

Лекция 8. ЧАСТОТНАЯ ОБРАБОТКА СИГНАЛОВ

Частотная или спектральная обработка звуковых сигналов осуществляется с помощью частотных корректоров в процессе передач, записей, сведения и сложного монтажа.

Частотные корректоры применяются звукорежиссерами для улучшения качества звучания отдельных исполнителей, получения специальных звуковых эффектов и уменьшения неравномерности АЧХ, возникшей из-за особых условий записи.

- Улучшение качества звучания с помощью частотного корректора достигается, в частности, подъемом области спектра 2,5...3,5 кГц. Этим можно частично компенсировать у отдельных певцов недостаток верхней певческой форманты и тем самым улучшить «полетность» голоса, способность «прорезать» оркестр.

- Влияние плохой дикции и дефектов речи неподготовленного участника передачи могут быть частично исправлены введением затухания в области НЧ, подавлением определенной области спектра режекторными фильтрами в средней части частотного диапазона или срезом высоких частот.

- При записи вокально-инструментальной музыки корректоры АЧХ (особенно резонансные фильтры) позволяют подчеркнуть характерные особенности звучания инструментов, выделить их на фоне массивной оркестровки.

- Необходимость в уменьшении неравномерности АЧХ возникает при музыкальном и речевом исполнении в случайных, акустически неприспособленных помещениях (там возникают нежелательные резонансы его объема, которые можно подавить).

Эффективным методом использования корректоров спектральной обработки является деформация АЧХ не в прямом, а в дополнительном канале со смешиванием скорректированного и нескорректированного сигналов (рисунок 8.1).

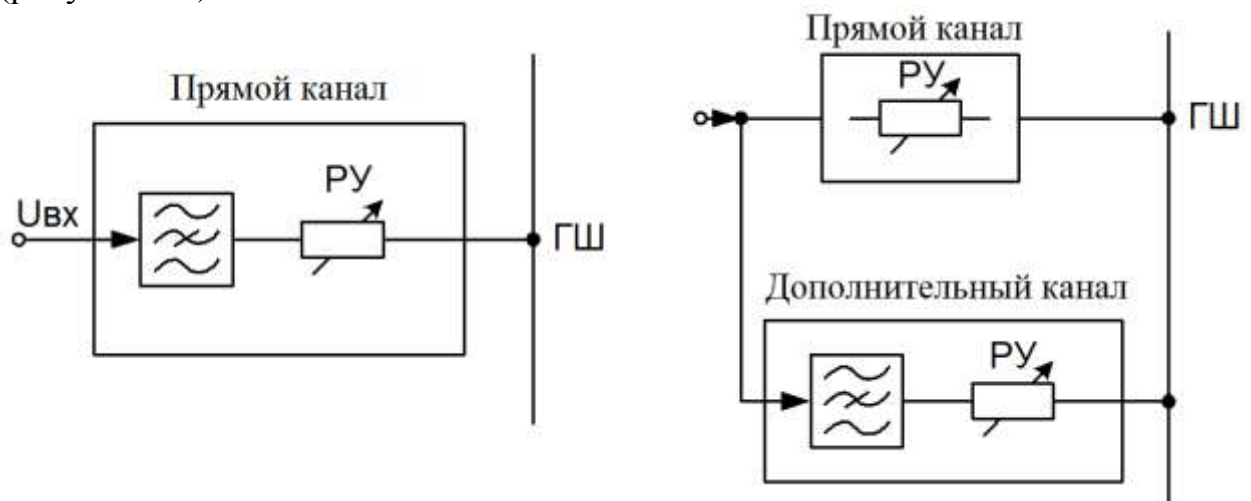


Рисунок 8.1 – Схемы корректоров спектральной обработки

Соотношение между сигналами прямого и дополнительного каналов устанавливается регуляторами уровня (РУ).

Типы частотных корректоров.

1. Фильтры подъема верхних частот.
2. Фильтры плавного подъема и спада НЧ и ВЧ.
3. Фильтры среза НЧ и ВЧ.
4. Фильтры присутствия («презенс»-фильтры).
5. Графические корректоры (эквалайзеры) и другие.

Порядок фильтра – это число, показывающее наивысшую степень математического полинома, который аппроксимирует частотную характеристику этого фильтра. Термин “порядок фильтра” всего-навсего определяет конечную крутизну среза его АЧХ за пределами полосы пропускания (рисунок 8.2). “Одному порядку” фильтра соответствует конечная крутизна среза в 6дБ/октава. Т.е. если у вас фильтр, скажем, третьего порядка - то его конечная крутизна среза будет $6 \times 3 = 18 \text{ дБ/октава}$. Если четвертого - то 24 дБ/октава , и так далее.

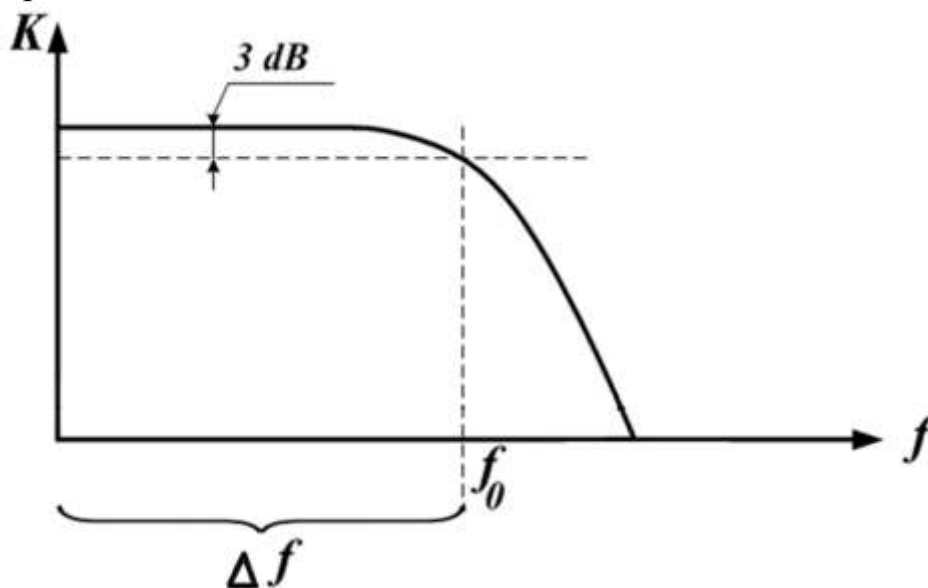


Рисунок 8.2 – АЧХ ФНЧ

Полоса пропускания, рассматриваемого ФНЧ (Low-pass фильтра) - это полоса частот от самых низших (как бы от “нулевой частоты”) до той частоты, на которой коэффициент передачи фильтра уменьшится на 3дБ. Эта вторая частота (f_0) называется частотой среза фильтра. (Так уж договорились “электронщики всего мира”, по умолчанию для удобства и взаимопонимания определять граничные частоты по уровню “-3дБ”.) В случае, если по каким-либо причинам бывает необходимо указать граничные частоты по другому уровню, то это всегда должно оговариваться. Если же особо не оговорено, то частота среза всегда определяется указанным выше образом. После нее коэффициент передачи фильтра более-менее равномерно уменьшается (спадает) со скоростью (крутизной), определяемой порядком фильтра.

Здесь необходимо сделать небольшое пояснение. Говоря о крутизне среза АЧХ фильтра за пределами полосы пропускания, мы не зря сделали оговорку именно о *конечной* крутизне среза. В зависимости от *типа* фильтра, в окрестностях частоты среза эта величина может быть существенно иной.

Для сравнения различных типов фильтров между собой на следующих рисунках приведены АЧХ фильтров Бесселя (рисунок 8.3), Баттерворта (рисунок 8.4) и Чебышева (рисунок 8.5). Эти характеристики были рассчитаны для фильтров 4-го порядка с частотой среза в 1 кГц. Фильтры высоких порядков (как правило, выше второго) наиболее часто создаются путем каскадного (последовательного) соединения фильтров более низких порядков. В данном случае фильтры 4-го порядка созданы как обычно, путем последовательного соединения двух фильтровых звеньев второго порядка.

