

Часть 17.5.2
Слух и речь, ч. 5.2
Акустические характеристики вокальной речи (продолжение)
Ирина Алдошина

В предыдущей статье были рассмотрены резонансные акустические характеристики вокальной речи, к числу которых относятся: образование особой певческой форманты, способы подстройки формант и др., что обуславливает особые интегральные акустические характеристики вокальной речи и создает проблемы с ее разборчивостью. В этой статье будет продолжен анализ акустических параметров, в первую очередь, таких важных для исполнительского и звукорежиссерского творчества, как образование вибрато и тремоло, а также использование различных регистров и связанных с этим изменений основных характеристик звукового сигнала.

Одним из средств музыкальной выразительности в пении является использование в процессе исполнения различных видов *модуляции* (изменения) параметров звукового сигнала. Такие изменения воспринимаются как тембровая особенность исполнения, придающая ему живость, полетность и т. п. Модуляция параметров широко используется не только в пении, но и при исполнении музыки на различных инструментах: струнных, духовых и др.

Как известно из физики, в простом гармоническом колебании возможно использование трех видов модуляции: амплитудной, частотной, фазовой. Модулированные колебания получаются в том случае, если какие-либо параметры сигнала (амплитуда, частота, фаза) начинают изменяться по заданному закону. Процесс управления параметрами звукового сигнала и называется его *модуляцией*. Простое гармоническое колебание полностью описывается тремя параметрами - амплитудой A_0 , частотой ω_0 и фазой φ_0 :

$$X(t) = A_0 \sin(\omega_0 t + \varphi_0).$$

Изменяя по определенному закону каждый из этих параметров, можно получить различные виды модуляции сигналов. Если меняется амплитуда сигнала, то этот процесс называется амплитудной модуляцией, если частота - частотной модуляцией, фаза - фазовой модуляцией.

Амплитудная модуляция (АМ): если происходит изменение амплитуды, то коэффициент A_0 будет уже не постоянным, а начнет меняться во времени $A(t)$. Это изменение можно производить, например, по гармоническому (синусоидальному) закону: $A(t) = A_0 \sin(\omega_1 t + \varphi_1)$, где ω_1 - частота изменения амплитуды, φ_1 - фаза ее изменения. Такой вид зависимости амплитуды сигнала от времени называется модулирующим колебанием; на практике его частота обычно много ниже частоты основного колебания (модулируемого): $\omega_1 \ll \omega_0$. В этом случае общее результирующее колебание может быть записано в следующем виде: $X(t) = A_0 (1 + M \sin(\omega_1 t + \varphi_1)) \sin(\omega_0 t + \varphi_0)$, где M называется коэффициентом модуляции, он равен отношению $M = A_1/A_0$, где A_1 - амплитуда модулирующего сигнала, A_0 - амплитуда исходного модулируемого сигнала. Величина M характеризует глубину амплитудной модуляции, то есть показывает, насколько амплитуда основного колебания меняется со временем, что воспринимается на слух, как небольшое изменение громкости.

Вид амплитудно-модулированного колебания при разных коэффициентах модуляции показан на рисунке 1. В музыкальном исполнительстве используются только сигналы с очень малым коэффициентом модуляции и низкой частотой изменения амплитуды, порядка 6...8 Гц. Такой вид изменения сигнала называется *тремоло*. В спектре модулированного таким образом сигнала имеется основной сигнал с частотой ω_0 и появляются два дополнительных сигнала с частотами $(\omega_0 + \omega_1)$ и $(\omega_0 - \omega_1)$ и амплитудами $A_0M/2$. Например, если несущий сигнал 1000 Гц промодулирован сигналом с частотой $\omega_1 = 10$ Гц, то появятся две боковые полосы 1010 Гц и 990 Гц. Таким образом, спектр АМ-сигнала расширяется по полосе, и ширина его равна $2\omega_1$ Гц. Если модулирующий сигнал содержит много гармоник, то спектр модулированного сигнала имеет вид, представленный на рисунке 2.

