

## Лестничный фильтр в эквалайзере

Эквалайзеры долгое время были популярны среди радиолюбителей, однако сейчас интерес к ним несколько угас. С одной стороны, современные фонограммы и акустические системы уже не требуют глубокого вмешательства в АЧХ, с другой – схемы эквалайзеров усложнились настолько, что пугают даже опытного радиолюбителя. Можно, конечно, возразить, что основная задача эквалайзера – коррекция АЧХ помещения, а не убогих АС и, тем более, – тембра. Однако эквалайзер удобен именно в качестве многополосного регулятора тембра – собственно, в бытовой аппаратуре у него иной роли никогда и не было. Тем более, что настраивать параметрический или тридцатиполосный графический эквалайзер «методом тыка» без анализатора спектра или звукового генератора бессмысленно, а «простой» пяти- или десятиполосный с коррекцией АЧХ бытового помещения справиться не в состоянии, для этого нужно минимум 15 полос. В то же время для регулировки тембра на любой вкус достаточно трёх-четырёх полос, и здесь радиолюбительские конструкции вполне могут дать фору промышленным.

### Историческая справка:

Слово equalizer в буквальном переводе означает «выравниватель», и в англоязычной литературе эквалайзером именуют любой корректор АЧХ, кроме «одноручечного» регулятора тембра (под это определение попадают и усилитель-корректор головки звукоснимателя с фиксированной АЧХ, и классический регулятор тембра НЧ+ВЧ, и однополосный параметрический эквалайзер в активном сабвуфере). В отечественной литературе этот красивый «нездешний» термин стал обозначать класс *перестраиваемых* корректоров с числом полос регулирования более трёх, и был окончательно признан лишь в начале 80-х годов прошлого века – до этого использовался громоздкий, но понятный даже непосвящённым термин «многополосный регулятор тембра». Что, кстати, прекрасно отражало роль устройства в бытовой аппаратуре.

### Техническая справка:

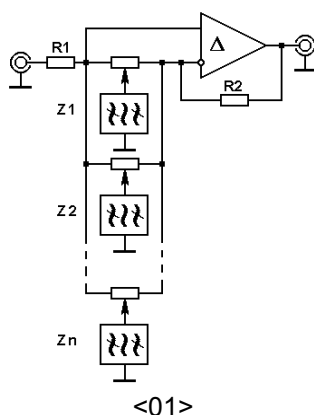
Параметрический эквалайзер – эквалайзер, в котором независимо регулируется центральная частота и ширина полосы пропускания (добротность). Число полос обычно 3-5. Незаменимы при коррекции локальных дефектов АЧХ, но для грамотного применения требуют определённого опыта. Поворотные регуляторы (как правило – соосные) не впечатляют рядового покупателя, а обилие «степеней свободы» даже пугает.

Графический эквалайзер (graphic equalizer) – особо привлекательное для неподготовленного пользователя детище маркетологов, к схемотехнике отношения не имеет. В конструкции используют потенциометры с линейным перемещением (от пяти до двадцати), в этом случае положение регуляторов наглядно отображает установленную АЧХ. В то же время в эквалайзерах профессионального назначения охотно применяют поворотные регуляторы – компактное поле управления и надёжность устройства важнее привлекательности.

С точки зрения схемотехники эквалайзеры можно разделить на два класса:

- эквалайзеры с регулируемыми частотно-зависимыми обратными связями
- фильтровые эквалайзеры (с разделением спектра)

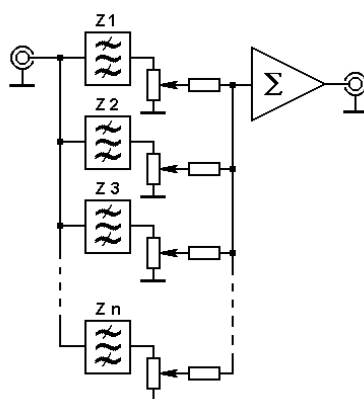
Современные эквалайзеры, в том числе и большинство радиолюбительских конструкций, построены на основе ОУ (как правило, интегрального исполнения, иногда – на дискретных компонентах) с регулируемыми частотно-зависимыми ОС (рисунок 1). В зависимости от положения движка переменного резистора фильтр образует частотно-зависимый делитель либо в цепи сигнала, либо в цепи ООС, от этого зависит ослабление или усиление в соответствующей полосе частот. В среднем положении движков фильтры не оказывают влияния на сигнал, поэтому получается линейная АЧХ.