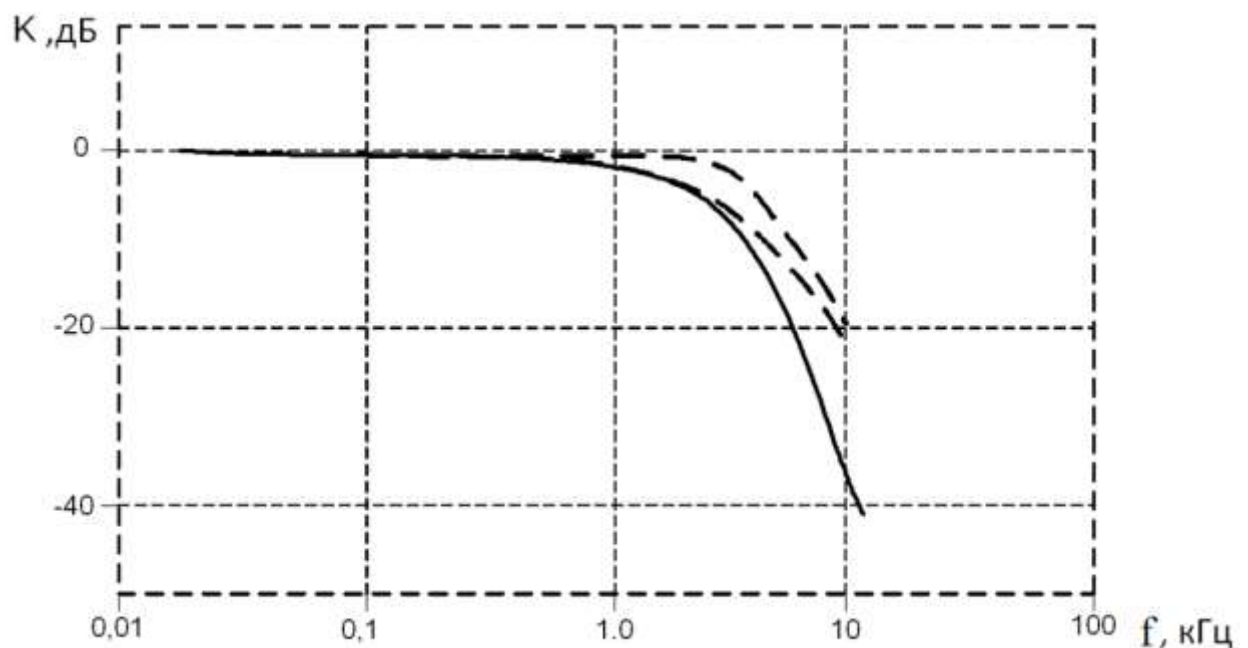


Рисунок 8.3 – АЧХ фильтра Бесселя

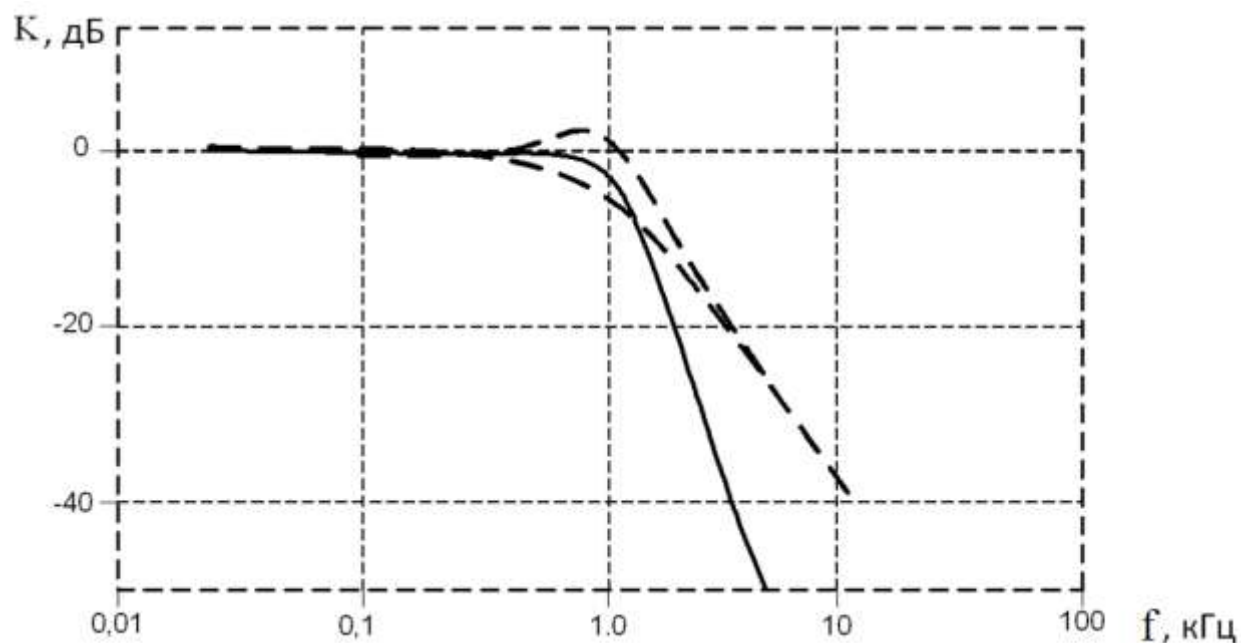


Рисунок 8.4 – АЧХ фильтра Баттерворта

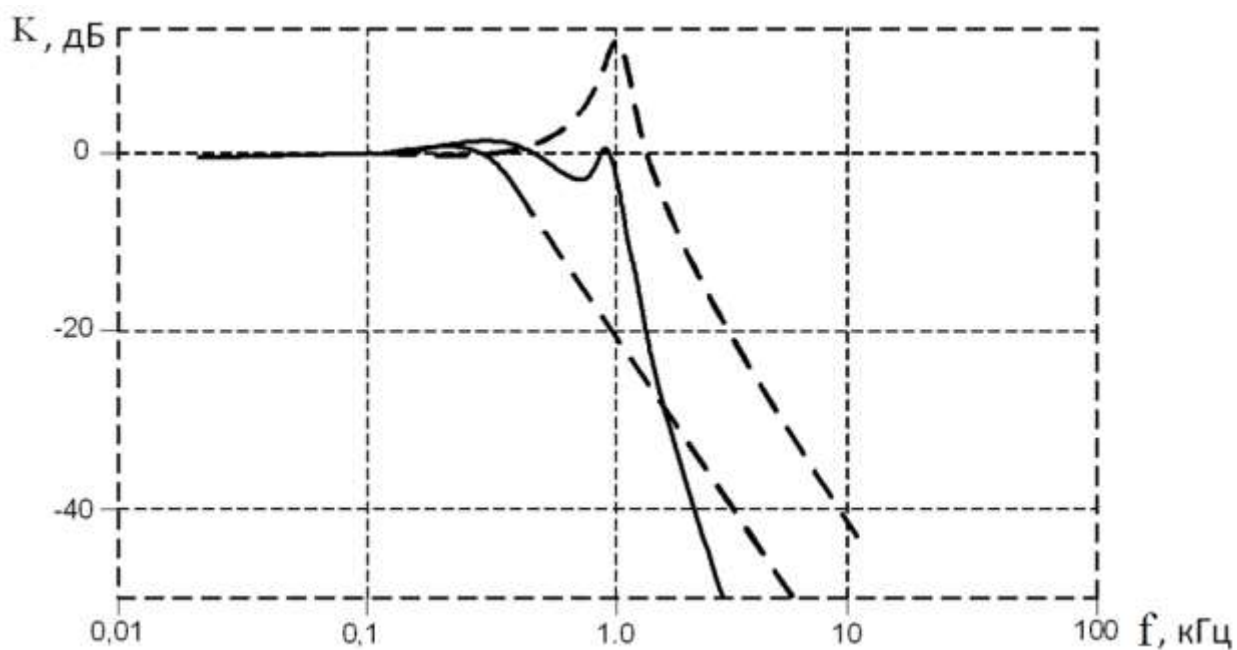


Рисунок 8.5 – АЧХ фильтра Чебышева

На этих рисунках отображены как АЧХ отдельных звеньев (пунктирные линии), так и суммарная АЧХ всего фильтра (сплошная линия).

