

Без “звона”

Применение в радиоприемных устройствах узкополосных фильтров для выделения телеграфного сигнала и подавления помех связано с проблемой так называемого "звона", когда высокодобротная система фильтра, получив порцию энергии возбуждения от входного сигнала, некоторое время поддерживает колебания, которые, затухая, ухудшают разборчивость CW сигнала. David Davies, G4YKT, предложил [1] применять фазовый метод подавления сигналов ненужных частот и разработал полосовой фильтр (ПФ) звуковых частот, свободный от вышеупомянутого недостатка: ПФ не содержит высокодобротных резонансных систем и представляет собой фазосдвигающую схему на ОУ серии 074.

Прочитав статью [1], я, как и её автор, загорелся идеей создания такого фильтра и решил поэкспериментировать, собрав более сложный ПФ. Руководствуясь методикой, приведенной в статье, я разработал экспериментальную печатную плату ("полигон") для ПФ (в оригинале отсутствует), которая может стать универсальной.

Фазосдвигающий фильтр

Структурная схема фильтра приведена на рис. 1. Каждый из элементов DA1 — DA12 представляет собой полосовой фильтр с низкой добротностью ($Q = 2$), со средней частотой полосы пропускания $F_{ср} = 815$ Гц, выполненный на ОУ, включенных по схеме инвертирующих усилителей. На этой частоте каждый ПФ обеспечивает фазовый сдвиг точно 180° , на всех других частотах этот сдвиг будет отличаться от 180° в ту или иную сторону. Устройство ослабляет все частоты, сдвиг фазы сигнала на которых отличается от 180° .

