

Переменные резисторы

Впервые было опубликовано на сайте guitar-gear.ru в 2010 году

В отличие от постоянных резисторов, о параметрах которых я коротко рассказал в статье, посвященной кодовой и цветовой кодировке, у потенциометров есть еще один, весьма существенный параметр, который многих начинающих самоделщиков часто приводит в замешательство, если не сказать, в ступор. Это – кривая зависимости сопротивления от угла поворота (или от величины линейного перемещения) ползункового вывода. В литературе этот параметр нередко называется иначе – **резистивная кривая, тип резистивной зависимости, или «тип функциональной зависимости»**.

Обычно данный параметр прямо указывается только для переменных резисторов (потенциометров), предназначенных для оперативной регулировки некоторых характеристик аудиоаппаратуры, и устройств обработки звука. Чаще всего такие потенциометры имеют логарифмическую или обратнологарифмическую кривую резистивной зависимости.

Подстроечные сопротивления (потенциометры, триммеры) как правило, не нормируются по этому параметру, так как имеют **линейную резистивную зависимость**.

Что же такое – «кривая резистивной зависимости» (КРЗ), как она влияет (и влияет ли вообще) на работу потенциометра, что скрывается за буквами, обозначающими тот или иной тип КРЗ, и можно ли в домашних условиях модифицировать КРЗ имеющегося в наличии потенциометр (как правило, с линейной характеристикой) в КРЗ другого типа?

Но прежде, чем ответить на эти вопросы, напомним, что нелинейные КРЗ обычно применяются в звуковой технике, и расскажу, с чем это связано.

Почти сто лет назад, на заре возникновения первых электронных устройств усиления звука, ученые-психоакустики выявили зависимость чувствительности человеческого уха от частоты акустических колебаний в воздухе (обычных звуков), и звукового давления (уровня громкости). Оказалось, что человек слышит довольно узкий диапазон акустических колебаний, примерно от 20 до 16000 Гц. У разных людей этот интервал может быть другим, кроме того, с возрастом диапазон слышимых частот сужается, особенно в высокочастотной области. И при этом человек по-разному оценивает изменение уровня громкости не только при изменении частоты звука, но и при изменении самой громкости! Проще говоря, изменение амплитуды тихого звука, допустим, в два раза, воспринимается человеком совсем не так, как если бы в два раза изменилась амплитуда громкого звука той же частоты. И совсем другая реакция у человека на аналогичные изменения громкости звуков другой частоты.

Тогда же были построены семейства кривых чувствительности человеческого уха – усредненные графики зависимости этой чувствительности для разных частот слышимых акустических колебаний. На Рис.1 показаны эти графики, получившие название **кривых равной громкости**, которые были приняты в качестве международного стандарта.

