

# ИЗМЕРИТЕЛЬНЫЙ ФИЛЬТР

*Евгений Карпов*

В статье приведена схема и конструкция фильтра для измерения очень малых уровней нелинейных искажений

В основном, эта статья предназначена для тех, кто занимается проектированием и настройкой аудиоаппаратуры профессионально, но вполне может быть полезна и энтузиастам, желающим получить адекватный результат. При измерении нелинейных искажений на уровне тысячных и десятитысячных долей процента существуют две проблемы – недостаточно «чистый» испытательный сигнал и не калиброванный измерительный тракт. Как показали объективные измерения, сами звуковые карты могут вносить искажения на уровне  $-80 \div -90$  dB, несмотря на задекларированный диапазон, и иметь зашумленный выходной сигнал. Еще хуже дело обстоит с цифровыми осциллографами, имеющими функцию БПФ, там уровень вносимых искажений может достигать  $-70$  dB и существенно зависит от общего усиления тракта осциллографа.

В какой-то степени эти проблемы можно решить с помощью этого фильтра и получить достаточно «чистый» испытательный сигнал и откалибровать тракт. Если немного исхитриться, то можно непосредственно оценивать и уровень искажений, вносимый пассивными компонентами.

Исходно фильтр предназначен для работы с генератором ГЗ-118, что не исключает его использование и с любым другим типом генераторов. Для фильтра была выбрана такая «популярная» измерительная частота – 1 кГц. При работе с настроенным генератором на выходе получается сигнал, у которого все гармоники лежат ниже уровня  $-140$  dB.

### Схема фильтра.

Это ФНЧ 7-го порядка с аппроксимацией по Чебышеву и частотой среза 1.4 кГц с двумя дополнительными нулями на частотах 2 и 3 кГц (Рисунок 1), что обеспечивает подавление второй гармоники на 60 dB и третьей на 80 dB (реально измеренные значения). Расчетная характеристика фильтра показана на рисунке 2.