Очевидно, что фильтр Бесселя, с точки зрения именно (и *только!*) его *фильтрующих свойств* – выглядит наихудшим, а Чебышева – наилучшим. Однако - это только с *этой* точки зрения. Однако надо не только хорошо отфильтровать ненужное, но и *максимально хорошо* передать нужное. Вот с точки зрения именно *передачи нужных сигналов* – ситуация, что называется, “с точностью до наоборот”.

АЧХ составляющих фильтры звеньев в фильтре Бесселя максимально гладкая, без выбросов. В фильтре же Чебышева имеется весьма значительный пик на АЧХ одного из звеньев.

На первый взгляд, казалось бы – ну, и что тут такого? Подумаешь, выброс! Суммарная-то АЧХ, вроде, вполне приемлемая? Если бы так... Дело в том, что из-за этого пика на АЧХ при подаче на вход данного звена импульсного сигнала, или просто любого сигнала с крутым фронтом - схема начнет “звенеть”, т.е. в момент появления указанного фронта она будет сама генерировать постепенно затухающий сигнал с частотой, соответствующей положению этого пика на АЧХ звена. А ведь в исходном-то сигнале его нет!

Да и просто, при подаче сигнала большой амплитуды, совпавшего по частоте с частотой этого пика, фильтр может элементарно перегрузиться и внести в сигнал тривиальнейшие искажения. Кроме этого, суммарная АЧХ фильтра Чебышева чисто принципиально всегда имеет неустранимые неравномерности (так называемые “пульсации”) в полосе пропускания. Они, конечно, могут быть несколько меньшими, чем в этом примере, но сути дела это не меняет.

Фильтр же Баттерворта среди рассмотренных, наиболее распространенных в звукотехнике типов фильтров, занимает некоторое промежуточное положение. Он имеет (при “прочих равных”) достаточно плоскую, без выбросов и пульсаций, АЧХ в полосе пропускания и вполне удовлетворительную крутизну среза АЧХ за пределами этой полосы. Благодаря этим своим свойствам он и получил наибольшее распространение в звуковой аппаратуре среди всех рассмотренных выше типов фильтров.

На следующих рисунках показаны фазо-частотные характеристики, т.е. зависимость вносимого фильтром фазового сдвига от частоты (ФЧХ) для рассматриваемых нами фильтров - Бесселя (рисунок 8.6), Баттерворта (рисунок 8.7) и Чебышева (рисунок 8.8).

Здесь видно, что ФЧХ фильтра Бесселя - самая ровная, Баттерворта – несколько менее ровная, но тем не менее сохраняющая монотонность (т.е. без изломов), Чебышевская же - и существенно неровная, и немонотонная, имеет довольно резкие изломы. Таким образом, если внимательно рассмотреть совокупность всех иллюстраций по фильтрам, то последует вывод, что фильтр с самой гладкой АЧХ - имеет и самую ровную ФЧХ, а с самой неравномерной АЧХ – будет иметь и самую плохую ФЧХ. Естественно, что это распространяется на все вообще, относящееся к фильтрам. Т.е. чем выше порядок фильтра, чем лучше его фильтрующие свойства (крутизна среза АЧХ) - тем хуже будет его ФЧХ.

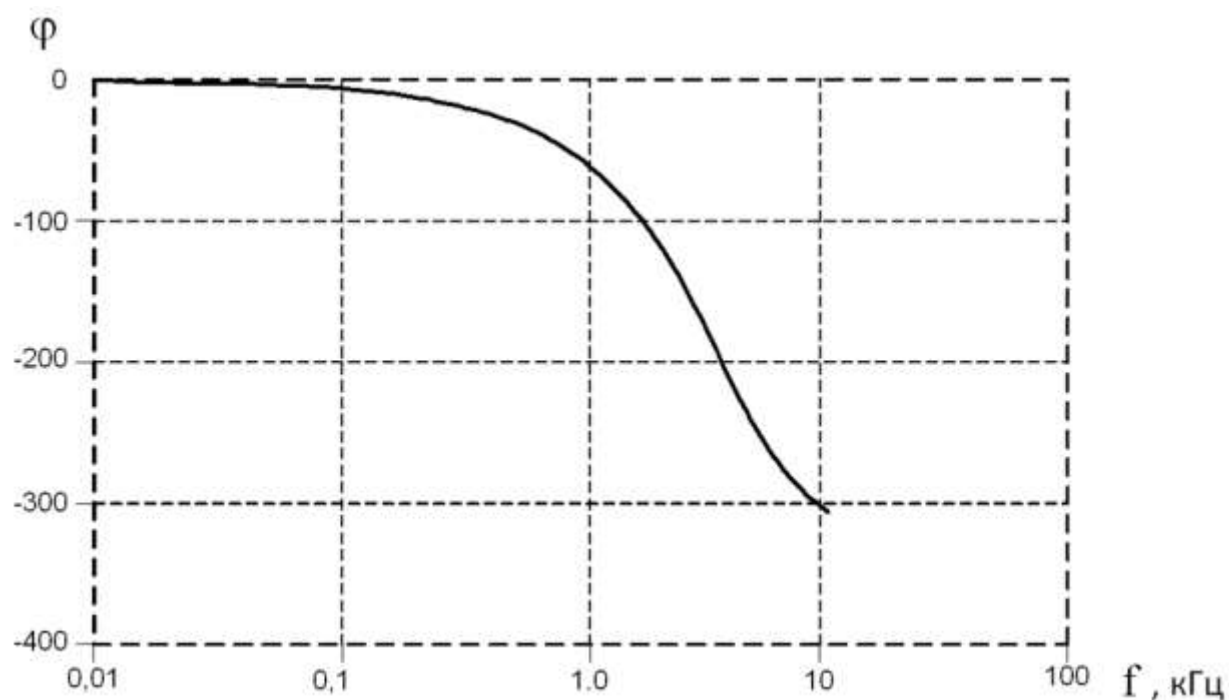


Рисунок 8.6 – ФЧХ фильтра Бесселя

Возникает вопрос, к чему приводит неровная ФЧХ? Дело в том, что ФЧХ устройства самым непосредственным образом отображает его способность передавать *форму* сигналов - без изменения, с приемлемыми небольшими изменениями, или же вообще - исказив ее до полной неузнаваемости. Ведь если какая-либо цепь имеет нелинейную ФЧХ, то это значит, что различные частотные составляющие сигнала изменяются (сдвигаются) по фазе по-разному, и как следствие – изменяется сама форма этого сигнала.