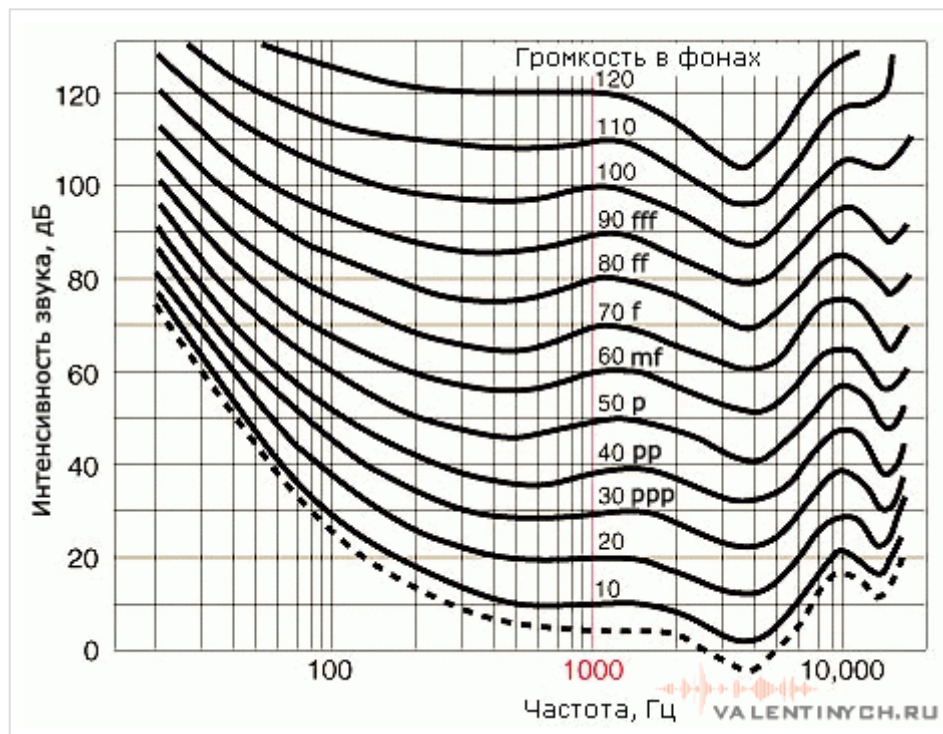


Рис. 1 — Кривые равной громкости

В технике уровень звука оценивается в децибелах (дБ), в психоакустике

нормирование уровня на частоте 1 кГц принято выражать в фонах. На графике показаны кривые, на которых лежат стандартизированные уровни громкости, выраженные в фонах.

Уровень звука 4 фона, и соответствующая ему кривая равной громкости (на рисунке показана пунктирной линией), считается **порогом слышимости**, ниже которого человеческое ухо не в состоянии отреагировать на внешнее акустическое воздействие. Уровень 120 фон считается **болевым порогом**, а при звуковом давлении более 130-140 дБ может произойти **физическое разрушение уха** (разрыв барабанной перепонки).

Из приведенных графиков видно, что максимальная чувствительность уха приходится на диапазон средних частот — примерно от трех до четырех килогерц. Минимальная чувствительность уха приходится на низкие частоты, так же снижение чувствительности происходит и в верхнем участке диапазона слышимых частот, хотя характер изменения чувствительности там сложнее, и имеет значительно большую нелинейность и волнообразность.

Очевидно, что **диапазон чувствительности уха** максимален в среднем диапазоне слышимых частот, где он достигает, а порой и превышает 120 дБ. Это соответствует соотношению 1:1000000 уровней громкости самого тихого слышимого звука к самому громкому.

А в низкочастотной части графика динамический диапазон слышимости минимален, здесь он едва дотягивает до 60 дБ (соотношение уровней громкости 1:1000).

В первых усилителях ЗЧ (звуковой частоты) в качестве регулятора уровня громкости использовались обычные линейные проволочные потенциометры. Здесь термин «линейные» соответствует конструкции устройства, а не его электрическим характеристикам. Такой потенциометр (переменное сопротивление с тремя выводами) является младшим братом проволочного реостата – переменного сопротивления с двумя выводами, один из которых перемещается вдоль диэлектрического стержня, на котором намотана электропроводная проволока, тем самым изменяя электрическое сопротивление этого двухполюсника, или ток в цепи, где был установлен реостат. Максимальное сопротивление реостата зависело от удельного сопротивления материала, из которого была изготовлена проволока, и общей длины проволоки, намотанной на стержень.

Потенциометр изначально предназначался для использования в качестве **резистивного делителя напряжения**, с помощью которого можно было бы вручную изменять величину напряжения между одним из крайних и подвижным выводом устройства. Схемы включения реостата и потенциометра показаны на Рис.2.

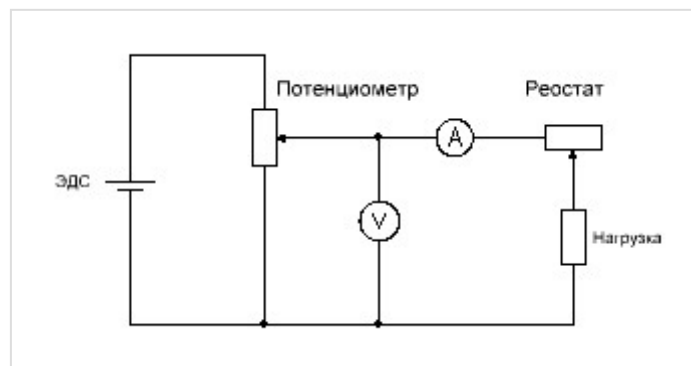


Рис. 2. Схема включения потенциометра и реостата

В дальнейшем такие переменные сопротивления многократно конструктивно изменялись. Сначала стержень из круглого стал прямоугольным (скользящий контакт на плоской поверхности работал лучше), затем он трансформировался в плоскую дугу с намотанной на ней проволокой. Здесь скользящий контакт начал двигаться по окружности, описывая при повороте ручки дугу с углом раскрытия примерно 300 градусов (именно такую угловую длину имеет токопроводящая дорожка у любого современного потенциометра). Еще позже, проволочные реостаты и потенциометры были заменены на более технологичные в производстве металлопленочные, что впрочем, никак не отразилось на принципе их работы, и не отменило все предыдущие конструкции, которые широко применяются до настоящего времени.