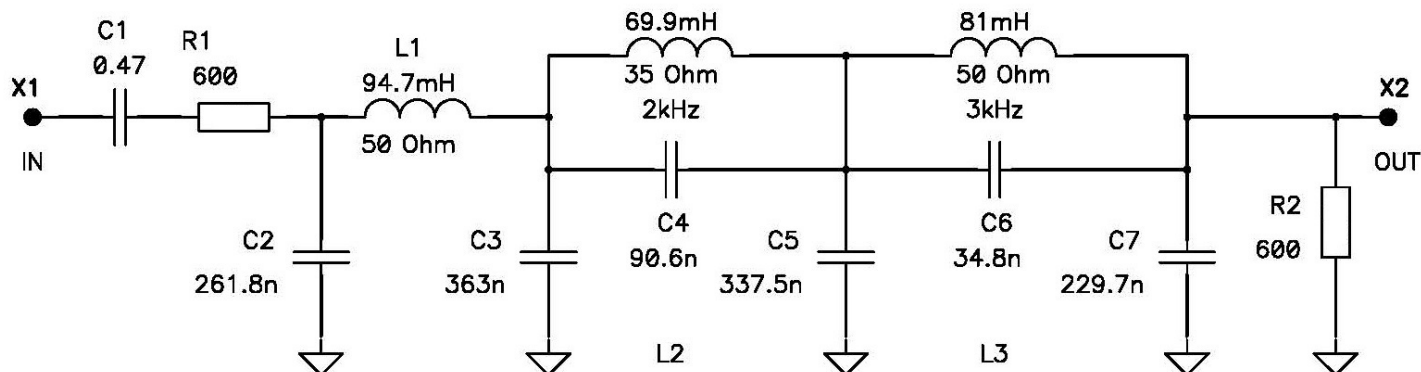


Рисунок 1

Номинальные сопротивления источника сигнала и нагрузки – 600 Ом. Конденсатор C1 непосредственного отношения к фильтру не имеет и на его работу не влияет, а защищает фильтр от постоянной составляющей. Бесплатная дополнительная польза от него – ФВЧ, образованный с входным сопротивлением фильтра и частично подавляющий низкочастотные шумы и помехи. Резистор R1 – выходное сопротивление источника сигнала. Если вы планируете работать с генератором с низким выходным сопротивлением, то резистор должен физически присутствовать в схеме. Но ничего особо страшного не произойдет, если он будет присутствовать всегда, просто подавление на частоте 1 кГц окажется больше расчетного. Резистор R2 – это сопротивление нагрузки, если планируется работа на реальную нагрузку больше хотя бы раз в 15-20, то резистор можно установить постоянно. Если сопротивление нагрузки будет сравнимо с номинальным значением для фильтра, то надо включать параллельно нагрузке добавочные резисторы для получения номинального значения.

На схеме указаны точные значения номиналов компонентов, в реальной жизни – желательно уложиться в 1% погрешности. Рядом с номиналом катушки указаны их активные сопротивления, превышать эти значения нежелательно, если немного меньше – не смертельно. В любом случае, перед использованием фильтра необходимо измерить его реальные параметры.

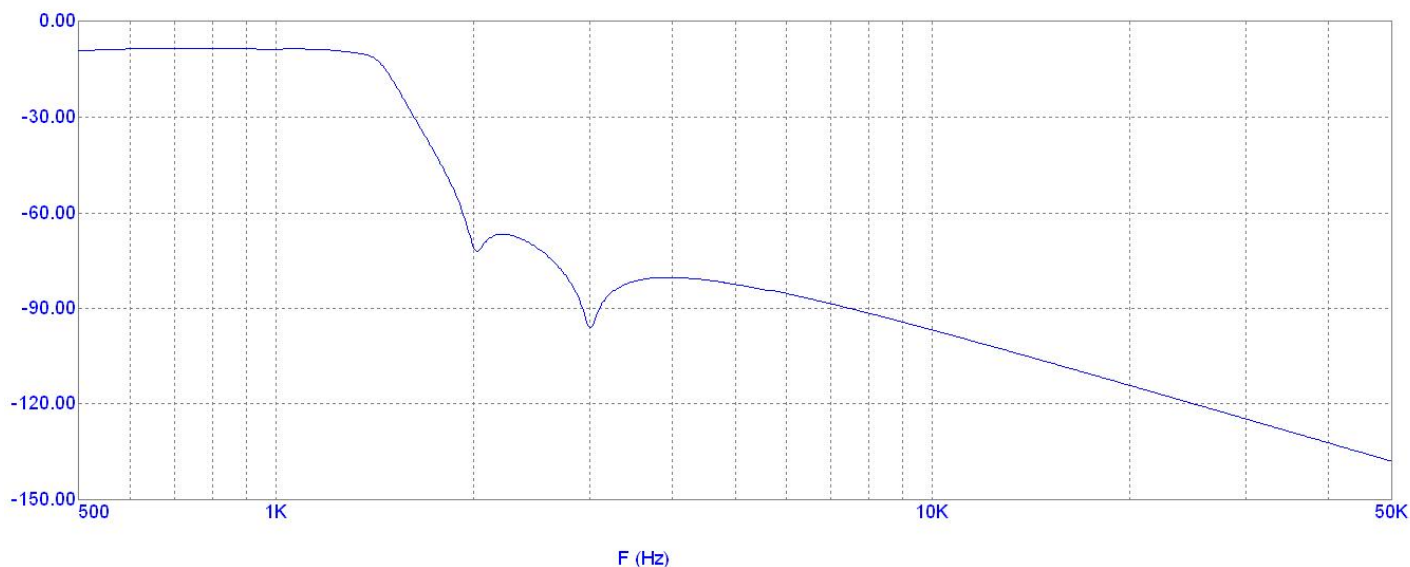


Рисунок 2

На рисунке 3 показана реальная АЧХ фильтра, а на рисунках 4÷6 – иллюстрация его работы совместно с генератором.