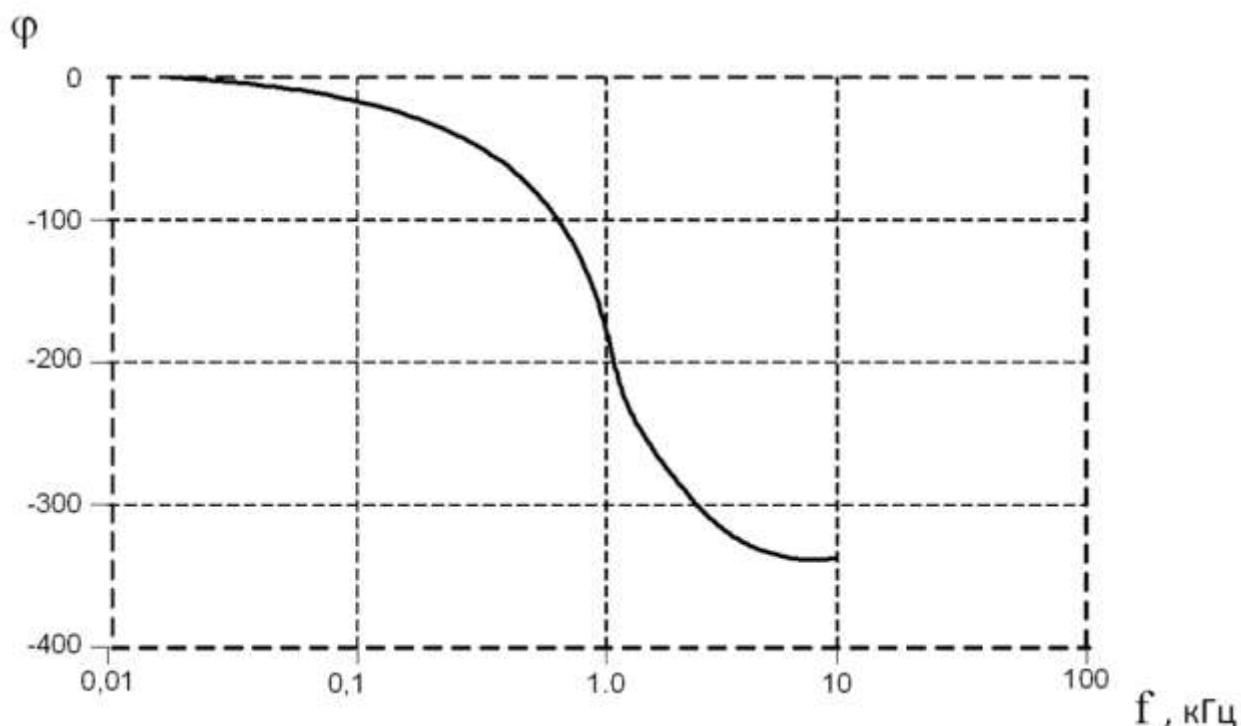


Рисунок 8.7 – ФЧХ фильтра Баттерворта

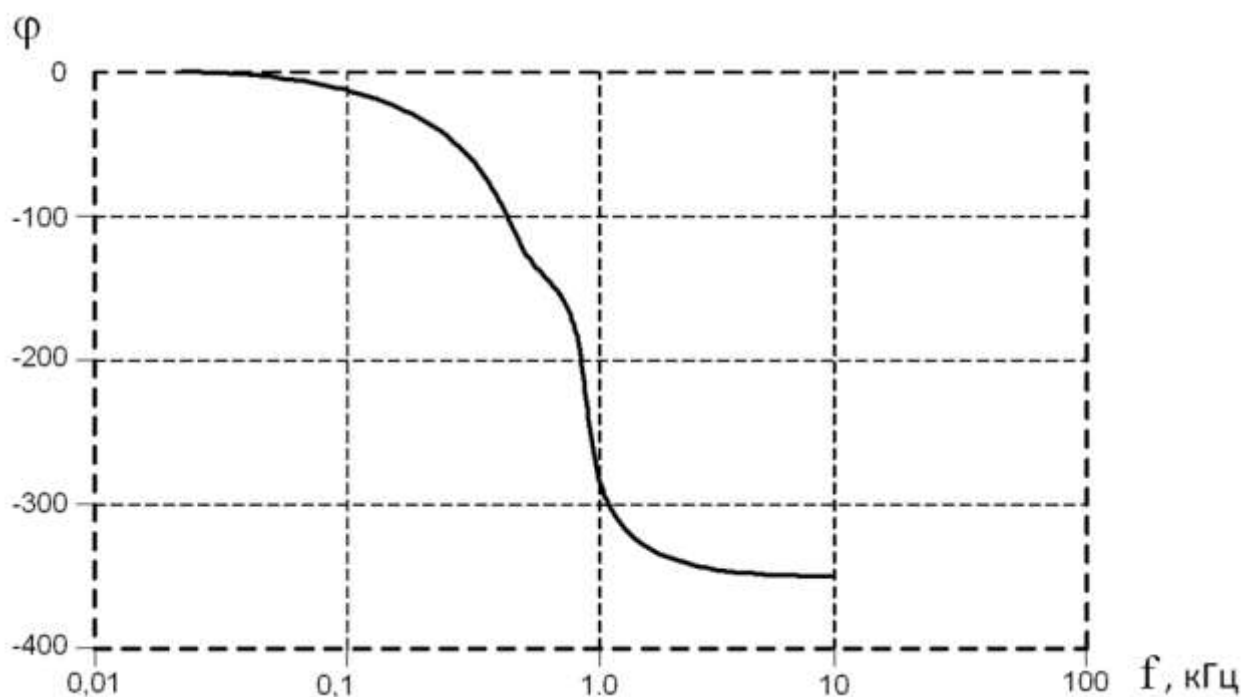


Рисунок 8.8 – ФЧХ фильтра Чебышева

А в последнее время и в литературе, и в практике звукотехники все большее внимание уделяется как раз вопросам максимально точной передачи именно формы исходных сигналов – а, значит, и линейности ФЧХ. Заметим здесь, что речь идет именно о *линейности* ФЧХ, а не о том, чтобы она была *плоской*, как в случае АЧХ. Если ФЧХ – наклонная линия, но *линейная*, т.е. прямая – то это означает, что весь сигнал всего-навсего задерживается на какой-то интервал времени, а это уже не имеет непосредственной связи с возможными его искажениями.

Таким образом, различные типы фильтров – будут давать и различные результаты при их применении. И при выборе фильтра для своего конкретного применения вам необходимо в первую очередь решить, что именно будет главным? Если необходимо максимально хорошо передать сам сигнал, а качество собственно фильтрации – вторично, то необходим фильтр Бесселя. (Эта ситуация возникает, например, при конструировании акустических колонок. Ведь НЧ-излучатель по своей сути – это именно ФВЧ (Low-cut фильтр)). Если же важнейшим является именно качество фильтрации, а качество передачи самого сигнала особой роли не играет – то лучше применить фильтр Чебышева, и желательно более высокого порядка. Например – на радио, при выдаче в эфир сигнала с телефонной линии. При этом достаточно часто желательно даже применить одновременно два фильтра, ФВЧ и ФНЧ (Low-cut и High-cut).

Фильтры плавного подъема и спада АЧХ. Такие фильтры позволяют звукорежиссеру изменять в широких пределах спектральные характеристики отдельных источников в области нижних и верхних частот звукового диапазона (рисунок 8.9).

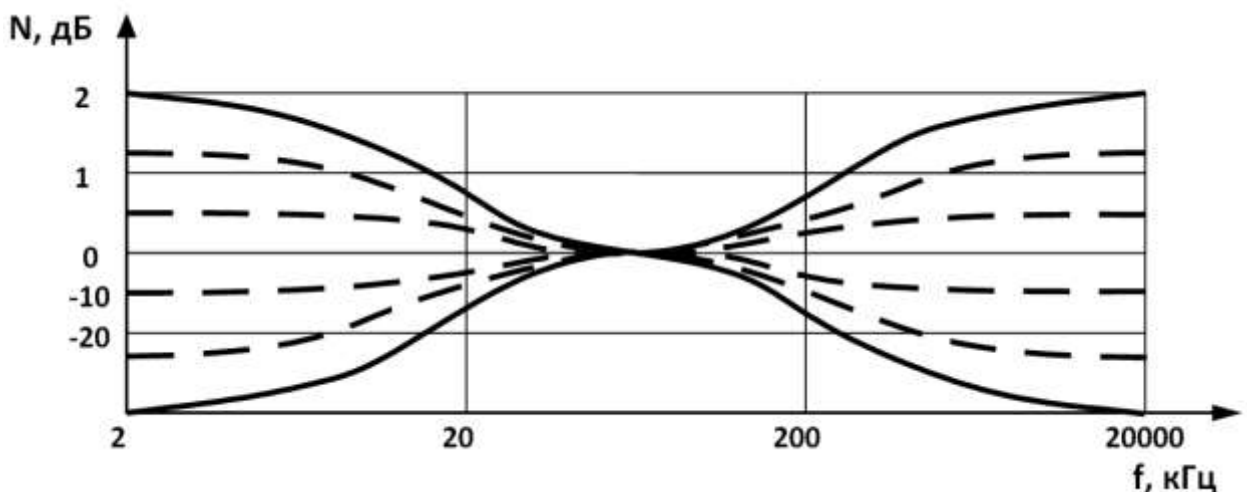


Рисунок 8.9 – АЧХ фильтров плавного подъема и спада

Такие фильтры позволяют регулировать сигнал на крайних частотах до ± 20 дБ плавно или ступенями и тем самым добиваться естественного звучания при акустических дефектах студии, несовершенстве микрофонов или неудачном их расположении.