Величина сопротивления между одним из крайних и средним выводами такого потенциометра зависит от угла поворота скользящего контакта линейно. Если всю угловую длину резистивной дуги принять за 100%, то поворот скользящего контакта на 3 градуса увеличит (или уменьшит) электрическое сопротивление между выбранной парой контактов на 1% от сопротивления между крайними выводами, не зависимо от того, в какой именно части токопроводящей дуги находится при этом скользящий контакт.

Но если во многих цепях, где применялись потенциометры, линейная зависимость сопротивления от угла поворота скользящего контакта не вызывала никаких нареканий, то в цепях регулировки уровня сигнала усилителей ЗЧ линейные потенциометры оказались крайне не удобны. Правда причина была не в самих потенциометрах, а в психоакустических особенностях уха. При регулировке **уровня электрического сигнала** на большей части дуги **уровень громкости звука** изменялся очень не значительно, и только близко к крайнему положению регулятора его эффективность резко возрастала, изменяя громкость звука практически скачкообразно. Это объяснялось нелинейностью чувствительности уха, что хорошо видно на показанных на Рис.1 графиках кривых равной чувствительности (громкости).

Выход был найден быстро – сначала в первых проволочных потенциометрах проволоку стали наматывать с изменяемым шагом (в начале намотки – виток к витку, затем все реже и реже), потом оказалось, что проще сделать стержень не цилиндрическим, а коническим, или с криволинейно изменяющимся по длине диаметром. Затем диэлектрическую дугу стали делать с изменяющейся высотой (при этом изменялась длина каждого витка наматываемой проволоки), а с появлением металлопленочных технологий стали просто наносить разную толщину (или ширину) токопроводящего слоя на резистивную дорожку.

Для регуляторов громкости требовалась **обратнологарифмическая функциональная зависимость** сопротивления от линейного перемещения или угла поворота скользящего контакта. Аналогичные потенциометры применялись и в появившихся чуть позже регуляторах тембра, где требование «кривизны» регулировки так же диктовалось особенностями строения человеческого уха.

С появлением устройств автоматики, телеметрии, дистанционного управления, а позднее и аналоговой вычислительной техники, потребовались и другие формы функциональной зависимости сопротивления: синусные, косинусные, экспоненциальные, и другие.

Со временем появились и тонкомпенсированные регуляторы громкости – потенциометры с обратнологарифмической функциональной зависимостью, у которых кроме двух неподвижных выводов и скользящего контакта, было еще несколько промежуточных неподвижных выводов, расположенных вдоль резистивной дорожки. К этим выводам присоединялись внешние RC цепи, корректирующие тембральную окраску звука (проще – изменяющие АЧХ такого регулятора), в зависимости от устанавливаемого уровня громкости. Мне довелось держать в руках раритетный немецкий регулятор громкости от музыкального автомата 30-х годов прошлого века, у которого было 12(!) дополнительных промежуточных выводов. Графическое изображение потенциометра для тонкомпенсированной регулировки громкости с четырьмя промежуточными выводами показано на Рис. 3.

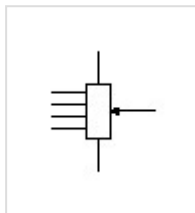


Рис. 3. Потенциометр с несколькими промежуточными выводами для тонкомпенсированной регулировки громкости

Со временем требования к многообразию регулировочных характеристик потенциометров были сведены к трем, наиболее часто применяемым функциональным зависимостям: линейной, логарифмической и обратнологарифмической. Они указываются на корпусе потенциометра наряду с его номиналом, и обозначаются так:

— буква **A** (кириллица, отечественный стандарт) или буква **B** (латиница, западный стандарт) соответствует линейной зависимости сопротивления;

— буква **Б** (кириллица, отечественный стандарт) или буква **C** (латиница, западный стандарт) соответствует логарифмической кривой сопротивления;

— буква **B** (кириллица, отечественный стандарт) или буква **A** (латиница, западный стандарт) соответствует обратнологарифмической зависимости сопротивления.