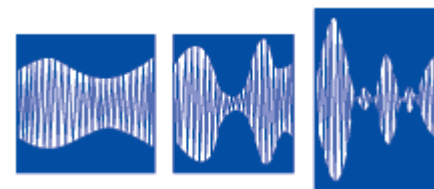


Рис. 1 Вид АМ-сигнала при разной глубине модуляции

Частотная модуляция (ЧМ): если в простом гармоническом колебании изменять по определенному закону частоту или фазу колебаний, то можно получить частотно- и фазомодулированные сигналы (ЧМ и ФМ). Если изменение частоты выполнить также по простому синусоидальному закону, то суммарное частотно-модулированное колебание будет иметь вид, показанный на рисунке 3, и может быть записано в виде (если считать $\varphi_0 = 0$): $X(t) = A_0 \sin(\omega_0 t + m \sin(\omega_1 t))$, где $m = \Delta\omega/\omega_1$ называется индексом однотональной частотной модуляции, $\Delta\omega$ - девиация (изменение) частоты исходного сигнала. В спектре такого сигнала также появляются боковые составляющие, не только пропорциональные частоте модуляции, но и ее гармоникам $(\omega_0 + n\omega_1)$, $(\omega_0 - n\omega_1)$. Структура спектра становится сложнее, с ростом индекса модуляции m увеличивается число спектральных составляющих, при этом происходит перераспределение энергии между ними, и расширяется ширина спектра, которая примерно равна $2(m+1)\omega_1$ Гц, то есть ЧМ-сигнал требует полосы частот больше в $(m+1)$ раз, чем АМ-сигнал, что имеет принципиальное значение (например, в радиовещании). Частотно-модулированные сигналы широко используются в вокальном и музыкальном творчестве и называются *вibrато* (обычно с частотой модуляции 5...10 Гц). На слух такая модуляция воспринимается как небольшие изменения высоты тона.

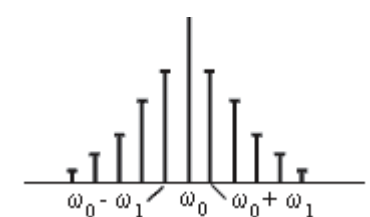


Рис. 2 Спектр АМ-сигнала

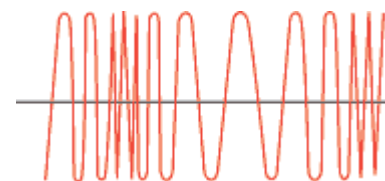
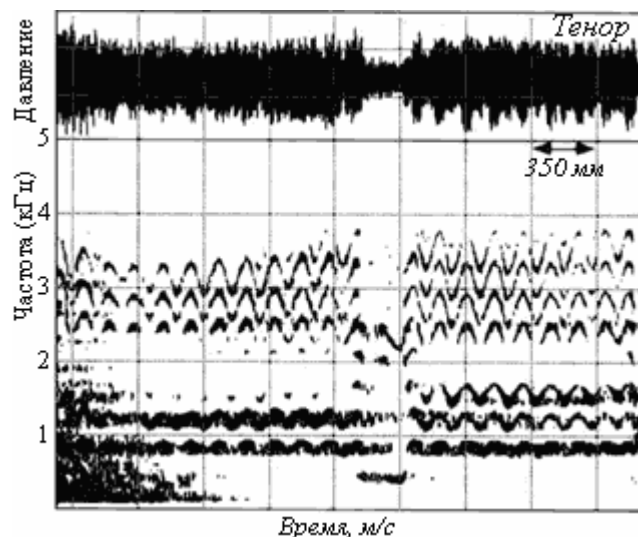


Рис. 3 Вид ЧМ-сигнала



При пении излучается сложный музыкальный многокомпонентный сигнал, и процесс модуляции его параметров представляет сложный взаимосвязанный процесс. Спектральный анализ записей оперных певцов показывает, что чаще всего в их пении используется частотная модуляция, пример показан на рисунке 4, то есть **вибрато**. Вибрато сопровождается и небольшой амплитудной модуляцией. В некоторых других видах пения (поп-музыке, народном пении и др.) иногда используется амплитудная модуляция, то есть **тремоло** (хотя в некоторых работах этот вид модуляции называется интенсивностное или амплитудное вибрато, а под термином "тремоло" понимается особый вид вибрато с большой частотой модуляции, мы будем придерживаться далее первого определения).