По такой структуре выполняются как многополосные (графические), так и параметрические эквалайзеры, отличие только в схемотехнике фильтров. Причём сложность этого узла пропорциональна техническим требованиям. Так, чтобы обеспечить независимую регулировку частоты настройки и добротности в параметрическом эквалайзере [1] каждый фильтр содержит 4 ОУ и большое количество резисторов и конденсаторов. В многополосных эквалайзерах высокого качества [2] каждый фильтр содержит 2 ОУ, и лишь в массовых конструкциях используют простые гираторы (аналоги индуктивности на основе ОУ или эмиттерных повторителей) – но такое упрощение схемы оборачивается ужесточением требований к допускам деталей частотоподающих цепей. Таким образом, даже скромный пятиполосный эквалайзер в стереоварианте требует не менее дюжины ОУ. Это обстоятельство привело к выпуску специализированных микросхем эквалайзеров, включающих все необходимые активные элементы. Однако использовать эти микросхемы можно только в звуковых трактах массовой аппаратуры: неприлично большое количество ОУ на одном кристалле и сложные обратные связи (в том числе и паразитные) не идут на пользу качеству звучания. Именно по этой причине в высококачественных трактах применяются только пассивные регуляторы тембра [3], [4] и отдается предпочтение усилительным каскадам на ИС невысокой степени интеграции или дискретных элементах с неплотным монтажом, сводящим к минимуму паразитные связи.

Особняком в этой группе стоят эквалайзеры с LC-фильтрами ([5], [6], [7]). По сочетанию качества звучания и схемной простоты они вне конкуренции, но им свойственны технологические недостатки: катушки подвержены наводкам и взаимной индукции, обладают заметным разбросом характеристик, имеют большие габариты и крайне трудоёмки в изготовлении. К тому же их нужно много – по числу полос. Правда, последнюю проблему отчасти решил С. Крейдич [8], совместив все катушки в одной с отводами, и эту конструкцию по праву считают вершиной «катушечных» эквалайзеров – как по простоте и элегантности схемных решений, так и по функциональности. Дальше развитие эквалайзеров пошло по пути усложнения и – увы – «похудения».

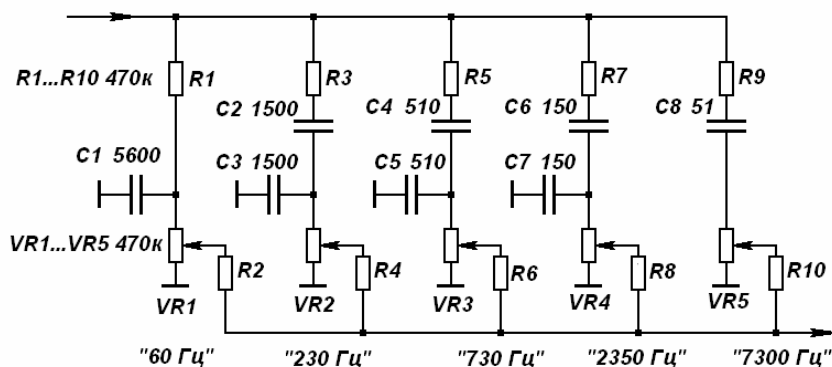
Однако исторически первыми были фильтровые эквалайзеры. В них спектр сигнала разделяется фильтрами  $Z_1 \dots Z_n$  на несколько частотных полос (рисунок 2). Уровень каждой полосы регулируется отдельно, после чего сигналы через смеситель поступают на выход устройства. Фильтры могут быть любыми – пассивными [9], [10], [11] или активными [12], [13]. Кстати, если разделить частотные полосы на группы с отдельными смесителями для каждой группы, то такой эквалайзер станет «по совместительству» и разделительным фильтром для систем с многополосным усилением (зародыш такой структуры прослеживается в [13] – в канале сабвуфера использованы два полосовых фильтра и регулируемый смеситель). Конструкции, полностью использующие данный принцип, автору неизвестны, но идея хороша.



