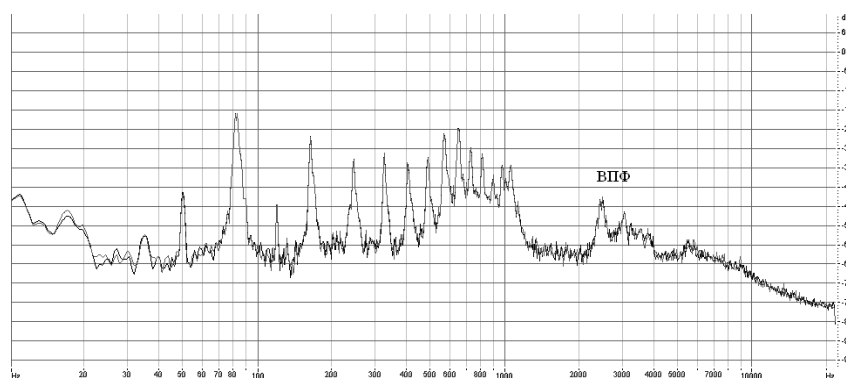


Рис. 7. Спектр вокальной гласной «А» в исполнении певца с диагнозом «ларингит», тон *E* (частота основного тона 82 Гц)

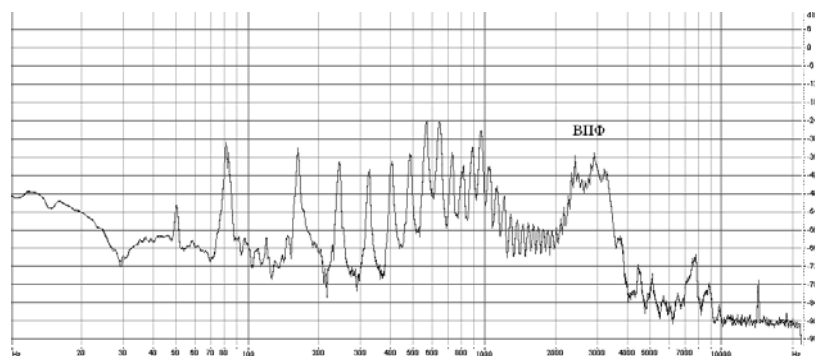


Рис. 8. Спектр вокальной гласной «А» в исполнении выздоровевшего певца, тон E (частота основного тона 82 Гц)

В воспаленном состоянии, когда голосовые связки не могут плотно смыкаться, образуя с помощью эффекта краевых тонов высокую певческую форманту, действует только эффект выделения этой области резонаторами голосового тракта (с указанной выше довольно низкой добротностью); из представленных на рис. 5...8 спектров видно, что этого эффекта явно недостаточно для формирования интенсивной ВПФ, присущей голосу того же певца в здоровом состоянии. Это так же подтверждает «двойной» механизм формирования ВПФ, возможность его объяснения на основе объединения двух теорий. Предлагаемый подход к образованию высокой певческой форманты дает более полную модель ее образования.

БИБЛИОГРАФИЧЕСКИЙ СПИСОК

1. Рудаков Е.А. Новая теория образования верхней певческой форманты // Применение акустических методов исследования в музыковедении: Сборник статей; ред. С.С. Скребков. – М.: Музыка, 1964. – С. 18-37.
2. Морозов В.П. Искусство резонансного пения. Основы резонансной теории и техники. ИП РАН, МГК им. П.И. Чайковского, Центр «Искусство и наука». – М., 2002. – 496 с.
3. Бакаев А.В. Особенности формирования высокой певческой форманты // Психология и фонология: их роль в воспитании молодых вокалистов: Сборник статей по материалам научной конференции 8-9 ноября 2007 г. / Гл. ред. – Л.В. Савина. – Астрахань: Изд-во ОГОУ ДПО АИПКП, 2007. – С. 311-315.
4. Харуто А.В. Тувинское горловое пение: акустический анализ и модель звукообразования // Сб. трудов XX сессии Российского акустического общества, секция «Акустика речи». – М., 2008. – С. 106-110.

Статью рекомендовал к опубликованию д.т.н., профессор Г.Г. Галустов.

Бакаев Александр Васильевич – Технологический институт федерального государственного автономного образовательного учреждения высшего профессионального образования «Южный федеральный университет» в г. Таганроге; e-mail: bakaev.av@yandex.ru; 347928, г. Таганрог, пер. Некрасовский, 44, ГСП 17А; тел.: 88634371632; кафедра теоретических основ радиотехники; к.т.н.; доцент.

Bakaev Alexander Vasilievich – Taganrog Institute of Technology – Federal State-Owned Autonomy Educational Establishment of Higher Vocational Education “Southern Federal University”; e-mail: bakaev.av@yandex.ru; GSP 17A, 44, Nekrasovsky, Taganrog, 347928, Russia; +78634371632; the department of fundamentals of radio engineering; cand. of eng. sc.; associate professor.