Чтобы увидеть реальную картину, фундаментальная частота подавлялась режекторным фильтром на основе двойного Т-моста. Хочу сразу заметить, что для непосредственного измерения уровня гармоник, это совсем не лучший вариант из-за весьма значительного подавления на второй и третьей гармонике. Вторая гармоника будет подавляться приблизительно на 9 dB, а третья – около 5 dB, что существенно искажает общую картину. Реальные значения уровней гармоник начинаются с 5 ÷ 6. И если проводить измерения на частотах 10 кГц и более с помощью звуковой карты, что-то увидеть вообще нельзя. Для этого нужен другой режекторный фильтр, но это тема другой статьи.

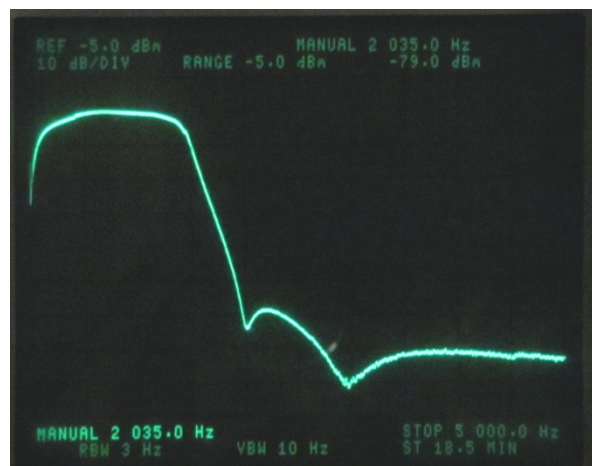


Рисунок 3

На рисунке 4 показан исходный сигнал генератора с явно различимыми несколькими гармониками на уровне -80 dB.

После подавления фундаментальной частоты на 60 dB (Рисунок 5) мы уже видим целый «забор» из гармоник. Что, в общем, характерно для усилителей с очень глубокой ОС.

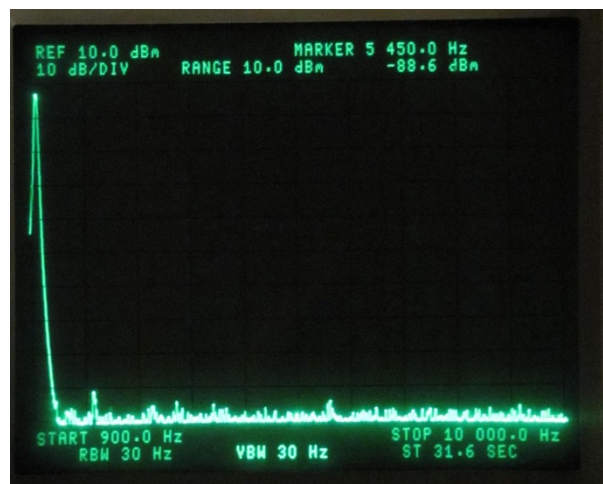


Рисунок 4

И на рисунке 6 показан сигнал после фильтра, где уже это все безобразие отсутствует. Зато мы видим наводки на сам фильтр, кратные частоте 50 Гц, это недостатки экранирования.