Рис. 4 Вибрато при оперном пении

Анализ особенностей модуляции в голосах выдающихся певцов, выполненный еще в 30-е годы в работах Сишора, затем в 80-е годы в работах Морозова, Сандберга, в современных работах Прейма и др. позволили выявить некоторые общие закономерности:

- в пении выдающихся оперных мастеров используется в основном частотная модуляция с частотой 5...7 Гц и глубиной модуляции ± 50 центов (что соответствует изменению от 31 до 98 Гц, в зависимости от расположения на частотной шкале).
- важной особенностью вибрато мастеров оперного вокального искусства (Т. Руффо, М. Баттистини, Ф. Таманьо, А. Патти, Н. Обухова, В. Собинов, И. Козловский, С. Лемешев и др.) является равномерная *периодичность* вибрато. Эта особенность иллюстрируется на рисунке 4. Форма модулирующей волны близка к синусоидальной, и даже если она отклоняется от синусоидальной, все равно сохраняется ее четкая ритмичность. А вот для голосов непрофессиональных певцов характерен неритмичный характер вибрато, что воспринимается как неустойчивость, неуверенность пения.
- значение частоты модуляции является характерной особенностью данного певца, хотя она (также как и глубина модуляции) может слегка видоизменяться в зависимости от высоты основного тона, силы голоса, типа гласной, длительности ее звучания и ряда других факторов. Существует также некоторая зависимость используемой частоты модуляции от типа голоса (рисунок 5).
- особо следует отметить, что параметры вибрато могут изменяться в зависимости от эмоциональной настроенности певца: при повышенном эмоциональном тоне при исполнении отдельных вокальных произведений частота вибрато в некоторых пределах возрастает.

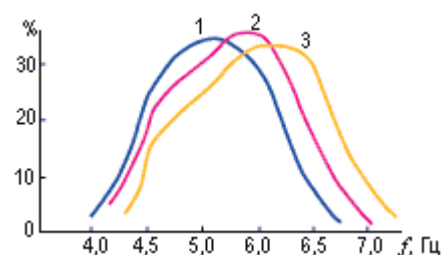


Рис. 5 Зависимость частоты модуляции от типа голоса

Использование частотной модуляции характерно в основном для оперного и камерного исполнения. В современной рок-музыке, где исполнение идет с огромным напряжением связок, модуляция практически не возникает, звук получается "прямым".

Механизм создания модуляции в вокальной речи (пении) исследовался с помощью электромиографии, т. е. измерения электрической активности мышц, которые показали, что в такт с колебаниями фундаментальной частоты, которые происходят с частотой модуляции, происходят сокращения мышц гортани: щитовидно-перстневидных (см. 1/2002), которые отвечают за удлинения связок и, соответственно, за изменение высоты тона. Кроме того, происходит изменение активности вокальных мышц и боковых черпаловидно-перстневидных мышц, отвечающих за разведение связок. Именно сокращения этих мышц служат причиной появления частотной модуляции. При этом, поскольку в колебаниях

участвуют и мышцы сведения связок, то в такт с частотой модуляции меняется и сила сведения связок, а это приводит к изменению подглоточного давления, которое служит причиной изменения амплитуды сигнала, что и порождает соответствующую амплитудную модуляцию.

Существует и другая причина создающая сопровождающую амплитудную модуляцию при вибрато: при колебаниях голосовых связок происходит модуляция потока воздуха, и получаемый при этом сигнал имеет гармонический спектр, достаточно богатый обертонами (рисунок 6). При вибрато происходит изменение значений фундаментальной частоты, при этом, синхронно с фундаментальной, варьируются и значения частот всех обертонов. Амплитуда обертона зависит от того, как далеко он находится от формантной области, при этом частоты формант при вибрато не смещаются. Поэтому при смещении частоты обертонов с частотой модуляции происходит увеличение или уменьшение их амплитуды в зависимости от того, дальше или ближе они перемещаются к формантной частоте. Поскольку общая громкость излучаемого сигнала зависит, в основном, от амплитуд обертонов внутри формантных областей, то происходит изменение громкости сигнала с частотой модуляции. Таким образом, при частотной модуляции, то есть использовании вибрато при пении, происходит и амплитудная модуляция сигнала, хотя она не так значительна.