С помощью таких фильтров можно подчеркнуть характерные оттенки исполнителей, изменить в значительной степени характер звучания, чтобы придать ему новизну и оригинальность. Субъективно применение любого фильтра воспринимается как изменение *тембра* первичного сигнала.

Фильтры среза (рисунок 8.10). Эти фильтры также позволяют изменить характер звучания.

Можно создавать такие звуковые эффекты, как:

- «разговор по телефону»;
- «передача по радио»; и др.

Чаще всего эти фильтры используют:

- для ослабления НЧ фона (от освещения, блоков питания);
- для ослабления ВЧ шума магнитной ленты;
- для ослабления НЧ и ВЧ помехи при студийных записях и реставрации старых фонограмм.

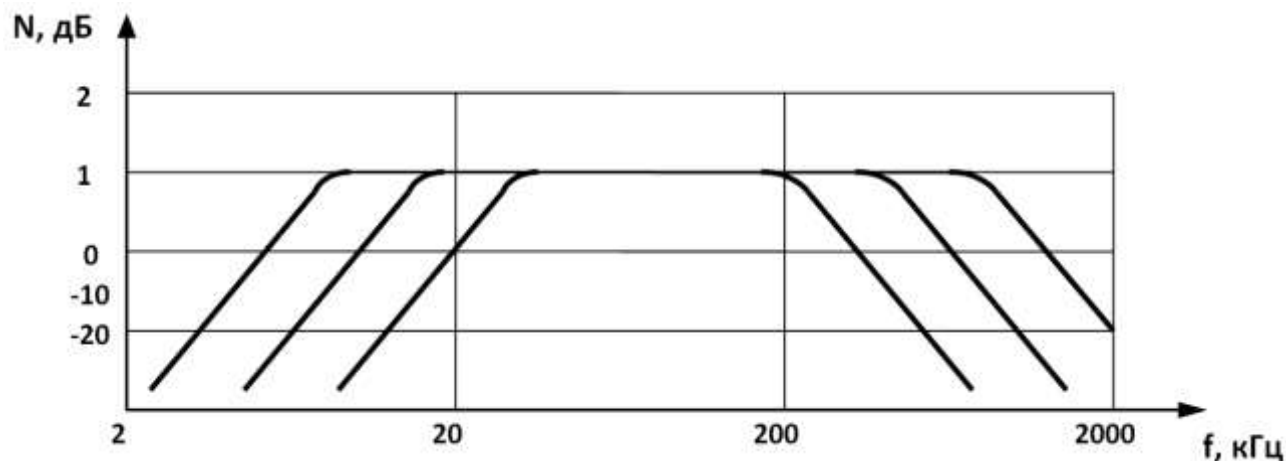


Рисунок 8.10 – АЧХ фильтров среза

Фильтры присутствия («презенс»-фильтры). Обеспечивают эффект присутствия слушателей около исполнителя или исполнителя около слушателя. Эти фильтры позволяют подчеркнуть область средних частот, где расположены певческие и инструментальные форманты, что делает звучание певцов-солистов или отдельных инструментов более сочным и ярким, как бы выделенным из общей звуковой картины и приближенной к слушателю.

Фильтры присутствия позволяют выделять относительно узкие участки спектра в диапазоне частот 700...4000 Гц при подъеме до 10 дБ (рисунок 8.11).

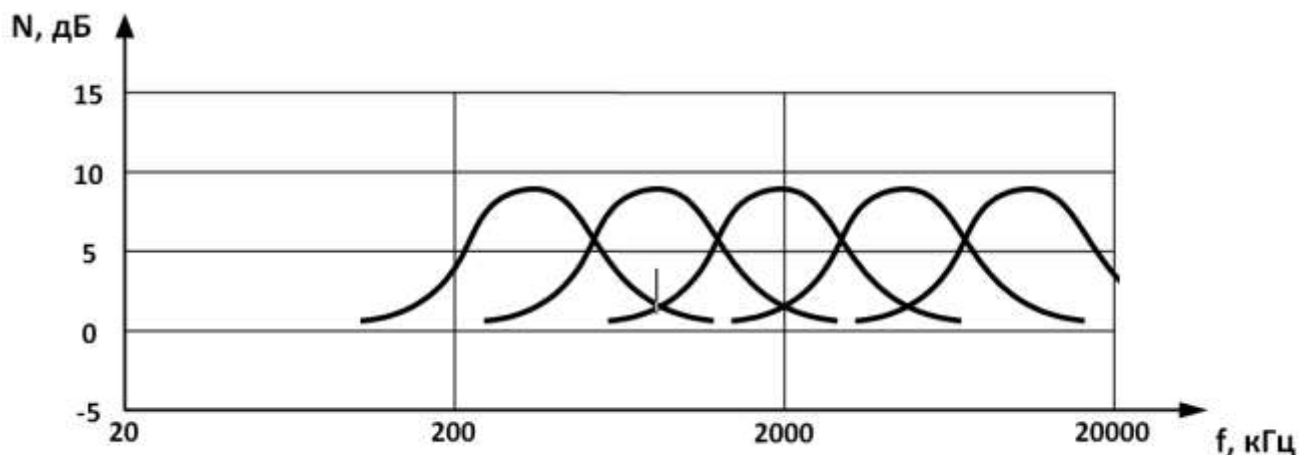


Рисунок 8.11 – АЧХ фильтров присутствия

Резонансная частота фильтров выбирается с помощью переключателя. Чаще всего в качестве резонансных выбираются частоты:

0,7; 1,4; 2,0; 2,8; 4 кГц.

Для подчеркивания сигнала солиста наиболее часто выделяют область частот около 2,8 кГц, так как тембральная яркость голоса определяется певческой формантой в области частот 2,8...3,2 кГц (форманта – максимальное значение спектрального распределения энергии звука).

В современных пультах содержатся не только «презенс»-фильтры, но и «антипрезенс», позволяющие вырезать часть спектра (рисунок 8.12).

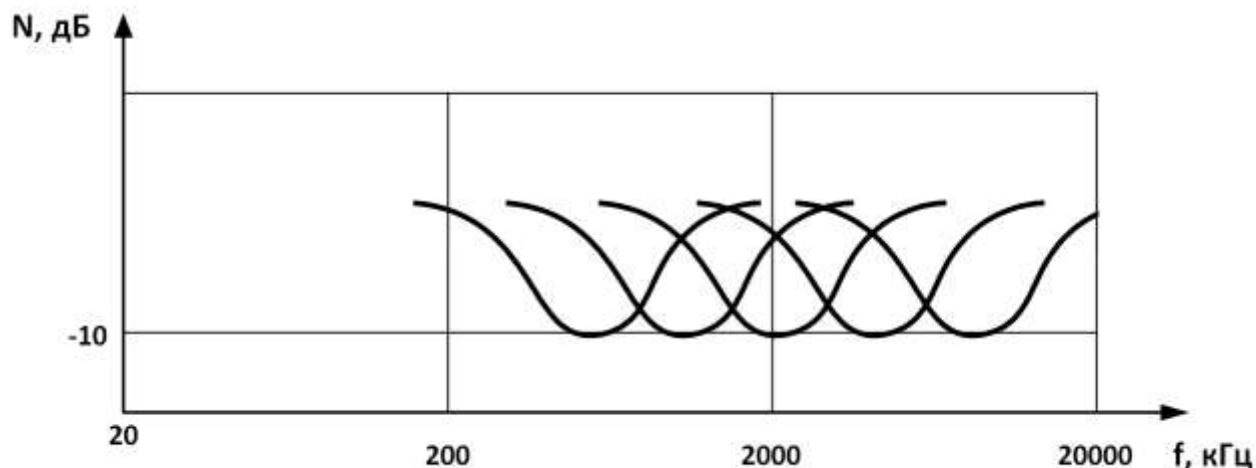


Рисунок 8.12 – АЧХ «антипрезенс» - фильтров

Графические корректоры (эквайзеры) Эквалайзеры представляют собой совокупность полосовых фильтров, АЧХ которых приведены на рисунке 8.13.