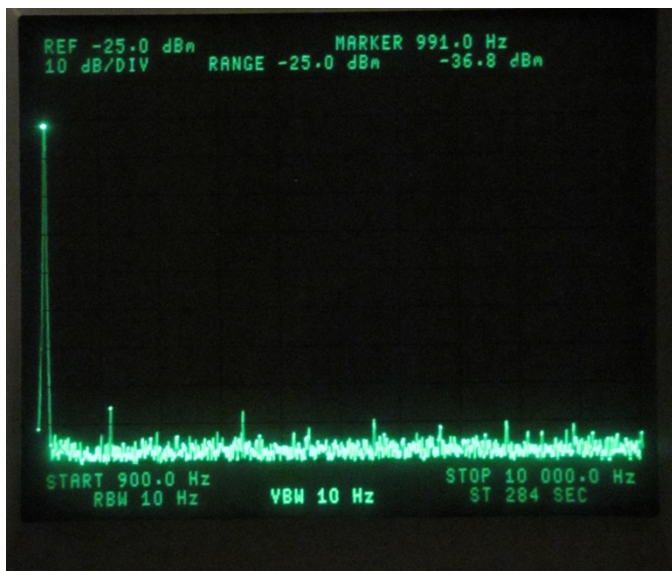


Рисунок 5

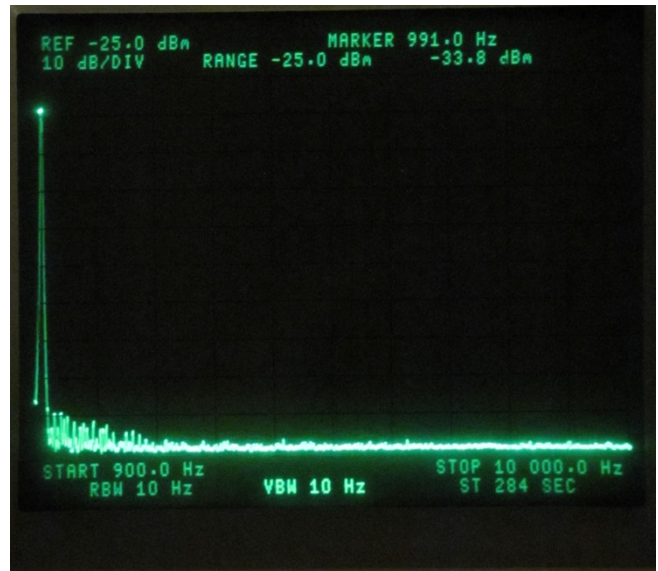


Рисунок 6

Частично это можно компенсировать правильным размещением фильтра в пространстве, хотя эти наводки и не мешают измерениям, так как на частоте 2-й и 3-й гармоники они подавлены. Лишние «палки» скорее раздражают. Кардинальное решение вопроса – магнитное экранирование, и почему я от него отказался, будет понятно в дальнейшем.

### Конструкция и детали.

К выбору компонентов надо отнестись весьма серьезно, забыть про аудиофильские мифы с быльями и руководствоваться исключительно техническими параметрами.

**Резисторы.** Наилучший вариант – металлофольговые, вполне подходят металлодиэлектрические (MFR) прецизионные группы «А». Я использовал С2-36

**Конденсаторы.** Полистирольные, фторопластовые, полипропиленовые. Надо ориентироваться на минимальные потери на частотах 1 и 10 кГц и минимальные собственные индуктивности. Были использованы емкости типа К71-7, МКР 10, ФКР 1. Для получения нужной емкости можно использовать параллельное включение нескольких штук.

**Индуктивности.** Катушки индуктивности – воздушные и являются главной «головной болью» при изготовлении фильтра. К сожалению, использование ферромагнитных сердечников (любых), даже в очень слабых полях, приводит в появлению гармоник в выходном сигнале. Обратной стороной идеальной линейности воздушной катушки мы имеем – значительные габариты, чрезвычайную чувствительность к наводкам, сильное взаимное влияние, высокую чувствительность к наличию поблизости просто массивных проводящих поверхностей, не говоря уже о материалах, имеющих явно выраженные магнитные свойства. С этим пришлось смириться и принести все удобства в жертву линейности.

Катушки намотаны на полистирольные каркасы (Рисунок 7) от катушечек с припоем польского производства. Эти размеры не догма, и имея другие каркасы близкого размера, нет проблем пересчитать число витков и диаметр провода при заданной индуктивности и сопротивлении. Желательно, чтобы в сечении катушка получалась ближе к квадрату.

Катушки L1 и L3 намотаны проводом Ø 0.29мм, катушка L2 Ø 0.335мм.