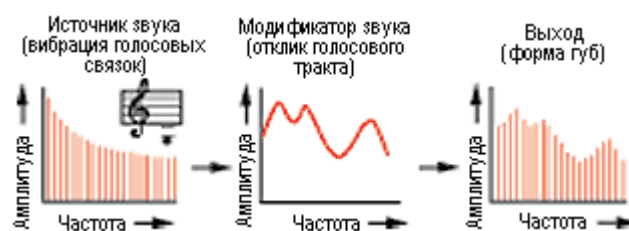


Рис. 6 Спектральный состав звука при колебаниях голосовых связок

Следует отметить, что существует специальный вид амплитудной модуляции, вызванный варьированием подглоточного давления, который воспринимается на слух как изменение громкости (тремоло) и применяется иногда в некоторых видах народного пения, но не используется в оперном или концертном исполнении.

Основные преимущества использования вибрато заключаются, прежде всего, в улучшении эстетического восприятия пения - звук кажется богаче (за счет обогащения спектра при модуляции), живее и т. д. Кроме того, существуют и объективные причины использования этого приема при пении, основные из которых следующие:

- применение вибрато уменьшает требования к точности настройки фундаментальной частоты, т. е. высоты тона. Исследования показали, что хотя при модуляции меняется основная частота, а, следовательно, и высота тона, но если частота модуляции лежит в пределах 6...7 Гц при глубине модуляции ± 40 центов, то слух как бы усредняет значения частоты, и воспринимает некоторую среднюю высоту тона. Если частота модуляции ниже 5 Гц, становятся слышны колебания высоты ("качания"), голос кажется очень напряженным (старческим). Если частота модуляции выше 7 Гц, голос воспринимается нервным, "дрожащим". Таким образом, диапазон изменения частоты модуляции 6...7 Гц оказывается оптимальным;
- использование вибрато уменьшает требования к точности настройки интервалов, и помогает скрыть биения, возникающие при неточной настройке голосов при полифоническом исполнении. К биениям слух очень чувствителен, порог чувствительности к расстройке частоты составляет меньше трех центов;
- применение вибрато повышает помехозащищенность голоса, поскольку максимальная чувствительность слуха к частотно-модулированным сигналам совпадает с областью 5...7 Гц, а это позволяет лучше выделять этот сигнал на фоне помех;
- вибрато повышает разборчивость звуков, особенно при пении в высокой tessiture,

поскольку смещение обертонов по частоте приводит к увеличению или уменьшению их амплитуд в зависимости от их позиции по отношению к формантным частотам. Это помогает также идентифицировать формантные области, а именно они служат основой распознавания гласных звуков.

Таким образом, выбор частоты модуляции в диапазоне 5...7 Гц оказался наилучшим образом согласованным с возможностями слуховой системы. Максимальная чувствительность слуха к этой области частот модуляции развилась, по-видимому, в процессе восприятия речи, которая представляет собой частотно- и амплитудно-модулированный процесс. С другой стороны, именно эти частоты модуляции легче всего могут быть реализованы мышечным аппаратом человека, в частности, общий резонанс дыхательной системы человека равен 6 Гц.

Использование модулированных (меняющихся во времени) звуков свойственно практически всем видам исполнения, поскольку они учитывают особенность организации слуховой системы человека, в которой при монотонном звучании выключаются нейроны, реагирующие на изменение звуковых сигналов ("нейроны новизны"), и у слушателя теряется интерес к исполнению. А модуляция сигналов поддерживают его внимание.

Кроме того, как считает Сандберг (один из самых известных в мире специалистов по акустике речи и пения, руководитель центра при Шведской Академии музыки), пение с вибрато сигнализирует слушателю, что процесс происходит легко, без фонационных проблем, а это усиливает его эстетическое восприятие.

Следует отметить, что поскольку вибрато (и тремоло) являются средствами для выделения голоса (привлечения к нему внимания), то использование его в хоровом пении может создать проблемы.

Поэтому певцы, воспитанные в сольной манере пения, не всегда вписываются в ансамбль.