Графики основных типов зависимостей – линейной (черная прямая), логарифмической (синяя кривая) и обратнологарифмической (зеленая кривая) показаны на Рис. 4. Там же, в качестве примера показана S-образная функциональная зависимость (оранжевая кривая).

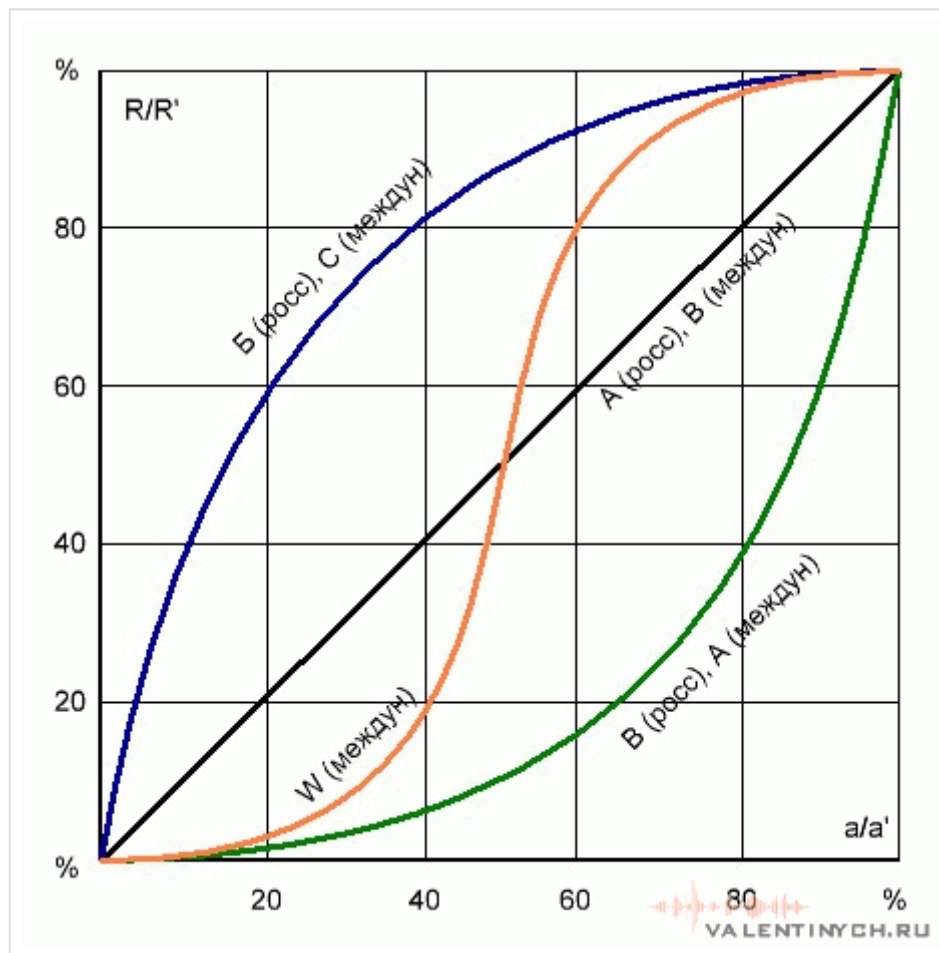


Рис. 4. Различные типы функциональные зависимости потенциометров

По оси ординат на графиках указана величина сопротивления между крайним (нижним по схеме на Рис. 2) и скользящим контактами в процентах, по оси абсцисс – угловой ход скользящего контакта, так же в процентах.

На кривой «Тип В(росс)» видно, что в начале движения скользящего контакта (от нулевой точки на графике) сопротивление растет очень медленно: при повороте ручки на 20% сопротивление увеличится всего лишь на ~2,5%. Следующие 20% хода дадут увеличение сопротивления уже на 6% (к имеющимся 2,5%). При повороте ручки до 60-процентной отметки сопротивление увеличится почти до 16% от номинала. Очередные 20% хода (до 80% максимального угла поворота) дадут приращение сопротивления почти до 40%, а оставшаяся 1/5 часть угла поворота увеличит сопротивление между парой контактов более чем на 60%!