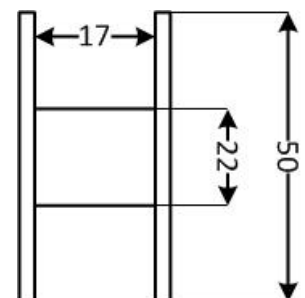


Рисунок 7



Катушка L1 имеет 2036 витков, катушка L2 имеет 1720 витков и катушка L3 имеет 1895 витков. Катушки мотаются виток к витку. Хочу обратить ваше внимание, что это приблизительные значения, так как получившаяся индуктивность будет зависеть и от типа провода, и от плотности намотки. Целесообразно при намотке увеличить число витков на 3÷4 процента и подогнать индуктивность под нужный номинал, сматывая лишние витки.

Самым важным этапом является выяснение взаимного расположения катушек. Общие правила такие: для катушек, находящихся в одной плоскости, – оси взаимноперпендикулярны, третья катушка смещена в другую плоскость параллельную первой, расстояние между центрами катушек не менее 100мм. На рисунке 8 показана конструкция фильтра.

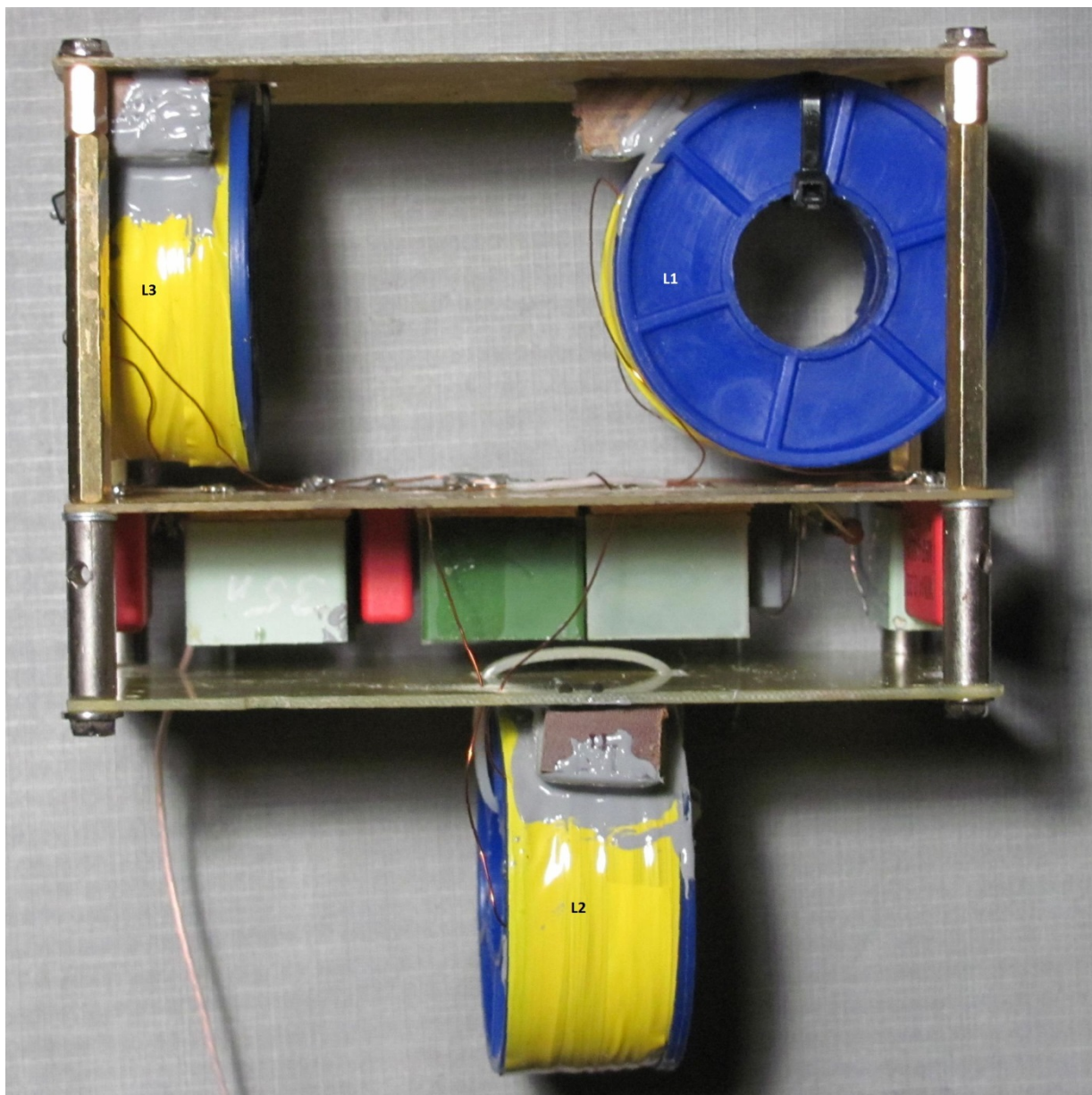


Рисунок 8

Фильтр собран на текстолитовых платах, и достаточно их две. Третья плата с емкостями получилась у меня случайно, я недооценил взаимовлияние катушек друг на друга. Каких-то особых требований по размещению емкостей нет, на плате установлены в нужных местах «пистоны», разводка выполнена частично выводами компонентов, частично голым одножильным проводом. Можно емкости просто приклеить к плате. Стандартные правила разводки для малосигнальных устройств. Перед тем как размещать емкости, надо определить положение катушек. Собирается этажерка из плат (весь крепеж не-

магнитный), катушка L1 крепится на плату, на нее подают с генератора максимально возможное напряжение с частотой 1 кГц.

К катушке L3 подключают осциллограф и перемещают ее до получения минимально возможного наведенного сигнала, временно ее крепят к плате. Теперь подключают генератор к L2, а осциллограф к L1 и L3 (здесь удобно иметь два луча), и перемещают ее до получения минимально возможного наведенного сигнала на других катушка. После этого размещают емкости и частично делают монтаж, не подключая катушки. Фильтр собирают и повторно производят юстировку катушек; следует иметь в виду, что даже небольшое смещение катушек или поворот может привести к изменению взаимовлияния в разы. Катушки фиксируют окончательно (я использовал клеящий герметик) и заканчивают монтаж. После этого проверяют АЧХ фильтра.

Контролируя АЧХ фильтра, было экспериментально выяснено, что расстояние между краем катушки и проводящей немагнитной поверхностью, должно быть не менее 15-20мм, а если поверхность массивная и обладает магнитными свойствами, то 120-150мм. Итак, габариты фильтра получились не маленькими, а если делать еще и магнитное экранирование – то получался просто уже гигантский ящик, который уже ни на стол, ни в стеллаж с приборами не влезет.