В целом, поскольку наличие модуляции в голосе является дополнительным средством художественной выразительности, а современные возможности компьютерных технологий позволяют создать практически любые виды амплитудной, частотной и фазовой модуляций, то этим средством могут достаточно широко пользоваться звукорежиссеры в процессе обработки вокальной речи. Правда, всегда надо ориентироваться на естественные параметры модуляции, иначе голос будет звучать неестественно.

Специфической особенностью вокальной речи является использование различных певческих *регистров* - в обычной речи они используются только в случаях крайних эмоциональных состояний. В идеале голос должен производить все доступные ему звуки без резких изменений в тембре, но на практике это недостижимо. По поводу определения и классификации регистров в научной литературе имеются противоречивые мнения. Наиболее распространенным является следующее определение: "Регистр - фонационный ряд частот, в котором все звуки звучат одинаково по тембру (при этом, по-видимому, они и создаются подобным образом)". Переход от одного регистра к другому отражает изменения в фонационной технике, то есть изменения взаимодействия мускул гортани и голосовых связок. Смена регистров ощущается как сдвиг в фонационной частоте (высоте тона), и как изменение тембра. При этом происходит и изменение других акустических характеристик звукового сигнала: изменение формы спектральной огибающей, структуры атаки и спада и др. Поскольку смена регистров используется в пении как средство художественной выразительности, то анализ происходящих при этом изменений акустических характеристик может оказаться полезным в практике работы звукорежиссера при обработке голоса.

Для классификации и названий регистров в разных вокальных школах используются совершенно разные понятия, в итальянской школе, например, выделяется три регистра: грудной (chest), средний (middle), головной (head) в женском голосе, и грудной (modal, normal), головной и фальцет (falsetto) в мужском голосе, со звуковысотными диапазонами, показанными на рисунке 7. Обычно принято считать, что механизмы голосообразования сильно различаются в нижних ("тяжелых") и верхних ("легких") регистрах; средние регистры сочетают качества их обоих. Басы и контральто поют почти исключительно в тяжелых регистрах, используя легкие регистры иногда на высших нотах (например, для комического эффекта). Колоратурные сопрано поют в легких регистрах, иногда используя "тяжелый" механизм на низших нотах - но никогда не поют только в грудном регистре. Иногда дополнительно выделяются в самом верхнем диапазоне женского голоса "свистящие" регистры, или очень низкие регистры в мужском голосе (так называемый "strobass").



Рис. 6 Спектральный состав звука при колебаниях голосовых связок

Отдельные регистры перекрываются по частоте, и некоторые певцы могут петь одни и те же ноты в разных регистрах. Например, в женских голосах области перекрытия: грудной-средний (chest-middle) 400 Гц, нота "соль" первой октавы, средний-головной (middle-head) 660 Гц, нота "ми" второй октавы. В мужских голосах зона перекрытия 200...350 Гц.

Главная задача вокальной педагогики - сделать переход от одного регистра к другому плавным, уменьшить вариации тембра так, чтобы этот переход был почти незаметен при восприятии. У неопытных певцов иногда происходит перелом - срыв в фальцет.

Механизм образования регистров лежит в изменении свойств голосового источника - гортани и голосовых связок. На колебания связок оказывают влияние аэродинамические факторы (величина подглоточного давления), мышечные (миоэластические) факторы, зависящие от натяжения основных видов мышц (вокальных, щитовидно-перстеновидных, щитовидно-черпаловидных и др.), а также упруго-механические свойства всех трех слоев самих голосовых связок.

В простейшем приближении частоты колебаний голосовых связок определяются так же, как для обычной струны:

$$f = 0,5 \sqrt{\frac{T}{l \cdot m}}$$

Как следует из этой формулы, для увеличения частоты фонации необходимо увеличивать натяжение (T), однако при этом меняется длина голосовых связок (l) и уменьшается их поверхностная плотность. В целом, при увеличении натяжения частота колебаний голосовых связок возрастает.

Таким образом, частота фонации зависит от натяжения и массы (m), поэтому при пении на низких частотах связки расслабленные, толстые и короткие, а на высоких - тонкие, длинные и напряженные. Повышение основной частоты почти линейно связано с удлинением связок.