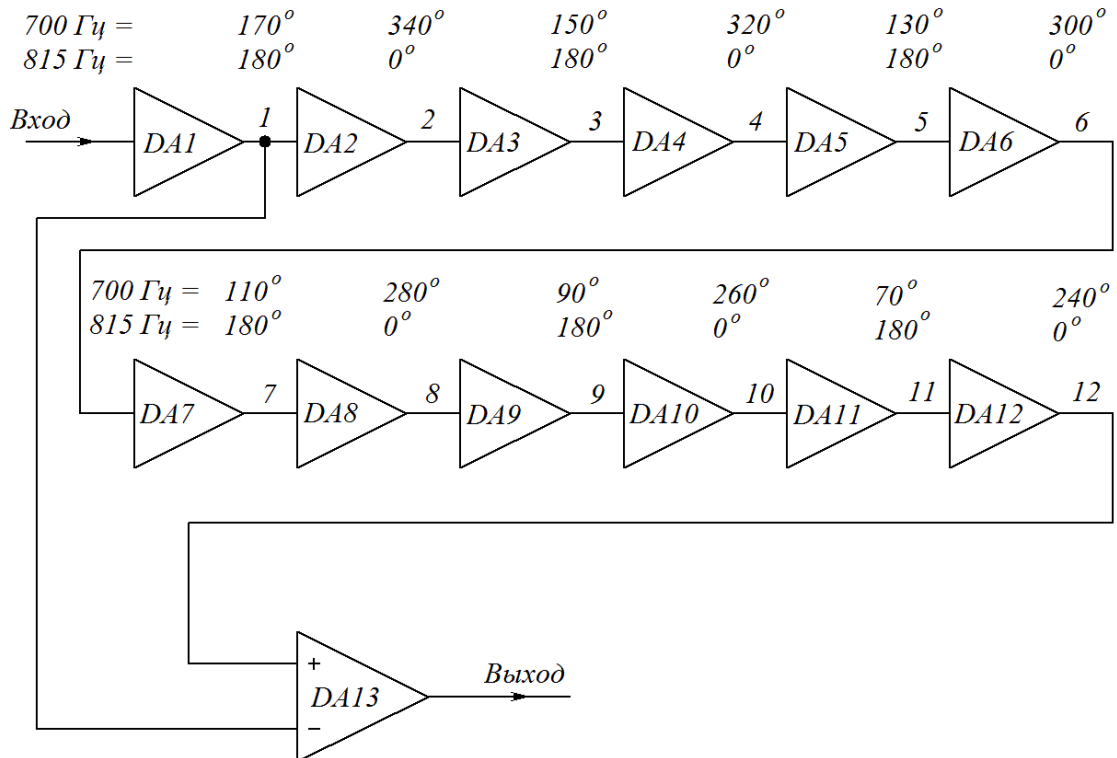


Рис. 1. Структурная схема фильтра

Подадим на вход устройства сигнал частотой 815 Гц. Тогда на выходе DA1 его фаза будет повернута на 180° , т.к. ОУ включен по схеме инвертирующего усилителя. Соответственно, на выходе DA2 — еще на 180° , и т.д. до конца цепочки операционных усилителей. В точках 1, 3, 5, 7, 9 и 11 будут одинаковые со входным по форме сигналы, но противофазные им, в то же время, в точках 2, 4, 6, 8, 10 и 12 сигналы будут в фазе. В ОУ DA13, сдвинутый по фазе на 180° входной сигнал, и сигнал, прошедший цепочку инверторов, сравниваются, будучи поданы соответственно на инвертирующий и неинвертирующий входы ОУ, что, в результате, дает двойную амплитуду сигнала относительно входных. При этом сигнал с частотой 815 Гц проходит на выход DA13 практически неизменным (неподавленным). На частотах, отличных от 815 Гц, ситуация очень неоднозначна — например, для сигнала с частотой 700 Гц, фазовый сдвиг на каскад составит около 170° , и фазы на выходе каждого элемента будут иметь значения, указанные на рис.1. При сложении в DA13, из-за разности фаз, на частоте 700 Гц будет наблюдаться частичное подавление сигнала, которое будет тем больше (при дальнейшем изменении частоты), чем сильнее фазы двух сигналов, поступающих на входы ОУ DA13, будут отличаться друг от друга. Не следует забывать, что и в DA13 фаза сигнала, прошедшего через DA1, инвертируется. На практике следует учитывать, что полное подавление сигнала возможно лишь тогда, когда противофазные сигналы имеют одинаковые амплитуды. Для обеспечения амплитудного баланса в устройство, принципиальная схема которого приведена на рис.2, введен балансирующий подстроечный резистор R11.

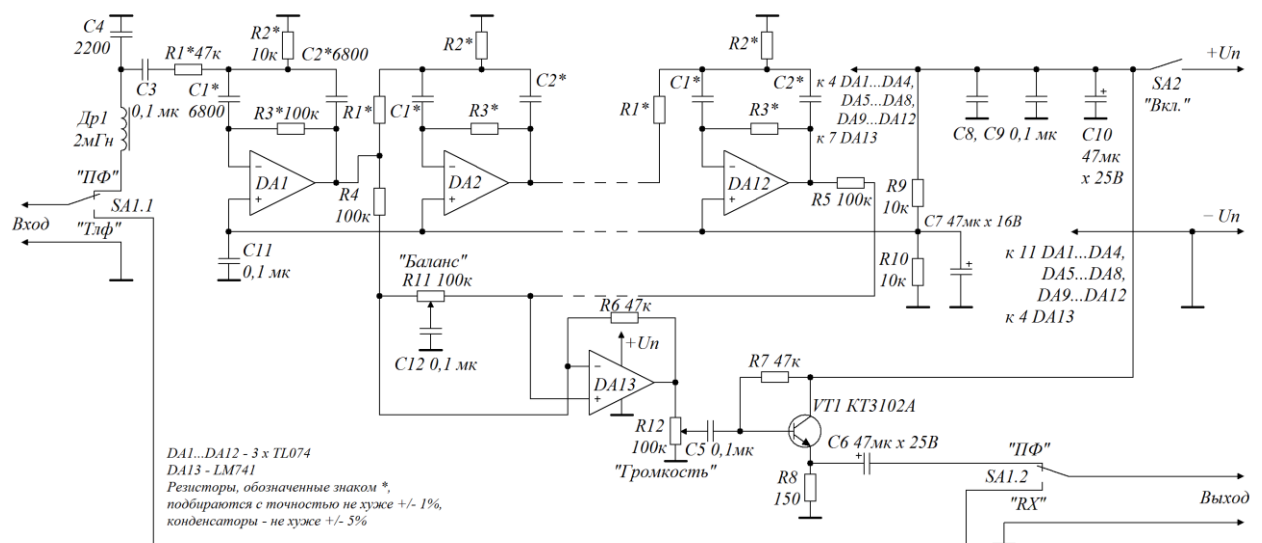


Рис. 2. Фильтр. Схема принципиальная электрическая

Конденсатор C12 предотвращает попадание постоянной составляющей на входы DA13 через общий провод. Ширина полосы пропускания активного фазового фильтра зависит от количества его составляющих элементов (в частности, ОУ, включенных в цепочку). Чем больше элементов в цепочке, тем больше фазовый сдвиг, тем больше подавление сигналов, частоты которых отличаются от 815 Гц. В принципе, полоса пропускания фильтра может быть доведена до нескольких герц, но разумный компромисс, заключающийся в балансе между количеством элементов в цепочке и вносимыми ими шумами и полосой пропускания, наступает при ширине полосы 120 Гц.