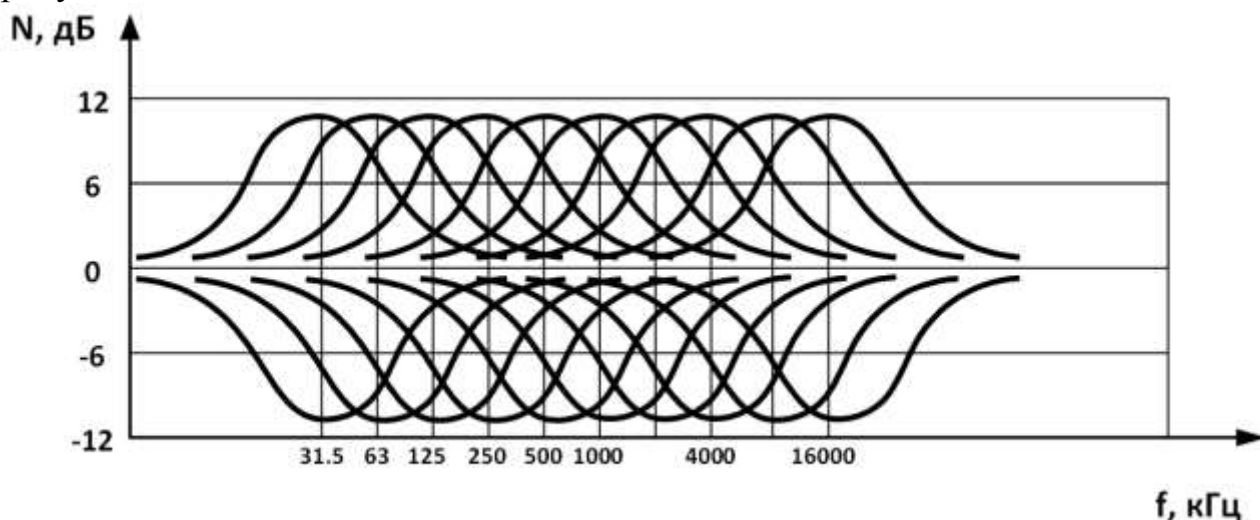


Рисунок 8.13 – АЧХ эквалайзера

Усиление в каждой частотной полосе регулируется плавно потенциометром или ступенями переключателя.

Ручка управления потенциометра или переключателя перемещается продольно и выведена на лицевую панель графического корректора. Совокупность ручек на лицевой панели, на которой изображены сетка частот и величина введенной регулировки в децибелах, отображает установленную АЧХ. Это облегчает звукорежиссеру визуальный контроль и оценку введенной частотной коррекции (рисунок 8.14).

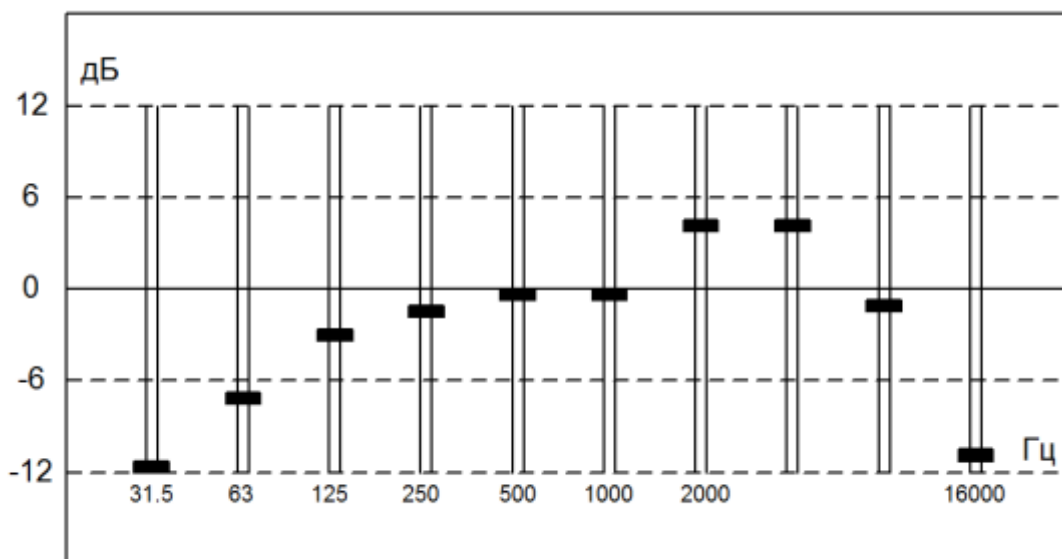


Рисунок 8.14 – Лицевая панель графического корректора

В студийной звукотехнике используются октавные, $\frac{2}{3}$ -октавные, $\frac{1}{2}$ -октавные и $\frac{1}{3}$ -октавные графические корректоры.

В октавных ГК средняя частота каждого фильтра F_0 отличается от средней частоты соседнего фильтра в 2 раза, т.е. на октаву. Вся полоса рабочих частот разбивается в октавных корректорах на 11 полос, в $\frac{2}{3}$ -октавных – на 16, в $\frac{1}{2}$ -октавных – 20, в $\frac{1}{3}$ -октавных – на 31 полосу. Средние частоты октавного ГК:

16; 31,5; 6,3; 125; 250; 500 Гц;
1; 2; 4; 8; 16 кГц.

На рисунке 8.15 представлена структурная схема ГК, в которой все фильтры включены параллельно.

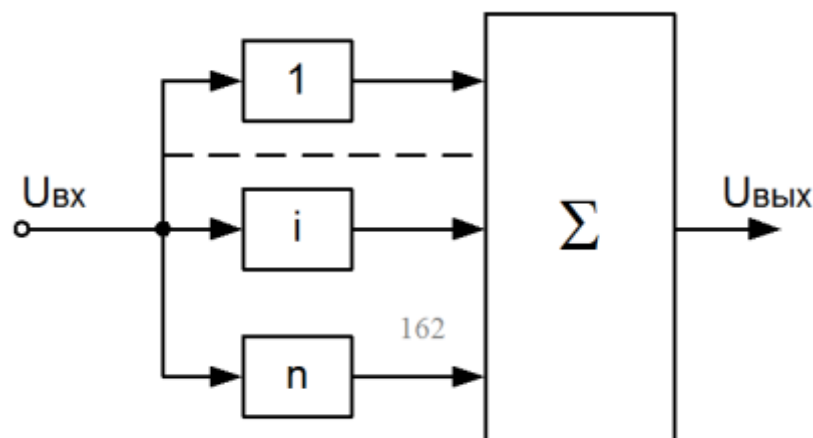


Рисунок 8.15 – Структурная схема параллельного ГК

На рисунке 8.16 показан пример последовательно-параллельного включения в ГК 16 полосовых фильтров.

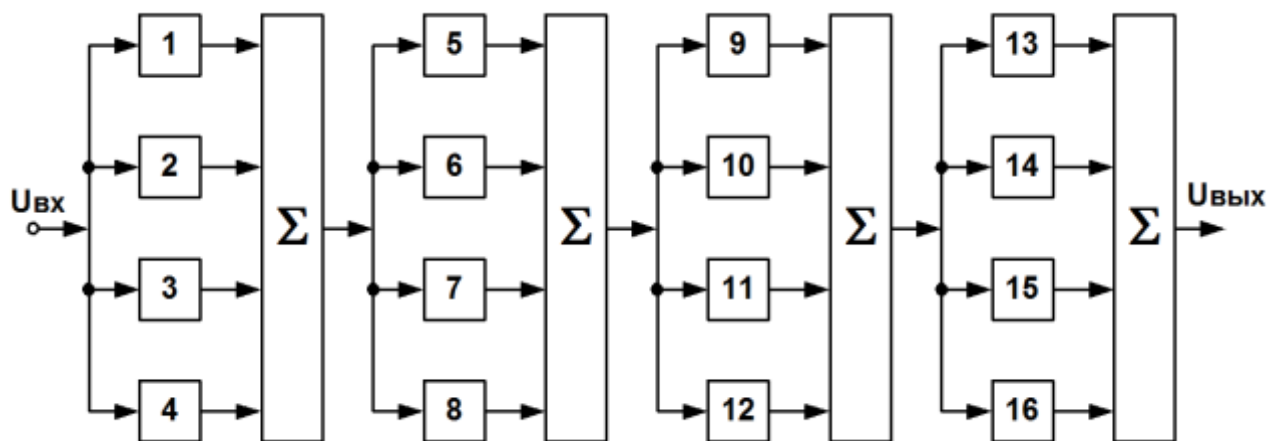


Рисунок 8.16 – Структурная схема последовательно-параллельного ГК

Как уже говорилось, подавляющее большинство описанных выше эквалайзеров сконструировано по последовательному принципу построения. Наверняка у вас возник вопрос – а в чем разница (с точки зрения практикующего звукорежиссера) между этими двумя принципами, последовательным и параллельным?