Можно выделить два вида натяжения в голосовых связках - *внутреннее* и *внешнее*, при изменении которых происходит изменение массы, упругости и общей формы связок, то есть их длины, толщины, ширины и т. д.

Внутреннее натяжение определяется сжатием вокальных мышц, находящихся непосредственно внутри голосовых связок - при этом связки становятся короче и жестче, и за счет этого меняется фундаментальная частота их колебаний.

Внешнее натяжение происходит за счет межперстневидно-щитовидных мышц, которые при вращении щитовидного хряща относительно перстневидного (рисунок 8) обеспечивают как натяжение, так и удлинение голосовых связок. Взаимодействие этих двух видов мышц, а также черпаловидных мышц обеспечивает как изменение фундаментальной частоты, так и изменение тембра звучания, то есть переход к разным регистрам.

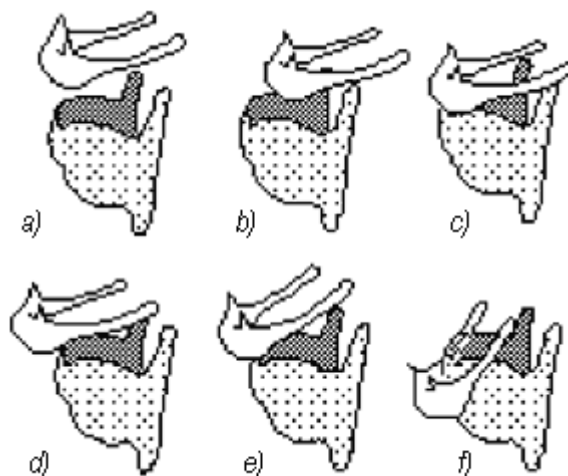


Рис. 8 Работа гортани при смене регистров

В "тяжелых" и "легких" регистрах механизм взаимодействия мышц гортани и соответственно формы колебаний голосовых связок существенно различаются.

В грудном регистре вокальные мышцы активны, они делают связки толстыми и короткими, натяжение связок при этом сравнительно небольшое:

- связки колеблются целиком всей массой и плотно прилегают друг к другу, закрытие и открытие вокальных связок начинается у нижней поверхности, пока сила давления не разомкнет их по всей толщине, при этом возникает вдоль толщины волна смещения;
- длительность их смыкания превосходит время размыкания. Вид модулированного потока воздуха показан на рисунке 9;
- периодические резкие толчки воздуха дают полный звук, богатый обертонами, амплитуда которых слабо убывает с частотой, придавая голосу богатый оттенок. Спектр звука в этом регистре показан на рисунке 6;
- энергия, подводимая от легких, довольно эффективно преобразуется в звуковую энергию, то есть КПД преобразования энергии достаточно высокое;

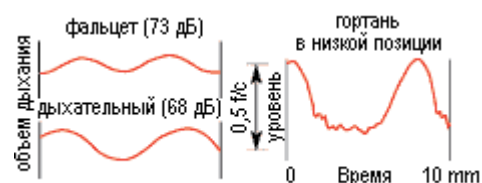


Рис. 9 Модуляция потока воздуха в грудном регистре и фальцете

- моды колебаний связок в этом регистре показаны на рисунке 10. Как видно из рисунков, в связках возникают разные формы (моды) колебаний в трех разных плоскостях: полуволновой резонанс в горизонтальной плоскости, полуволновой в вертикальной плоскости, и четвертьволновой вдоль толщины связок.
- при таком звуке на передней грудной клетке происходят сильные вибрации, поэтому его называют "грудным".

Таким образом, в тяжелых регистрах преобладают мышечные факторы внутри голосовых связок, при этом потребляемый объем воздуха должен быть достаточно большим.

Исследования показали, что пока вокальные мышцы активны, голос держится в модальном грудном регистре. Когда начинает ослабевать напряжение вокальных мышц, голос начинает переходить в легкие регистры.