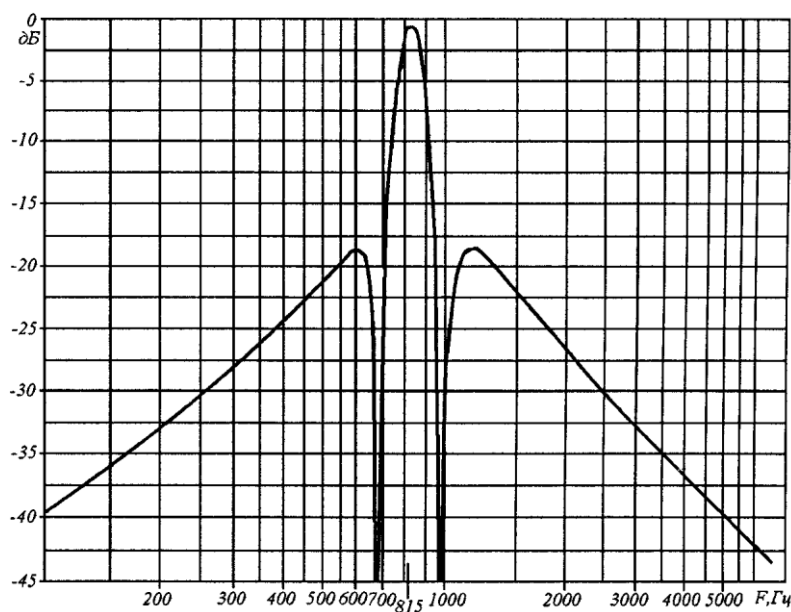


Рис. 3. АЧХ фильтра

На рис.3 показана общая АЧХ фильтра, где видна узкая полоса пропускания фильтра с крутыми скатами: любой сигнал с частотой, отличной от 815 Гц, подавляется. Также видны точки полного подавления сигналов, когда фазы сигналов на входах DA13 совпадают (далее сигнал с DA1 инвертируется, а с DA12 — не инвертируется, что приводит к возникновению противофазных сигналов на выходе DA13 и их полной взаимной компенсации). Наличие точек полного подавления сигнала хорошо помогает при приеме сигналов радиостанций рядом с мощными помехами.

Центральная частота 815 Гц для полосы пропускания выбрана по двум причинам. Во-первых, она расположена в оптимальном месте наибольшей чувствительности человеческого уха, что благоприятно сказывается на приёме CW сигналов. Во-вторых, и это явилось определяющим фактором, частото-определяющие компоненты звеньев фильтра имеют величины стандартного ряда номиналов. При желании, конструктор может сам пересчитать параметры фильтра по формулам, приведенным в [1]:

$$F = \frac{1}{2\pi C} \cdot \sqrt{\frac{R1+R2}{R1 \cdot R2 \cdot R3}};$$

$$Q = \pi \cdot R3 \cdot C \cdot 10^3;$$

$$A = \frac{R3}{2R1},$$

где F — средняя частота фильтра, Гц; C = C1 = C2;

Q — добротность звена фильтра; A — коэффициент усиления звена фильтра (сопротивления всех резисторов при расчетах — в мегаомах, ёмкости конденсаторов — в микрофарадах).

Выходной каскад устройства выполнен по простейшей схеме и позволяет подключать головные телефоны сопротивлением 8 Ом. G4YKT в [1] указывает, что предпочитает использовать высококачественные низкоомные головные телефоны, которые позволяют

реализовать большее соотношение сигнал/шум и обеспечивают меньшее искажение сигнала.