<02>

Достоинств у фильтровых эквалайзеров немало – особенно в конструкциях с пассивными фильтрами. Прежде всего, это гладкая фазочастотная характеристика, естественность звучания, низкий уровень искажений и шумов – недаром на основе пассивных фильтров выполнены ламповые студийные эквалайзеры. Да и простота конструкции имеет далеко не последнее значение для радиолюбителя. Всё это позволяет мириться с основным недостатком фильтровых эквалайзеров – при установке регуляторов в положение, соответствующее линейной АЧХ, результирующая АЧХ имеет небольшую неравномерность (волнистость). Кроме того, из-за низкой добротности пассивных фильтров первого порядка число полос регулирования не превышает пяти. Переход к активным фильтрам более высокого порядка или добротности хотя и позволяет увеличить число полос, отнюдь не делает АЧХ гладкой – неравномерность даже увеличивается из-за неблагоприятных фазовых соотношений сигналов соседних полос. А по сложности схема начинает соперничать с уже рассмотренными. Лучшее – враг хорошего!

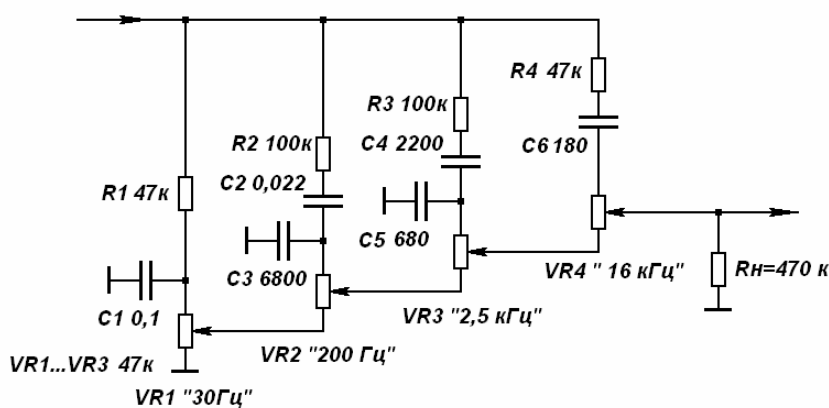
Итак, дружно вступаем в «Общество друзей эквалайзеров с пассивными фильтрами». Первой известной автору публикацией был ламповый пятиполосный эквалайзер, фрагмент схемы которого приведён в [4]. Первоисточник (публикацию второй половины 60-х годов) разыскать не удалось, но основная часть схемы с неизменными(!) номиналами деталей без малого полвека кочует из одной конструкции в другую. Вот эта схема (рисунок 3):



<03>

Блок регуляторов стоит в цепи сигнала между двумя усилительными каскадами, компенсирующими затухание в блоке регуляторов и смесителе. В оригинале применены вакуумные триоды, в конструкциях-клонах взамен ламп использовались транзисторы, гибридные ИС [7], ОУ [9] – но суть от этого не менялась. Из-за необходимости компенсировать значительное (порядка 30 дБ) затухание сигнала в фильтрах и смесителе основной проблемой «неламповых» вариантов был скромный даже по меркам тридцатилетней давности динамический диапазон – 60-70 дБ. При невысоком напряжении питания либо возникала перегрузка входного каскада, либо становились заметными шумы выходного. Другой минус схемы – высокоомные цепи, в результате чего АЧХ устройства существенно зависит от паразитных ёмкостей монтажа и ёмкости нагрузки. Уже при ёмкости нагрузки 50...100 пф (типичная ёмкость небольшого отрезка тонкого экранированного кабеля даже без учёта входной ёмкости последующего каскада) полоса пропускания сужается до 12...14 кГц.

Эту схему удалось упростить и улучшить, исключив смеситель и изменив включение регуляторов (рисунок 4). Графическое изображение схемы дало повод назвать её «лестничной», по аналогии с известной схемой кварцевого полосового фильтра. А сама идея каскадного включения регуляторов тембра не нова – в двухполосном варианте она использовалась в усилителях электрогитар ещё в 50-х годах прошлого века, в разработках автора [14], но до многополосных регуляторов тогда дело не дошло...