Для логарифмической кривой («тип Б») зависимость сопротивления от угла поворота противоположная – в начале хода сопротивление увеличивается быстро, затем все медленнее. Очевидно, единственным принципиальным отличием потенциометров

типов В(росс) и Б(росс) является «зеркальность» характеристик, т.е. они полностью взаимозаменяемы с одной оговоркой – направление регулировки у них противоположное.

У потенциометров с S-образной кривой («Тип W») на первой половине хода сопротивление растет примерно так же, как и у потенциометров «Тип В(росс)», т.е. обратнологарифмически (от медленного изменения к быстрому), а на второй половине хода зависимость изменяется на логарифмическую (от быстрого изменения к медленному).

Кроме того, промышленно выпускаются потенциометры и с другими функциональными зависимостями, о которых я упоминал выше, но с ними вряд ли кому-то из нас доведется столкнуться в своей DIY-практике.

Если же на корпусе потенциометра отсутствует какая-либо буквенная маркировка, то наверняка это потенциометр с линейной функциональной зависимостью.

Теперь вернемся к схеме потенциометра, но представим его в виде двух реостатов, включенных встречно-последовательно. Условимся также, что скользящие контакты обоих реостатов механически жестко связаны между собой. Схема такого включения показана на Рис. 5.

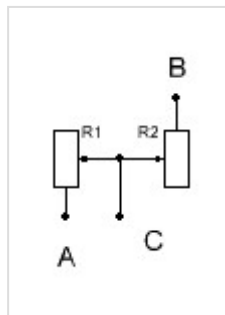


Рис. 5. Схема замещения потенциометра двумя реостатами

Не трудно заметить, что при равенстве электрических сопротивлений R обоих реостатов, и линейности их характеристик, общее сопротивление цепи между точкой А и точкой В будет неизменно равно $r_1 + r_2 = R$, при любом положении скользящих контактов (точка С). Здесь буквами r_1 и r_2 обозначены сопротивления потенциометров в каком-то промежуточном положении скользящих контактов.

Коэффициент деления такого переменного резистивного делителя будет линейно изменяться от бесконечности (скользящие контакты находятся в крайнем нижнем положении), до единицы (скользящие контакты находятся в крайнем верхнем положении). Коэффициент деления при любом положении скользящих контактов можно рассчитать по формуле: R/r_1 . Учитывая, что такой делитель предназначен для деления напряжения, приложенного к точкам А и В, напряжение в точке С (относительно точки А) будет равно: $V_c = V * R/r_1$, где V – напряжение между точками А и В. Напомню, что такой потенциометр будет обладать линейной функциональной зависимостью.

Вернемся теперь к обычной схеме потенциометра, но дополним его еще одним постоянным резистором с сопротивлением R2, равным сопротивлению потенциометра R1, подключив его между точками С и А.

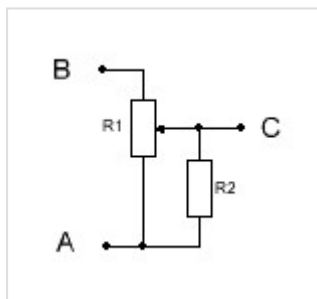


Рис. 6. Модифицированный потенциометр с измененной функциональной характеристикой

Очевидно, что в нижнем положении скользящего контакта резистор R2 окажется «закороченным», и не будет влиять на общее сопротивление цепи ВА, которое в этом случае останется равно R1. Но в верхнем положении скользящего контакта сопротивление цепи ВА уменьшится за счет параллельного включения R1 и R2 и в нашем случае будет равно: $(R1 \cdot R2) / (R1 + R2) = 0,5R$. Таким же станет и сопротивление цепи СА.

А как будет изменяться сопротивление цепей ВА и СА при движении скользящего контакта? И останется ли функциональная характеристика такого потенциометра линейной? Проще всего на эти вопросы ответить, построив графики в электронной таблице Excel. Но сначала давайте несколько изменим обозначения сопротивлений.

Далее буквой R я буду называть общее сопротивление цепи ВА при любом положении скользящего контакта. Маленькой буквой r я буду называть сопротивление одиночного потенциометра, буквой r' я буду называть сопротивление нижнего «кусочка» одиночного потенциометра, буквой r1 я буду называть сопротивление постоянного резистора, а буквам dr я буду называть сопротивление участка СА, состоящего из нижнего «кусочка» потенциометра и включенного параллельно этому «кусочку» постоянного резистора.