Конструкция ПФ

Очень важно, чтобы в качестве частото-определяющих элементов R1 — R3 и C1, C2 (детали с одинаковыми обозначениями в частото-задающих цепях, отмеченные символом "звездочка" (*), имеют одинаковые номиналы) использовались с малыми отклонениями значений от номинальных. В прототипе применялись конденсаторы с допуском $\pm 5\%$ и пленочные металлические резисторы с допуском $\pm 1\%$ и менее (например, C2-29). Номиналы других деталей не так критичны, как и способ оформления конструкции фильтра. Опытный образец 8-звенного ПФ [1] был смонтирован на куске текстолита размерами 160x100 мм с использованием отдельных ОУ 741, а затем была проведена модификация фильтра с использованием более новых ОУ — 071 и 081. В основном это было сделано для того, чтобы выяснить, изменяются ли собственные шумы фильтра при замене микросхем. Кстати, разницы отмечено не было. Что же касается уровня собственных шумов фильтра, так его хватило лишь для определения того, что фильтр с отсутствующим сигналом на входе находится во включенном состоянии, при этом, использовались высококачественные головные телефоны. Последняя версия фильтра была выполнена на ОУ 074, который представляет собой четверенную конструктивно версию отдельных ОУ 071. В общем-то, использовать четверенные ОУ или отдельные — дело вкуса, как и применение панелек под ИМС. Если конструктор не имеет достаточного опыта, то лучше применить вариант фильтра на отдельных ОУ с использованием панелек под них. Разница в цене небольшая, зато будет проще монтаж и замена (подбор) ИМС.

Если фильтр используется в составе радиостанции, т.е., работает в окружении сильных электромагнитных полей, то на его выходе в такт с посылками телеграфного сигнала могут появиться неприятные призвуки. ВЧ дроссель (Dr1 на рис.2) и "развязывающие" конденсаторы помогают решить проблему, но если электромагнитные наводки очень сильны, то весь фильтр следует поместить в экранирующий корпус.

Постоянные резисторы, кроме частото-определяющих R1 — R3, — МЛТ-0,125 или МЛТ-0,25, подстроечные — с линейной зависимостью от угла поворота оси (например, СЗ-38В). На принципиальной схеме, в целях экономии места, приведены не все каскады фильтра, т.к., они повторяются. При возникновении вопросов следует руководствоваться структурной схемой (рис.1), рисунками печатной платы (рис.4):

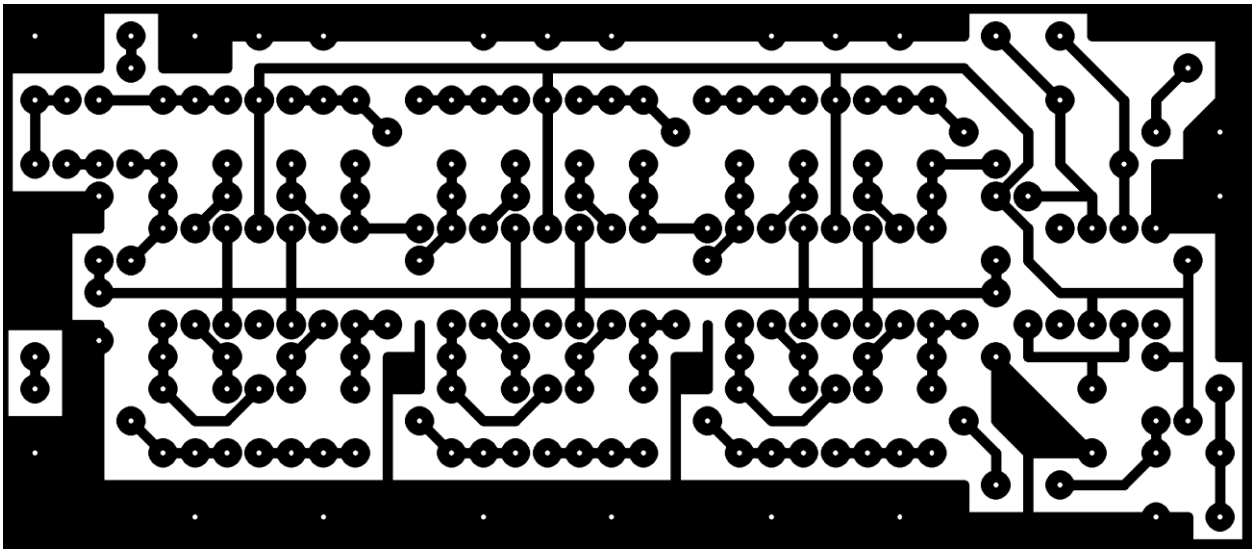


Рис. 4. Эскиз монтажной платы фильтра. Вид со стороны проводников. Размер платы: 97,5 x 42,5 x 1,5 мм