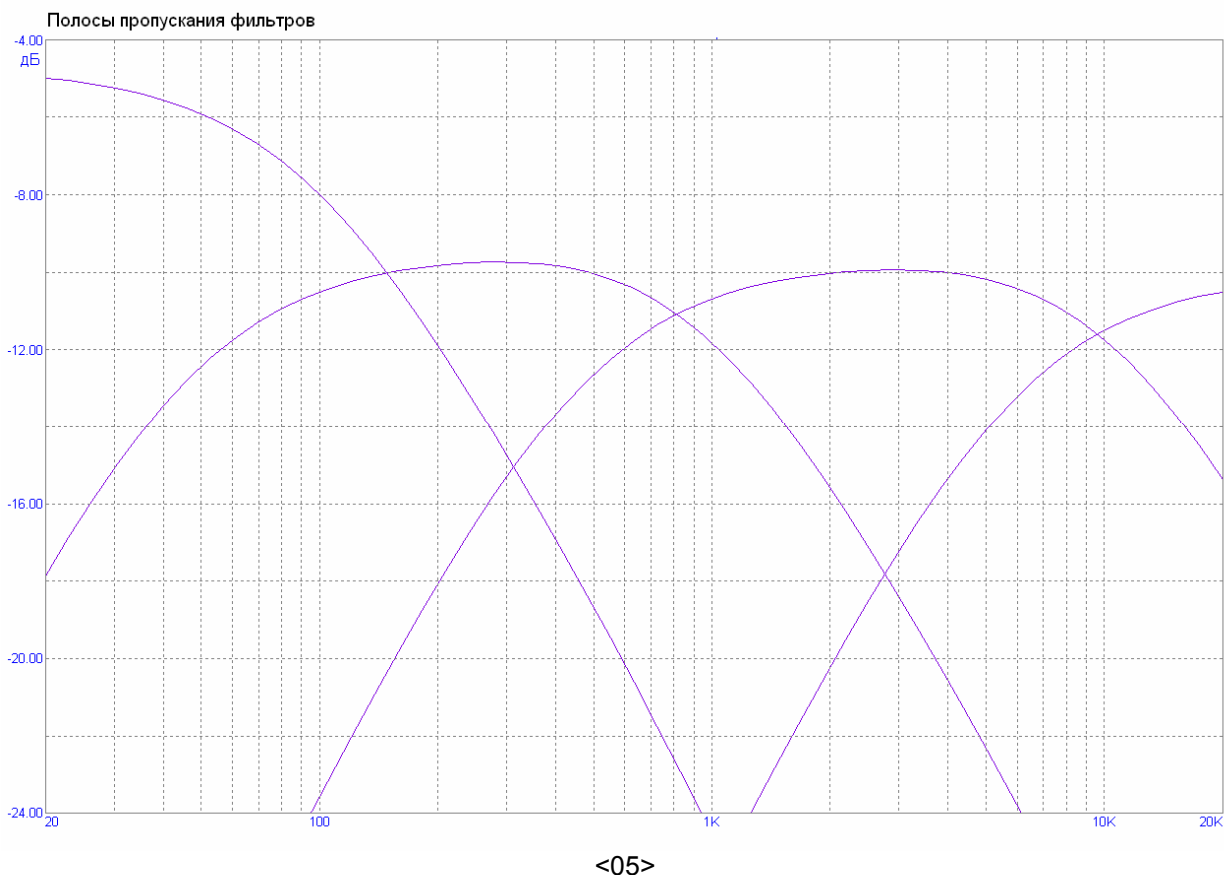


<04>

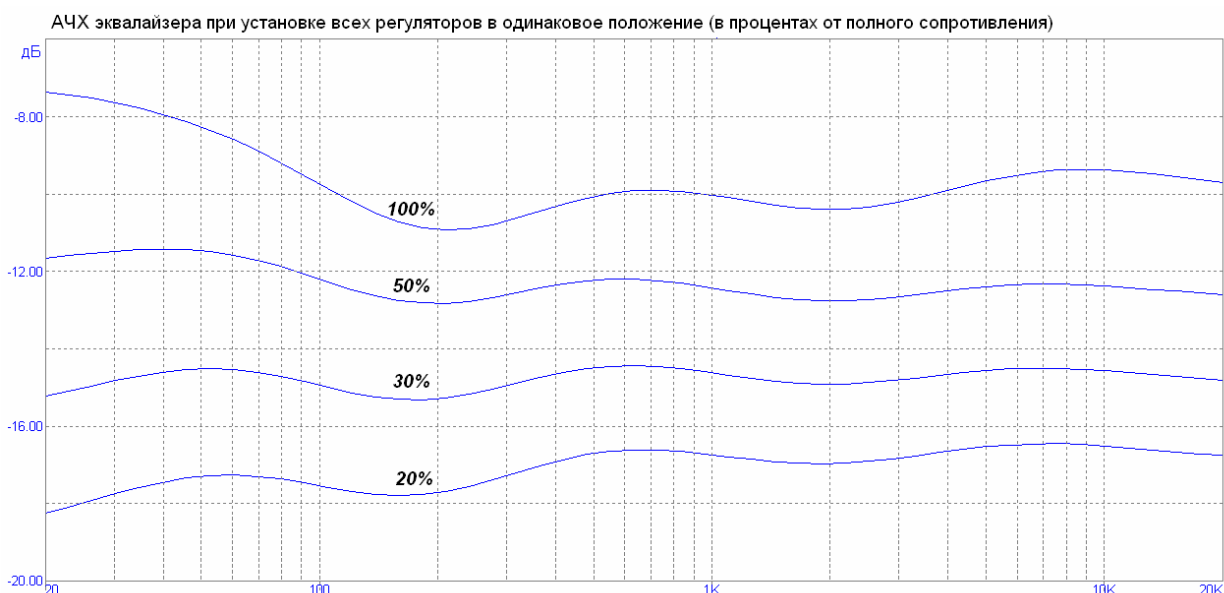
Устранение смесителя и сужение диапазона регулирования повысило коэффициент передачи эквалайзера по сравнению с традиционной схемой – в среднем положении регуляторов с показательной зависимостью сопротивления затухание составляет 16...18 дБ, в результате требуется меньшее усиление согласующих каскадов, и динамический диапазон несколько расширился. Уменьшение сопротивления регуляторов в 10 раз позволило применить более привычные «транзисторные» ёмкости, и на порядок снизить влияние паразитных ёмкостей.

Эквалайзер выполнен четырёхполосным намеренно. Регулятор полосы 1 кГц в пятиполосных эквалайзерах в большинстве случаев не используется, к тому же в уже упоминавшейся работе [8] хорошо обоснованы необходимые области регулирования. Это частоты, совпадающие с перегибами кривых равной громкости: 30...40 Гц (суббас и нижний бас), 150...250 Гц (средний и верхний бас), 2,5...3 кГц (средние частоты, область максимальной чувствительности слуха), 14...16 кГц (высокие частоты). Поскольку суббас и нижний бас – проблемная область большинства старых записей (до 80-х годов прошлого века), глубину регулировки в этой области «на подъём» полезно увеличить.

Упрощение схемы привело к тому, что в процессе регулирования средние частоты фильтров несколько «плавают» (моделирование и оптимизация схемы с учётом влияния нагрузки проводились в среде MicroCap), однако на слух это незаметно. На принципиальной схеме указаны «среднестатистические» значения частот, которые немного не совпадают с частотами настройки отдельно взятых фильтров (рисунок 5).