Основная, с этой точки зрения, разница – заключается в том, что эквалайзер, созданный по последовательному принципу, имеет

симметричный отклик АЧХ на перемещение регулятора подъема/завала АЧХ (рисунок 8.17).

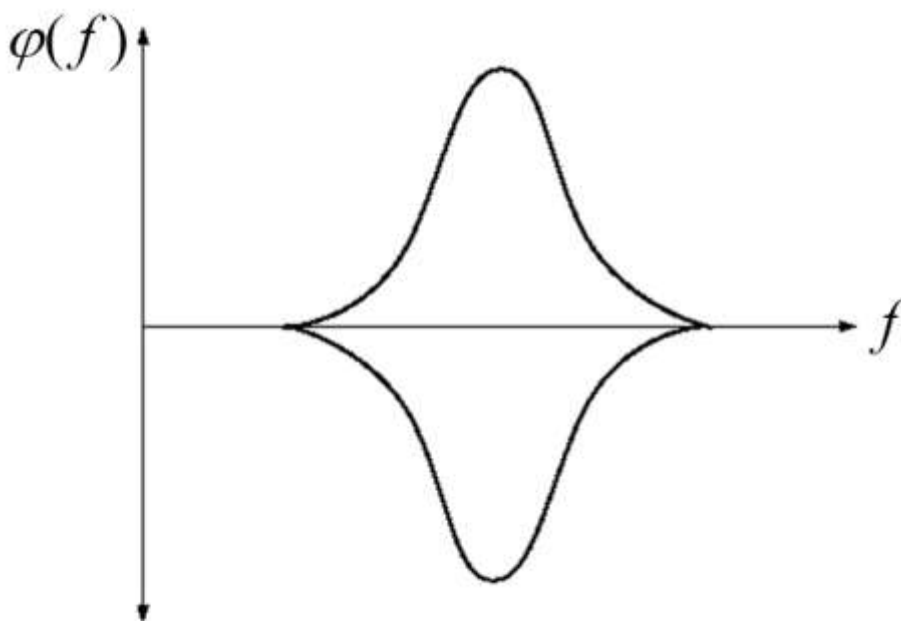


Рисунок 8.17 – АЧХ эквалайзера последовательного принципа

Иными словами, АЧХ регулятора, установленного на (к примеру) “+6дБ”, зеркально симметрична характеристике ослабления на “-6дБ” относительно уровня в 0дБ. Т.е. если вы на двух, последовательно включенных, однотипных эквалайзерах установите: на одном из них “+6дБ”, а на другом “-6дБ” (при идентичных прочих параметрах) - то суммарная АЧХ будет линейной. В случае же с “параллельными” эквалайзерами – этого получить не удастся.

Вспомним, что в таких эквалайзерах прямой сигнал – суммируется с сигналом, прошедшим сквозь полосовой фильтр. А что произойдет, если сложить или вычесть два сигнала с одинаковыми уровнями? Правильно, в первом случае - сигнал просто возрастет вдвое, т.е. на +6дБ, а вот во втором случае - уменьшится до нуля, т.е. затухание составит “минус бесконечность децибел”!

Кроме этого, достаточно очевидного, факта – есть еще и другое различие. Из-за принципиально неизбежных фазовых сдвигов в цепях фильтрации сигналы после них суммируются с прямым и вычитаются из него по-разному. В силу этого – полоса частот, захватываемых регуляторами этого типа эквалайзеров, будет различна для регулировок “в плюс” и “в минус”. Причем для случая подъема АЧХ полоса частот буде шире (т.е. добротность эквалайзера - ниже), чем для завала (рисунок 8.18).

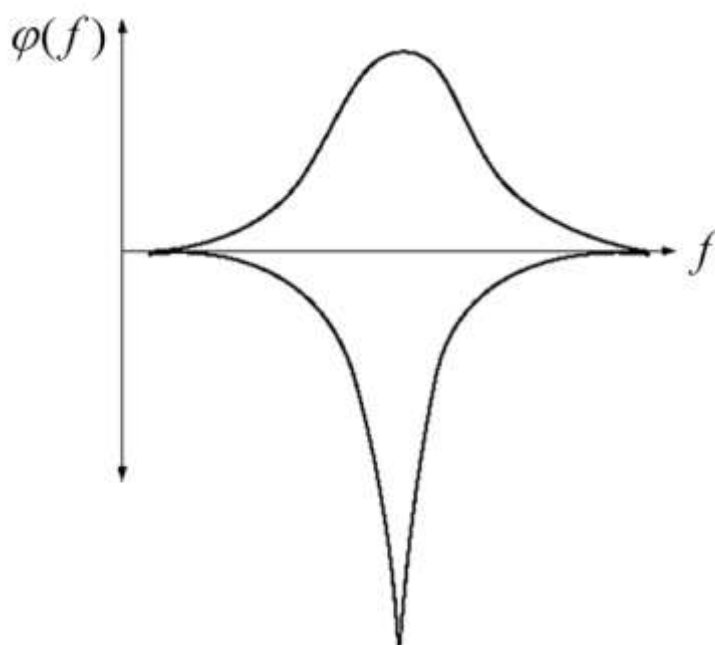


Рисунок 8.18 – АЧХ “параллельного” эквалайзера

Хотя, говоря реально, это скорее преимущество, чем недостаток. В самом деле, ведь на практике относительно редко возникает необходимость поднять очень уж узкий участок спектра, в то время как ослаблять – преимущественно приходится достаточно небольшие части звукового диапазона. Однако необходимость постоянно помнить о несимметричности АЧХ, и связанные с этим неудобства существенно ограничивают сферу применения этого типа эквалайзеров. А жаль, так как звук в таких эквалайзерах чисто принципиально может быть получен существенно более высокого качества, чем в последовательных. Ведь в них прямой сигнал проходит только один каскад – сумматор, благодаря чему подвергается искажениям в гораздо меньшей степени, чем в обычных параметрических, где он вынужден проходить через абсолютно все цепи и каскады, имеющиеся в схеме!

По своим возможностям ГК перекрывает возможности рассмотренных ранее корректоров.

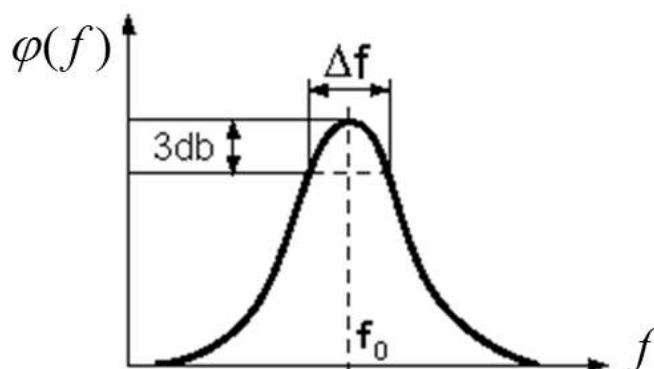


Рисунок 8.19 – АЧХ ПФ

В некоторых, как правило дорогих моделях эквалайзеров, иногда применяются некоторые дополнительные “маленькие хитрости”, облегчающие и упрощающие работу с ними. Наиболее часто – встречается применение так называемого “принципа пропорционального Q”.