и размещения деталей (рис.5):

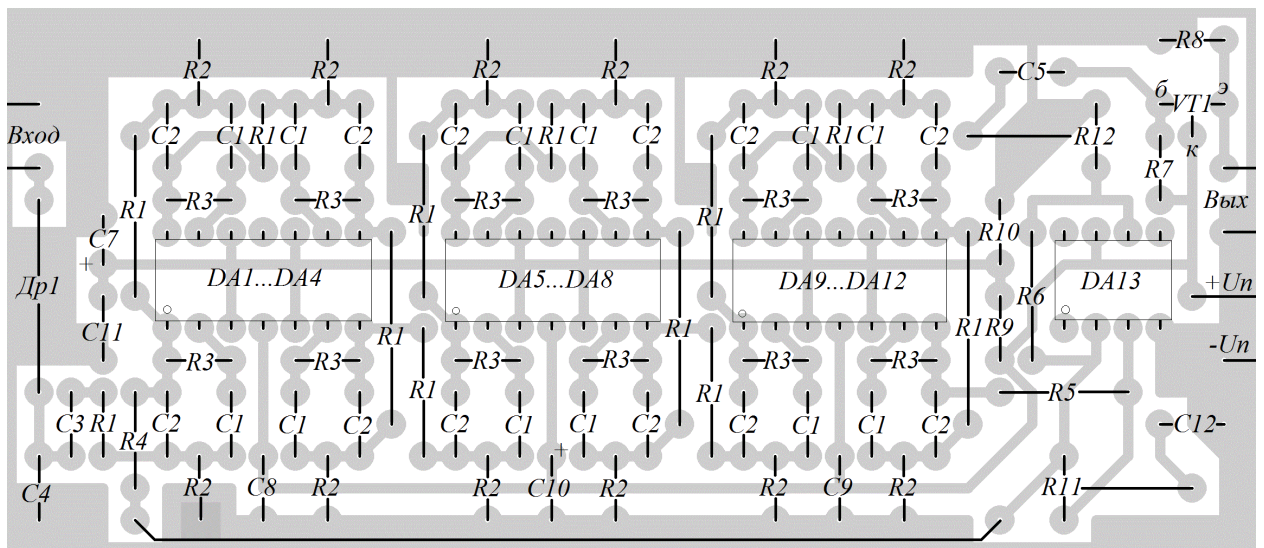


Рис. 5. Эскиз размещения деталей на монтажной плате фильтра

а также цоколевкой ИМС (рис.6 и 7).

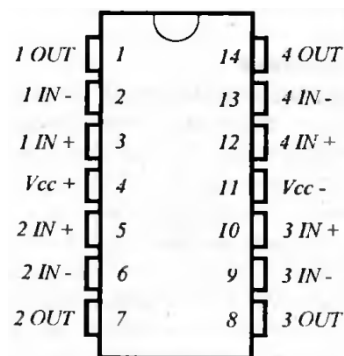


Рис. 6.

На рис.6 приведена цоколевка ИМС TL074 в 14-выводном корпусе. Выводы 1, 7, 8 и 14 — выходы, 2, 6, 9 и 13 — инвертирующие входы, 3, 5,10 и 12 — неинвертирующие входы, 4 — “плюс” питания, 11 — “минус” питания.

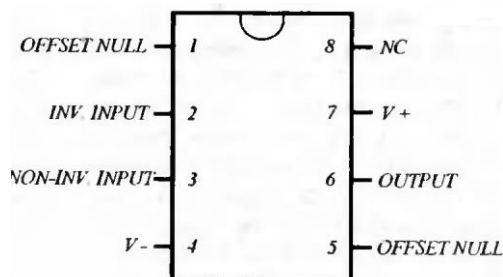


Рис. 7

Цоколёвка ИМС LM741 в 8-выводном DIP-корпусе приведена на рис 7. Выводы 1 и 5 — смещение нуля, 2 — инвертирующий вход, 3 — неинвертирующий вход, 4 — “минус” питания, 6 — выход, 7 — “плюс” питания, 8 — свободный