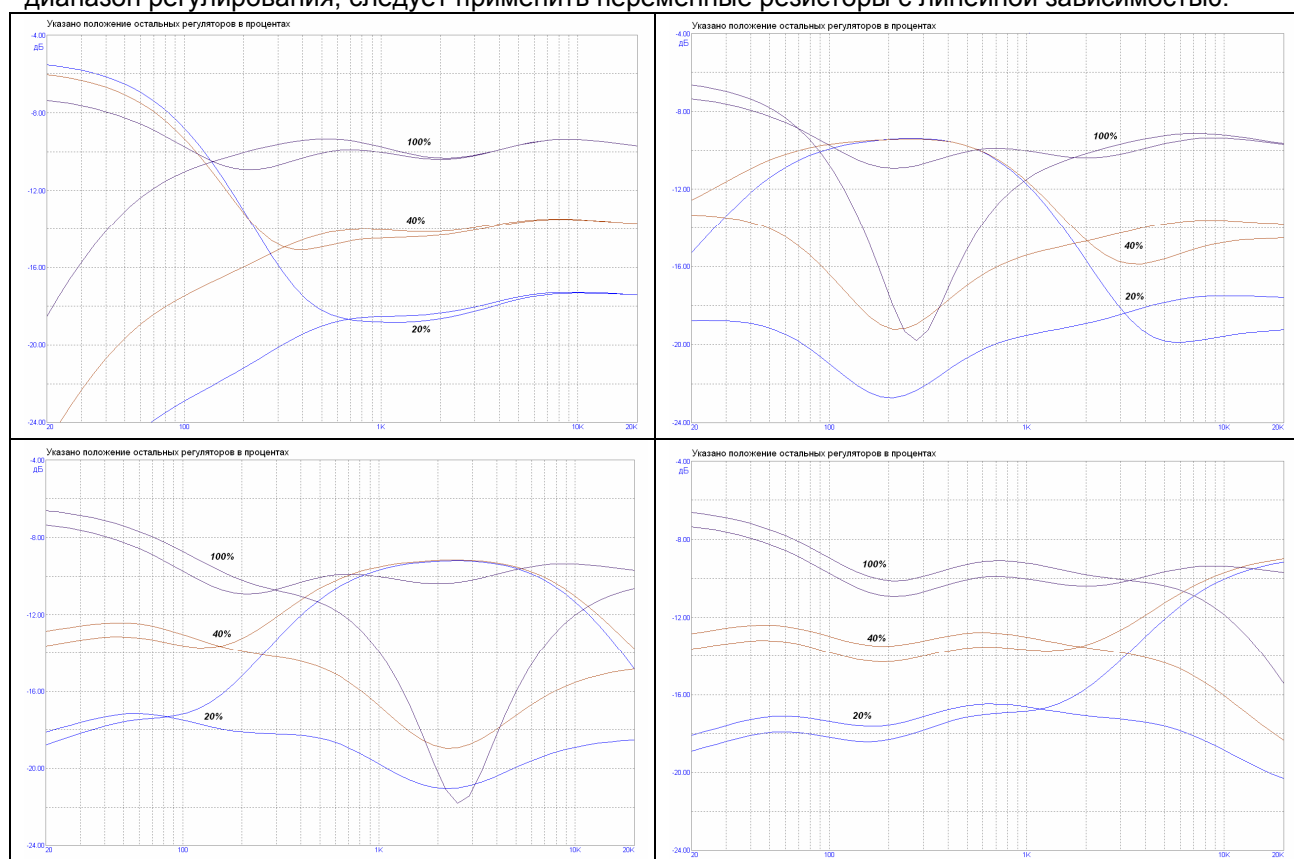


При установке всех регуляторов в одинаковое положение изменяется в основном коэффициент затухания, АЧХ на средних частотах остаётся более-менее линейной. Неравномерность АЧХ не превышает 1 дБ и приносит пользу: небольшой провал в области 200 Гц уменьшает характерное для жилых помещений «бубнение», а такой же провал в области 2 кГц компенсирует излишнюю резкость звучания малогабаритных «полочных» АС. Подчеркивание формантной области (600...800 Гц) улучшает выразительность вокала. С уменьшением общего затухания наблюдается подъём АХ на крайних частотах диапазона (рисунок 6) из-за уменьшенных номиналов резисторов R1 и R4. Номиналы этих резисторов оптимизировались из условия получения максимально линейной АЧХ при введении 25...30% от полного сопротивления регуляторов (это типичное значение для переменных резисторов с показательной зависимостью сопротивления от угла поворота при установке в среднее положение).