Что же это такое? Если вы еще раз взглянете на рисунок 8.19, то увидите, что при расширении полосы частот, захватываемых эквалайзером, неизбежно будет увеличиваться и площадь, заключенная между кривой, обозначающей АЧХ, и осью абсцисс, т.е. возрастает мощность сигнала, попадающего в эту полосу и подвергающегося регулированию. В практическом применении это означает, что при расширении полосы регулирования – возрастает и субъективно воспринимаемая громкость звучания сигнала после эквалайзера. А это не очень-то и удобно. Вот применение принципа пропорционального Q – как раз и помогает избавиться от этого неудобства.

Эквалайзеры, построенные по этому принципу, сохраняют постоянную площадь подынтегральной кривой, описанной выше, поддерживая этим постоянной субъективно воспринимаемую громкость в полосе частот, подвергающихся коррекции, и благодаря этому более удобны в работе. Осуществляется это путем уменьшения предельно-допустимой глубины регулировки тембра при расширении полосы частот, захватываемых эквалайзером.

Бывают и еще некоторые отступления от канонической конструкции. Так, одной из фирм был разработан эквалайзер, у которого глубина регулировки АЧХ на крайних частотах звукового диапазона увеличивается, компенсируя этим снижение чувствительности нашего слуха на указанных частотах. По опубликованным отзывам, это тоже сильно повысило удобство работы с эквалайзером.

Недостатки графического корректора:

- все фильтры имеют фиксированную полосу пропускания и частоту настройки;
- при необходимости поднять усиление в интервале от 1000 до 5000 Гц придется манипулировать сразу несколькими движками;
- взаимное влияние фильтров искажает АЧХ, нарисованную движками;
- сложен и дорогостоящ в технической реализации.

Параметрические эквалайзеры.

Достоинства:

- более гибкие;
- более качественные;
- меньше фильтров (обычно от 3-х до 5-и).

АЧХ каждого фильтра в таком эквалайзере может изменяться в широких пределах. Регулируется:

- частота настройки;
- полоса пропускания фильтра;

- коэффициент передачи.

Например, подъем АЧХ в полосе 1000-5000 Гц в параметрическом эквалайзере можно реализовать с помощью всего одного фильтра, причем качество звука будет выше, чем в графическом эквалайзере.

Недостатки:

- сложнее управление;
- нет наглядности.

Область применения:

- микшерные пульта;
- в качестве микрофонных предусилителей;
- в виде отдельных приборов.

Часто применяют сочетание компрессора с эквалайзером и называют **частотно-зависимым компрессором**.

Такой компрессор обрабатывает только определенную частотную полосу, а все остальное его как бы не касается. Частный случай такого компрессора – **деэссер**, сжимающий интервал, в котором сосредоточены основные частотные компоненты свистящих и шипящих звуков человеческой речи. Это уменьшает нежелательные «присвисты» при записи речевых программ или вокала.

Несколько особняком стоит особый класс эквалайзеров, так называемых параграфических. Но не бойтесь, ничего особого нового или страшного в них нет! По своей сути – это гибрид из ПАРАметрического и ГРАФического эквалайзеров, отчего и произошло это весьма необычное название, поначалу многих повергающее в трепет. Такой эквалайзер – просто многополосный параметрический, но имеющий конструктивное исполнение части органов управления (а именно – регуляторов подъема/спада АЧХ) как у графического, в виде потенциометров с линейным перемещением их ручек (“движковых”). Благодаря своим огромным возможностям они позволяют получать практически любые требуемые вам виды АЧХ. Но из-за своей сложности они весьма дороги, и в силу этого имеют относительно небольшое распространение, да и выпускаются параграфические эквалайзеры довольно ограниченным количеством фирм.

В некоторых случаях (например, в кроссоверах, или дорогих пультах), в аппаратуре может быть предусмотрена возможность переключения крутизны среза фильтра, иногда – даже с возможностью переключения на выбранный вами тип фильтра, для лучшего приспособления к вашей конкретной ситуации. К сожалению, это встречается не так часто, как бы хотелось...

И в заключение немного об “общих вопросах”, связанных с частотной коррекцией. Выше уже говорилось, что АЧХ и ФЧХ тесно связаны друг с другом. И относится это не только к фильтрам, как таковым, но и вообще к любым цепям передачи сигналов. Для всех минимально-фазовых цепей существует строгая *взаимно-однозначная* связь между АЧХ и ФЧХ. Говоря “минимально-фазовая цепь” – имеется в виду, что в этой цепи тракта нет особых звеньев, так называемых фазовращателей (не путать с кнопками для переворота фазы микрофонов!).

Строго говоря, практически все электронные цепи, имеющиеся в звуковой аппаратуре, являются именно минимально-фазовыми. Исключениями являются, пожалуй, только устройства эффектов – фэйзеры. Вот они построены именно на основе фазовращателей.

Что же следует из упомянутой связи между АЧХ и ФЧХ? Прежде всего то, что если вам известна АЧХ какого-либо устройства, то можно однозначно установить и его ФЧХ, и наоборот – по известной ФЧХ определить АЧХ. Т.е. если два устройства имеют строго одинаковые частотные характеристики, то они в обязательном порядке будут иметь и *абсолютно идентичные* фазово-частотные характеристики.

И если какая-либо фирма заявляет, что ее эквалайзер “не крутит фазу” – не верьте. Если, конечно, речь не идет об однополосном эквалайзере и о сдвиге фаз на основной частоте его регулирования. Вот только на одной-единственной *этой* частоте, являющейся частотой резонанса электронной схемы, фазовый сдвиг между входным и выходным сигналом будет равен нулю. Правда, никакой заслуги разработчиков и изготовителей в этом нет, это – просто общее свойство всех резонансных цепей. Но, повторимся еще раз – *только* на этой частоте. Во всех других случаях – не бывает!

То есть – теоретически, конечно, возможно создать подобное устройство, но для этого придется встроить в него огромное количество фазовращателей, но от прекрасного звука ничего не останется. Ведь каждый фазовращатель – это лишний активный элемент, транзистор или микросхема, а, значит, и неизбежно сопутствующее этому увеличение шумов и искажений.

Не говоря уж о том, что такое устройство, скорее всего, будет физически нереализуемо. Ведь для перестройки частоты в эквалайзерах – и так, уже используются сдвоенные переменные резисторы, а если еще придется одновременно с этим изменять параметры *этого* количества фазовращателей, то количество резисторов, сидящих на одной оси, может вообще превысить все разумные пределы!

Конечно, на это можно возразить – то, что невозможно сделать в “аналоге”, возможно в “цифре”. Качество чисто программных эквалайзеров, реализованных в различных компьютерных Plug-in – оставляет желать лучшего.

Не в последнюю очередь это связано с тем, что фактически любая программа является лишь математической моделью своего более-менее реального физического прототипа. А все частотно-избирательные цепи в звуковой аппаратуре относятся к классу так называемых ИР-фильтров, т.е. фильтров с бесконечной импульсной характеристикой (Infinite Impulse Response). Или, говоря проще, при подаче на вход *любого* частотно-избирательного устройства какого-либо внешнего воздействия – его выходной сигнал также будет длиться бесконечно. А как хорошо написали братья Стругацкие в известной книге – “познание бесконечности требует бесконечного количества времени”...

Таким образом, чтобы строго смоделировать “в цифре” то, что “в аналоге” получается само собой, потребуется вычислитель с бесконечно большой вычислительной мощностью и с неограниченной же разрядной сеткой. А как мы все хорошо понимаем, это невозможно. Поэтому, чтобы получить реально работающие цифровые обработки - по необходимости приходится “урезать” вычислительные алгоритмы, сокращая объем вычислений до разумного минимума. Естественно, что это далеко не самым лучшим образом сказывается на главном результате, на получаемом звуке. А теперь - попробуйте себе представить, как в эти, и без того “обкромсанные” алгоритмы впихнуть еще и кучу вычислений для компенсации фазовых сдвигов.

Похоже, в обозримом будущем не приходится всерьез рассчитывать на широкое и повсеместное внедрение “не крутящих фазу” эквалайзеров. Ведь сейчас хорошо звучащие цифровые эквалайзеры собираются с использованием доброго десятка мощнейших DSP-процессоров типа SHARC.