Настройка

Работу устройства проще всего проверить, подав сигнал с генератора ЗЧ на вход ПФ, подключив к выходу осциллограф. Подавая на вход сигнал частотой 815 Гц, каждый каскад проверяют на точный сдвиг фазы равный 180° , и сдвиг фазы на других частотах (фильтрующее действие устройства относительно других частот). Если генератор и осциллограф отсутствуют, то желательно остановиться на варианте фильтра, выполненном на отдельных ОУ с использованием панелек под них. Проверку и настройку тогда можно осуществить, используя выходной каскад фильтра (VT1 на рис 2) в качестве пробника. Вставив ОУ DA1 в панельку и соединив его выход через конденсатор емкостью 0,1 мкФ (предварительно разрядив конденсатор замыканием его выводов между собой) с базой VT1, подают на вход фильтра сигнал с приёмника и на выходе ПФ прослушивают сигнал с небольшой степенью фильтрации. Если всё нормально, то вставляют в панельку DA2, соединив его выход с базой VT1, и т. д., до конца цепочки. Усиление каждого ОУ близко к 1, поэтому амплитуда сигнала на выходе не будет увеличиваться с подключением каждого последующего ОУ, а будет улучшаться избирательность фильтра. Сначала движок балансирующего подстроечного резистора R11 должен быть установлен в среднее положение.

Когда фильтр будет проверен, и полоса пропускания будет соответствовать приведенной на рис 3, с помощью R11 добиваются большей глубины подавления сигнала по бокам полосы пропускания. Эта настройка будет компромиссной, т.к., полного подавления сигналов одновременно с двух сторон от полосы пропускания с помощью R11 добиться не удастся (скажется разброс параметров ОУ в зависимости от частоты и неточность частотоопределяющих элементов в каждом каскаде, здесь был бы уместен элемент подстройки в каждом каскаде, но это увеличит размеры фильтра). Из практики установка полного подавления с низкочастотного края (асимметрично) полосы пропускания больше отвечает удобству эксплуатации фильтра.

При работе с фильтром с помощью R12 устанавливают такой уровень сигнала, который примерно соответствует уровню сигнала без фильтра, т.е., в другом положении переключателя S1 (при "обходе" фильтра). Удобно настраивать фильтр на получение общей АЧХ, подключив к выходу анализатор спектра, а на вход — низкочастотный ГКЧ (все это могут обеспечить ныне компьютерные программы, например, SpectraLab). Визуально просматривается реакция каждого компонента на АЧХ (изменение величин частотоподающих элементов — резисторов и конденсаторов) в каждом каскаде, а также и влияние положения движка балансирующего потенциометра R11.

Заключение

Установка описанного фильтра в СВ тракт приемника способствует получению узкой полосы пропускания с крутыми скатами АЧХ при отсутствии каких-либо "подзвонов" или иных негативных явлений. Фильтр позволяет "вытянуть" СВ сигнал из шумов и помех в условиях, когда без фильтра сигнал практически не обнаруживается. На приводимой печатной плате можно смонтировать ПФ с любым четным числом элементов — от 2 до 12, при этом выход последнего ОУ в цепочке необходимо соединить с левым (по схеме рис 2) выводом резистора R5. Соответственно, в зависимости от количества включенных в цепочку ОУ будет изменяться и АЧХ ПФ.

Разработанная автором данной статьи печатная плата имеет размеры 97,5 x 42,5 мм и предназначена для монтажа 12-звенного ПФ. Со стороны деталей фольга не удаляется и служит экраном. Выводы деталей, не соединенные с общим проводом, проходят сквозь плату в отверстия, раззенкованные сверлом большего диаметра, выводы, соединяемые с общим проводом, припаиваются к фольге платы со стороны деталей "внахлест", в этих местах сквозь плату следует пропустить отрезки луженого провода и пропаять их с обеих сторон платы. Перемычка от резистора R4 к выводу 2 DA13 и R11, проходящая вдоль всей платы, выполнена из монтажного провода в изоляции (например, МГТФ- 0,12), который приклеен к плате со стороны деталей.

В устройстве можно применить иные (чем указаны на схеме) ОУ (например, LM324). Они дешевы, однако, имеют более высокий уровень собственных шумов, поэтому строить на них ПФ с количеством звеньев более 8 — 10 вряд ли целесообразно, хотя, если есть желание...