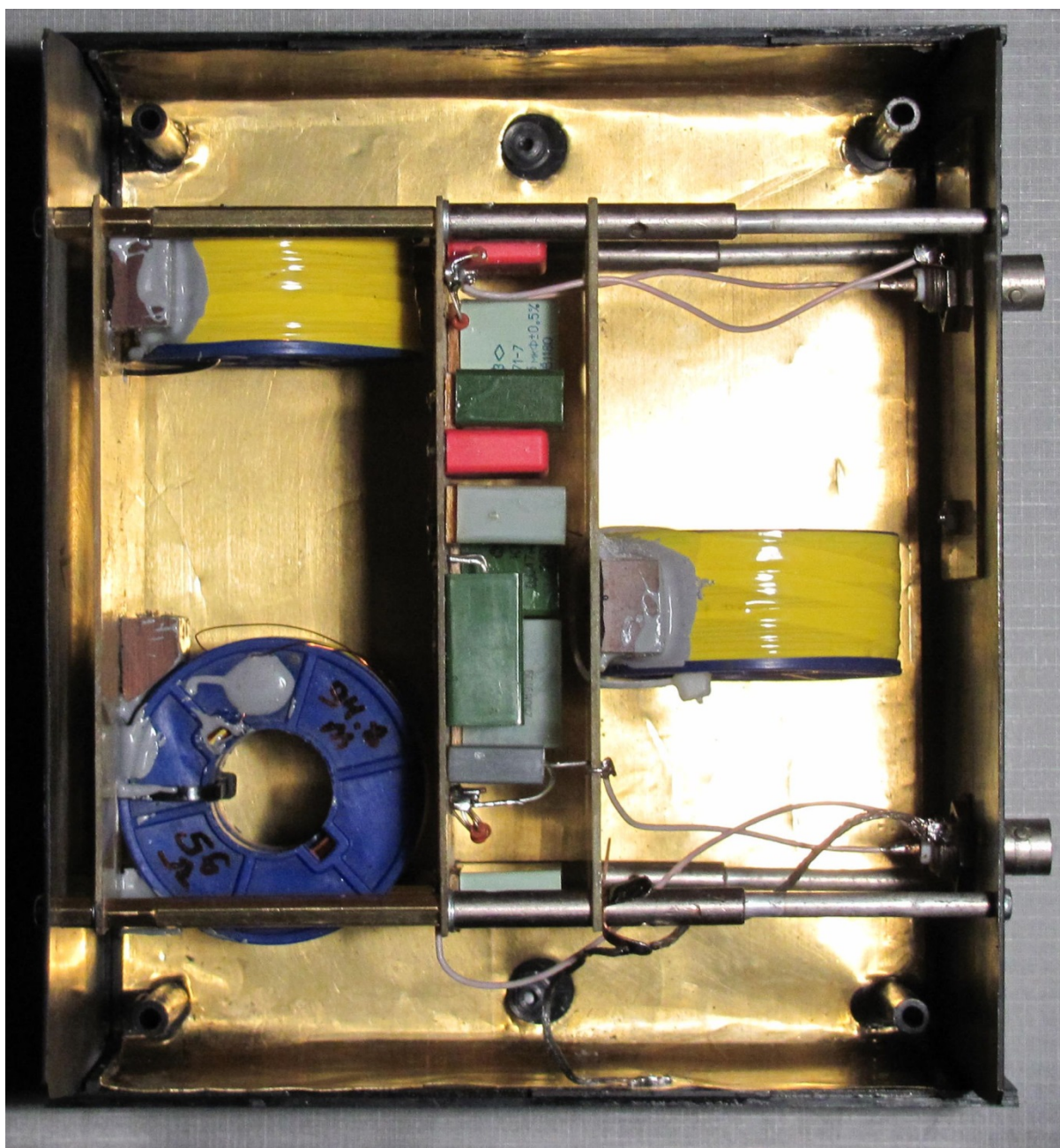


Рисунок 9

Скрепя сердце, от этой идеи я отказался и ограничился немагнитным экраном. Фильтр, установленный в корпус, показан на рисунке 9

Для корпуса была использована пластиковая заготовка размером 180x170x85 мм. Пластиковые передняя и задняя панели заменены на дюралюминиевые, как экран использовалась латунная фольга (лучше медная, но, к сожалению, под столом не нашлась) толщиной 0.5мм, которая приклеивается к крышкам корпуса изнутри и подключается к общему проводу фильтра. Фильтр подключается стандартными байонетными ВЧ разъемами. При необходимости можно установить пару переключателей для коммутации резисторов R1 и R2. Сама конструкция описана достаточно схематично, так как особых требований, кроме как по расстоянию между катушками и удалению их от экрана, просто нет. Вполне можно использовать подручные материалы.

### **Заключение**

В общем, вся конструкция очень проста, при точном подборе компонентов и правильном монтаже не требует наладки, но очень хлопотная в изготовлении. Если вам приходится достаточно часто проводить измерения уровня искажений, то все затраты окупятся сторицей - и в удобстве работы, и в точности полученных результатов.