Легкий регистр (фальцет, головной) характеризуется тем, что в нем голосовые связки колеблются иначе: внутренние вокальные мышцы расслаблены, натяжение определяется в основном внешними мышцами, связки становятся длиннее примерно на 30%, и тоньше, меньше масса на единицу длины:

- продольное напряжение в связках сравнительно высокое, причем во всех трех слоях, амплитуда их вибраций довольно мала, в колебаниях принимает участие только внешняя кромка связок, голосовая щель только сужается-расширяется, происходит ослабление-усиление струи воздуха, а не полное ее прерывание, как при грудном регистре;
- закрытие голосовой щели короткое и неполное из-за большого натяжения связок, больше 70% цикла связки остаются открытыми. Это приводит к изменению модуляции воздушного потока, и более "дыхательному" звучанию голоса. (рисунок 10) ;
- фальцетный регистр не богат обертонами, спектр показан на рисунке 11. Колебаний грудной клетки почти нет;

- конверсия легочной энергии в звуковую энергию менее эффективна, и звуки не такие громкие;
- формы колебаний связок в этом регистре показаны на рисунке 10: в горизонтальной плоскости полуволновой резонанс, резонанс по толщине отсутствует, в вертикальной плоскости 3/4-волновой резонанс (второй).

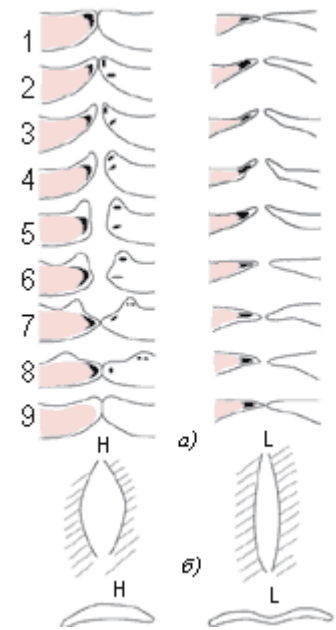


Рис. 10 Формы колебаний голосовых связок в грудном регистре и фальцете

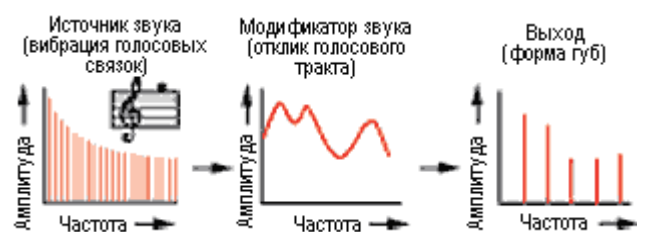


Рис. 11 Спектр звуков в высоком регистре

При дальнейшем повышении высоты звука голосовая щель укорачивается и подвигается к передней половине голосовых связок, ближе к черпаловидным хрящам, при этом задняя половина связок остается плотно сжатой и в колебаниях не участвует - связки имеют вид Y. Такие частичные колебания связок возможны благодаря особому строению голосового

мускула.

В этом диапазоне частот начинают превалировать аэродинамические факторы, мускулы уже не могут сокращаться при дальнейшем повышении высоты тона. Воздух, проходя мимо сильно напряженных связок, создает турбулентный шум, поэтому иногда эту часть диапазона называют свистящим регистром. Образование звуков в этом случае происходит аналогично тому, как это имеет место в лабиальных духовых инструментах (флейте) за счет краевых тонов. Певцы редко пользуются только грудным или только фальцетным регистром, и избегают быстрых переходов от одного к другому. Одним из средств незаметного перехода от грудного регистра к фальцетному служит механизм смешанного голоса (средний регистр), когда характерное для грудного регистра напряжение вокальных мышц начинает ослабевать, и заменяется постепенно увеличивающимся напряжением внешних растягивателей. Ширина этого регистра разная для разных типов голосов. При пении резкая смена тембров воспринимается как изменение регистра. Таким образом, смена регистров - сложный процесс, связанный в первую очередь с изменением свойств голосового источника: формой колебаний голосовых связок, изменением взаимодействия различных мышечных структур гортани, формой модуляции воздушного потока и др.), который требует отработки при постановке голоса.

Однако, учитывая специфику изменений акустических характеристик, происходящих при смене регистров, звукорежиссер в процессе обработки вокала может исправить нежелательные изменения звукового сигнала, приводящие к изменению тембра.