Учитывая, что нас интересует не столько характер изменения сопротивления какого-либо участка цепи, сколько коэффициент деления нашего модифицированного резистивного делителя (составного потенциометра), будем рассчитывать именно этот параметр, обозначив его как Kr. Тогда для построения графиков резистивной зависимости в электронной таблице можно будет воспользоваться следующими формулами:

$$R \text{ (в общем случае)} = r - r' + dr = r - r' + (r' \cdot r1) / (r' + r1).$$

$$Kr = R / dr = R / (r' \cdot r1) / (r' + r1).$$

Теперь, «наложив» эти формулы на угол поворота скользящего контакта потенциометра, построим интересующие нас графики. Для просмотра графиков скачайте архивный файл [Graf.rar](#).

По умолчанию, в таблице неизменно задано сопротивление исходного потенциометра – оно равно 100 кОм. Сопротивление постоянного резистора «по умолчанию» равно 15 кОм. При таком соотношении сопротивлений итоговая регулировочная кривая довольно точно эмулирует обратнологарифмическую функциональную зависимость. Но при желании вы можете задать иное значение сопротивления добавочного резистора, и тем самым изменить форму итоговой кривой.

Коэффициент деления рассчитывается для напряжения на модифицированном потенциометре, численно равным значению сопротивления исходного потенциометра. Это сделано для того, чтобы получить неизменные масштабные сетки графиков, и не имеет принципиального значения для моделирования резистивных зависимостей. Для ввода или изменения значений добавочного резистора предназначено поле, выделенное желтым цветом. В светло-зеленых полях отображаются итоговые расчетные величины. На графиках красной кривой изображается регулировочная кривая, а синей кривой показана зависимость изменения сопротивления участка ВА от угла поворота скользящего контакта.

Формульные поля таблицы не доступны для модификации, но желающие могут получить у меня исходный незалоченный файл таблицы, или самостоятельно ее повторить, используя приведенные выше формулы.

Разумеется, предложенный способ эмуляции нелинейности не является математически верным. Но в абсолютном большинстве случаев такая методика вполне допустима, так как позволит в случае отсутствия промышленного потенциометра, подобрать ему весьма близкую по параметрам замену.

Наверняка многих из вас смутит то, что общее сопротивление такого сборного потенциометра будет довольно сильно изменяться при регулировке. В варианте «по умолчанию», сопротивление R будет изменяться от 100 кОм (положение регулятора «минимальная громкость»), до 13 кОм («максимальная громкость»).

Так ли это страшно, и как изменение величины R и не идеальность характеристики потенциометра может сказаться на работе устройства в целом?

Прежде всего, вспомним, для каких цепей может потребоваться подобный потенциометр. Если ограничиться исключительно «примочкостроительными» потребностями, то я вижу всего три-четыре основных варианта применения потенциометров с обратнологарифмической зависимостью:

1) Регулятор уровня выходного сигнала педали-эффекта. По сути – это обычный регулятор громкости (РГ). Как показано выше, функциональность РГ определяется физиологическими особенностями человеческого уха. Считается, что такой регулятор должен иметь обратнологарифмическую характеристику. Но обратный логарифм (как и логарифм) – не более чем экспоненциальная функция с определенными коэффициентами «кривизны», и ее направления. Величина этой кривизны (да и ее форма тоже!) не являются жесткими канонами, от которых нельзя отступать. И если наш эмулированный обратный логарифм будет незначительно отличаться от математического, то вряд ли какое ухо (из здесь присутствующих) это заметит.

2) Промежуточный регулятор усиления (РУ) канала (овердрайв, дист, фузз, и т.п.). Здесь требование нелинейной характеристики регулирования определяется не физиологией, а моторикой. В принципе можно «поймать блоху» и на краешке диапазона регулировки, но гораздо удобнее, если этот краешек будет немного пошире. Следовательно, опять никаких жестких требований к форме регулировочной кривой нет.

3) Регулятор частоты в генераторе LFO и/или VCO. Здесь вообще никаких привязок к человеку нет. Но удобнее регулировать частоту, используя именно логарифмическую шкалу регулятора. Значит, говорить о жестком соответствии регулировочной характеристики и в этом случае не стоит.