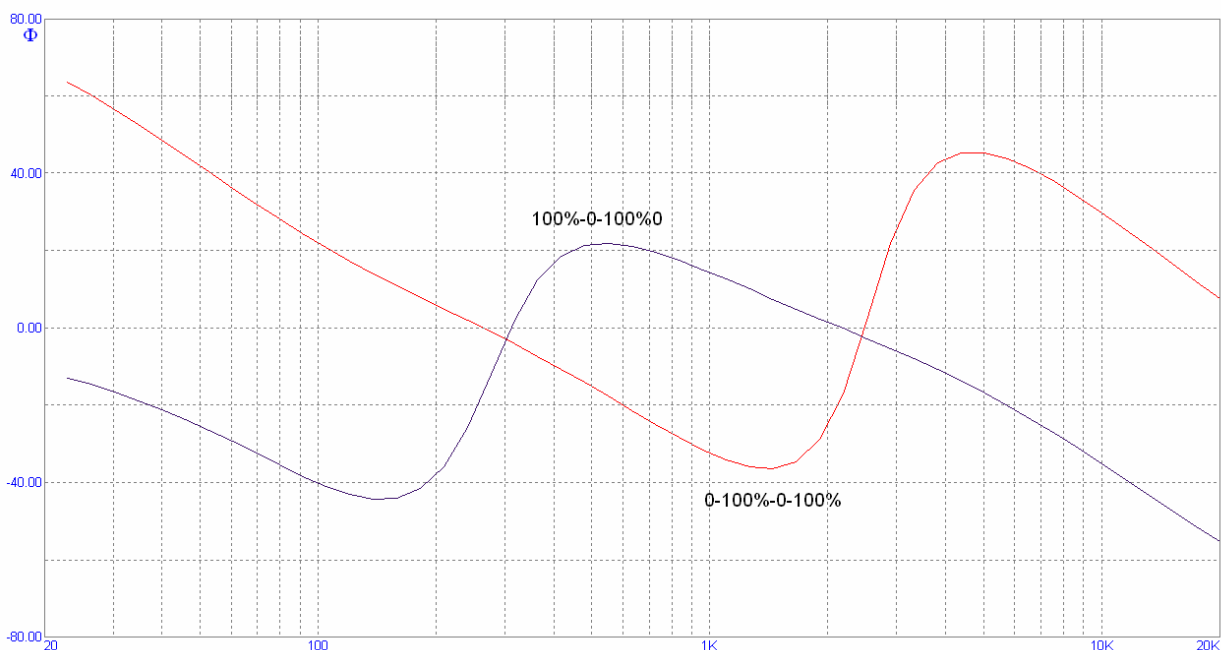
<06>

Диапазон регулирования суббаса не менее 18 дБ, остальных полос – 12 дБ. В зависимости от положения регуляторов других полос соотношение величины «подъёма» и «завала» изменяется, причём «средним» полосам хорошо удаётся роль режекторного фильтра (рисунки 7-10). Если используются переменные резисторы с показательной зависимостью, то регулировка от среднего положения будет преимущественно «на подъём». Чтобы получить примерно симметричный диапазон регулирования, следует применить переменные резисторы с линейной зависимостью.



<07-10>

ФЧХ эквалайзера гладкая, даже при невозможном на практике «чересполосном» положении регуляторов «100%-0-100%-0» и «0-100%-0-100%» сдвиг фазы в наиболее значимом диапазоне 100...3000 Гц не превышает 60 градусов (рисунок 11).