При уменьшении количества звеньев, размеры платы могут быть уменьшены. Корпус фильтра можно спаять из полосок фольгированного стеклотекстолита, опаяв плату ими по периметру. Входные и выходные гнезда, выключатель питания и тумблер "Обход" размещают на торцевых стенках корпуса. Идентичность сопротивлений одноименных резисторов частото-определяющих цепей всех каскадов ПФ перед установкой их на монтажную плату полезно проверить с помощью цифрового мультиметра, а идентичность емкостей конденсаторов C1 и C2 (также во всех цепочках) проверяется на измерителях RLC, Q-метрах или с помощью обычного авометра и генератора звуковых частот (ГЗЧ). Для этого собирается измерительный стенд (рис.8 - здесь Cx — один из тестируемых конденсаторов группы).

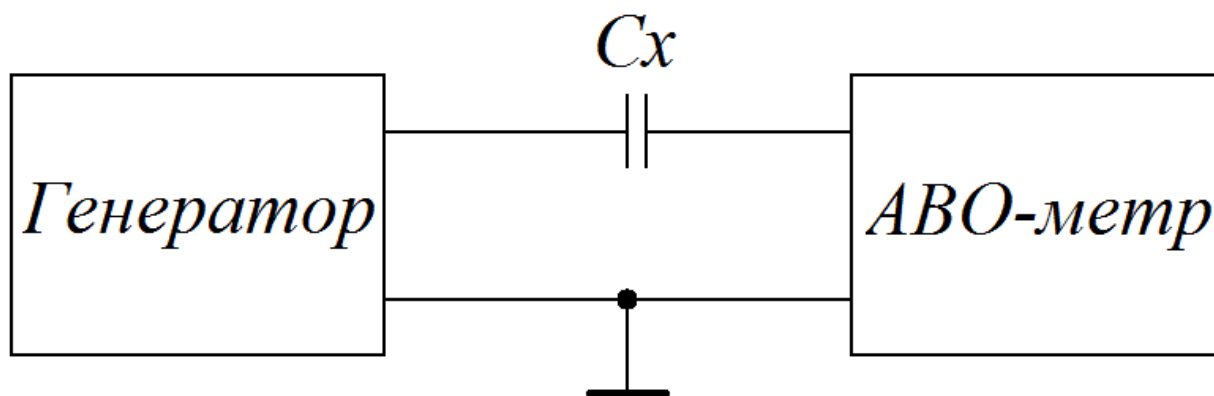


Рис. 8. Стенд для подбора одинаковых емкостей конденсаторов. Схема принципиальная электрическая

Авометр устанавливают на предел измерения переменного напряжения 1 В, с ГЗЧ подают сигнал с напряжением, достаточным для отклонения стрелки авометра до середины шкалы или чуть больше (здесь удобнее замечать разницу в напряжениях). Отмечают величину напряжения и, ничего не меняя, вместо C_x , по очереди подключают остальные проверяемые конденсаторы; при равенстве их емкостей, авометр будет показывать одинаковое напряжение. Если ёмкость какого-то конденсатора больше, то стрелка прибора отклонится на больший угол, если меньше, то - на меньший. Точная величина ёмкости конденсаторов не важна, т.к. сдвиг средней частоты ПФ на несколько герц "погоды не сделает", а вот неидентичность компонентов цепочек может испортить АЧХ фильтра.

Конденсатор C_6 включен в качестве соединительного звена между платой и переключателем SA1. Здесь лучше применить "продолговатый" конденсатор (например, К53-1). Индуктивность дросселя Др1 (рис.2) — не критична, можно использовать стандартные, индуктивностью 1—3 мГн. Все "точные" резисторы частото-определяющих цепей могут быть подобраны среди обычных резисторов (например, МЛТ-0,125 или МЛТ-0,25) с помощью цифрового мультиметра.

Полоса пропускания ПФ при изменении количества звеньев фильтра с 8 на 12 сужается со 120 до 100 Гц, поэтому для комфортной работы стабильность частоты гетеродина приёмника должна быть очень высокой.

Литература:

1. David Davies, G4YKT, Lifting CW out of noise. — Radio Communication, August, 1988, pp 609 ..610

Виктор Беседин (UA9LAQ)
г. Тюмень