4) Темброобразующие цепи. Нелинейность характеристики в регуляторах тембра так же, как и в РГ, является следствием не идеальности наших ушей. Но вряд ли кто станет утверждать, что все уши не идеальны одинаково! Значит, и коррекция этих не идеальностей, по большому счету, должна осуществляться персонифицировано. Но я сомневаюсь, что кто-то будет создавать то, или иное устройство исключительно для одного человека. Получается, опять какое-то усреднение, а значит – расплывчатость или неопределенность! Так что и здесь можно без отрицательных последствий довольно сильно отклониться от «прописанного идеала».

Точно так же я могу объяснить допустимость применения потенциометра с «переменным собственным сопротивлением». Для этого опять рассмотрим предыдущие четыре варианта.

1) Регулятор громкости. Вспомним, что это пассивный трехполюсник, обладающий входным и выходным импедансом (сопротивлением). Входной импеданс нашего сборного потенциометра равен сопротивлению цепи ВА, которая и является обсуждаемой «переменной». Известно, что для нормальной работы двух последовательных каскадов, входной импеданс последующего каскада должен быть как минимум в 10 раз больше выходного импеданса предыдущего каскада. Значит, если в худшем случае входной импеданс нашего потенциометра равен 13 кОм, выходной импеданс предыдущего каскада должен быть не более 1,3 кОм. Обычно источником сигнала для РГ и РУ бывает транзистор или операционный усилитель. Коллекторная нагрузка каскада на биполярном транзисторе обычно выбирается в районе единиц кОм. Именно поэтому в качестве нагрузки для такого каскада применяют потенциометры с сопротивлением не меньше 50 кОм. Значит, сопротивление нашего сборного пота в таком варианте маловато, и его следует увеличить как минимум в 5 раз. Для этого нужно просто выбрать потенциометр не 100 кОм, а 500 кОм, и в пару ему установить резистор не 15, а 75 кОм. В случае, когда источником сигнала является ОУ, можно вообще ничего не делать – выходное сопротивление операционников достаточно низкое, и нагрузкой в 13 кОм их не испугаешь. Единственное, о чем нужно помнить, так это о номинале межкаскадной емкости. Для такого РГ потребуется конденсатор с емкостью не менее 0,47 мкф, но при этом регулятор получится тонкомпенсированным – при снижении уровня громкости автоматически будет увеличиваться уровень низких частот в выходном сигнале. Что же касается выходного импеданса нашего потенциометра, то он изменяется точно так же, как и импеданс одиночного потенциометра – в соответствии с положением регулятора. В нашем случае – от 0 до 13 кОм, что очень хорошо позволит согласовать с ним любой последующий каскад.

2) Случай с РУ рассмотрен выше, а здесь хотелось бы сказать, что в случае использования сборного потенциометра после пассивных темброблоков задача несколько усложняется, т.к. там обычно используют высокоомные РГ (500 кОм-1 МОм). Так что это пожалуй единственное место, куда не просто будет подобрать сборный потенциометр. Не просто, но тем не менее можно!

3) Регуляторы частоты. Обычно в таких цепях потенциометр используют в реостатном включении, т.е. задействуют только 2 вывода – крайний и средний (скользящий). В таких случаях вообще нет никаких препятствий для применения самодельного сборного потенциометра. А так как большинство генераторов собирается на ОУ, то это снимает ограничения и для потенциометрического включения.

4) В темброблоках встречается два способа включения потенциометров – реостатное и потенциометрическое. Все, что было сказано выше относительно реостатной схемы, в полной мере можно отнести и к темброобразующим цепям. Потенциометрическое включение для обсуждения требует конкретных вводных данных, поэтому я просто не буду говорить ничего по этому поводу, кроме одного – и здесь, при необходимости, можно найти возможность применения самодельных сборных потенциометров.

Для гурманов и педантов могу предложить еще один вариант сборного потенциометра, с гораздо меньшим изменением общего сопротивления при регулировке. Для реализации этого варианта потребуется еще один дополнительный постоянный резистор, который нужно будет включить так, как показано на Рис. 7.

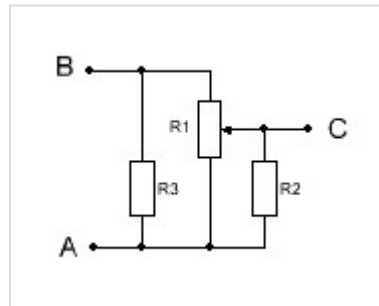


Рис. 7. Модифицированный потенциометр с измененной функциональной характеристикой (вариант 2)

Файл архива [Graf.rar](#) содержит автоматическую таблицу для расчета и такого потенциометра.