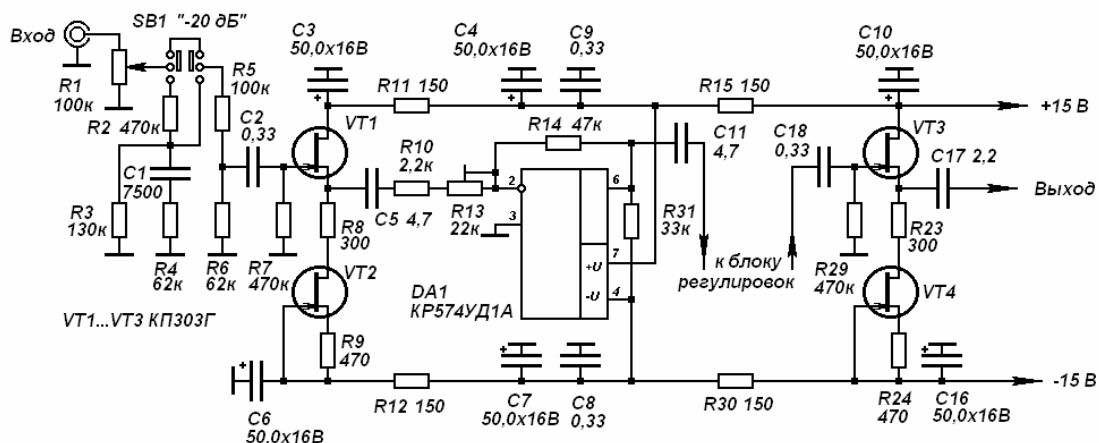


<11>

Чтобы предлагаемый регулятор превратился в полноценный эквалайзер, необходимы согласующие каскады, обеспечивающие необходимые входные и выходные сопротивления и компенсирующие затухание в пассивных цепях. Первый каскад должен быть с низким выходным сопротивлением (не более 5 кОм). Входное сопротивление второго каскада должно быть высоким – не менее 300 кОм, иначе возрастёт неравномерность АЧХ и снизится коэффициент передачи, и без того не слишком высокий. Качество звучания в основном будет зависеть не от темброблока, а от схемотехники и элементной базы согласующих каскадов. Нужно использовать максимально линейные компоненты: ОУ на полевых транзисторах, ещё лучше – дискретные полевые транзисторы (особенно мощные МДП при напряжении питания 40...60 В) или электронные лампы, здесь открывается простор для творчества.

Несколько слов о распределении усиления по каскадам. Современная элементная база обеспечивает очень низкий уровень шумов, поэтому основной упор нужно сделать на достижение максимальной перегрузочной способности. В аппаратуре с батарейным питанием (9... 15 В) второй каскад эквалайзера должен лишь компенсировать затухание в регуляторе (усиление 14...20 дБ), а первый каскад – обеспечивать общий коэффициент передачи устройства (для стандартных уровней сигнала необходимо усиление 0...12 дБ). В такой конструкции удобно использовать малошумящие ИС К538УН1 и К548УН1, специально разработанные для звукового применения и не требующие двухполярного источника питания.

При использовании усилительных каскадов с высокой перегрузочной способностью целесообразно сосредоточить основное усиление в первом каскаде, чтобы снизить долю шумов второго каскада – в этом случае он может быть даже повторителем. Для этой цели как нельзя лучше подходит предварительный усилитель Н. Зыюка, не требующий изменений в схеме и печатной плате. Блок регуляторов включается вместо двухполосного пассивного регулятора тембра, смонтированного навесным монтажом (рисунок 12, сохранена нумерация деталей первоисточника).



<12>

Налаживание предусилителя и замены деталей подробно описаны в [4], там же приведён рисунок печатной платы. При выборе пассивных компонентов справедливы все традиционные рекомендации: высокостабильные малошумящие резисторы, бумажные, масляные или слюдяные конденсаторы. Учитывая, что высококачественные и долговечные движковые потенциометры давно занесены в Красную Книгу, придётся использовать поворотные.

#### Литература

1. Параметрический эквалайзер – «Радио» 1983, №11, с.58
2. Козлов А. – Графический эквалайзер – «Радио» 1988, №2, с. 42
3. Тарасов В. – Пассивный регулятор тембра – «Радио» 1989, №9 с. 70
4. Зысюк Н. – Предварительный усилитель с темброблоком – «Радио» 1998, №8, с.20
5. Стародуб Д. – Четырёхполосный регулятор тембра – «Радио» 1974 №5 с. 46
6. Зыков Н. – Многополосные регуляторы тембра – «Радио» 1978, №4, с. 34
7. Многополосные с LC-фильтрами – «Радио» 1979, №10 с. 25
8. Крейдич С. – Входной блок усилителя НЧ – «Радио» 1982, №12, с.42
9. Коломийченко С., Хоменко Ю. – Предварительные усилители на микросхеме K284CC2A – «Радио» 1980, №7 с.34
10. Шумов Д. – Трёхполосный регулятор тембра – «Радио» 1982, №11, с. 44
11. Эквалайзеры с пассивными полосовыми фильтрами – «Радио» 1991, №12, с.62
12. Касметлиев В. – Многополосные регуляторы тембра на ОУ – «Радио» 1980, №10, с.27
13. Бутенко А. – Предварительный усилитель с регулируемой АЧХ – «Радио» 1984, №3, с.39
14. Шихатов А. – Пассивные регуляторы тембра – «Радио» 1999, №1, с.14