

Программа "Dishal" по созданию лестничных фильтров

Предисловие для русскоязычного пользователя

Русский человек не привык читать "буквари". Он сразу лезет в программу, а потом начинает изучать сопроводительные документы. Поэтому основные пункты программы Dishal, я опишу здесь.

Все схемы кварцевых фильтров находятся в самом низу этой справки на стр 15. Предыдущий, это рисунок возможных преобразований типа "звезда-треугольник".

Для снятия параметров кристалла по осцилляторному принципу нужно перейти на стр. 6. Там же и схема.

Сайт автора <http://www.bartelsos.de/dk7jb.php/quarzfilter-horst-dj6ev>

73! UN7GCE

Эта программа была написана, чтобы обеспечить простой и удобный способ расчета значений необходимых компонент при создании лестничного фильтра LSB типа. Возможно построение фильтра от 2 до 14 резонаторов.

Есть несколько моментов, которые необходимо знать:

1 Программа рассматривает построение фильтров только по типу Баттерворта-Чебышева с неравномерностью в полосе пропускания до 3 дБ.

Подпрограмма расчета фильтра по Cohn базируется на тех же условиях.

Новая дополнительная подпрограмма "QER" рассчитывает фильтры по Cohn конфигурации с очень низкими значениями неравномерности в полосе пропускания.

2 Предполагается, что все кристаллы имеют идентичные параметры (Fs, Lm, Cm, Cp).

3 Кристаллы рассматриваются как резонаторы без потерь.

Однако программа обеспечивает очень точные результаты на все параметры фильтра и все компоненты, что входят в состав фильтра.

Дополнительный графический дисплей позволяет быстро оценить будущий лестничный фильтр.

Поля ввода

Все необходимые вводные данные расположены в верхней линейке:

Параметры кристалла

Вы можете ввести либо динамическую индуктивность **Lm**, либо динамическую емкость **Cm**.

Следующая переменная - это частота последовательного резонанса **Fs**.

Также необходимо ввести значение емкости кварцедержателя **Cp**.

Вы можете заметить, что нет поля для ввода значения параллельного резонанса **Fp**.

Это связано с тем, что измерение этого параметра дает ненадежные результаты и он рассчитывается из введенных параметров.

Параметры фильтра

- 3db-BandWidth (или полоса пропускания по уровню 3 дБ) (BW):

Максимальное значение неравномерности в полосе пропускания подсказывается всплывающей подсказкой и не может быть превышено.

- неравномерность:

Значения неравномерности могут быть от 0 (тип Баттерворта) и выше до 3 дБ (тип Чебышева).

- Число кристаллов: любое число от 2 до 14 допустимо.

- Частотный масштаб: может принимать значения от >0 and 400kHz на графическом дисплее.

Кнопка **"Расчет"** используется для запуска вычислений.

Любые отклонения выдадут сообщения об ошибке.

Поля результатов

Параметры кварца

Здесь показываются значения динамических индуктивностей **Lm** и емкостей **Cm** без значений последовательной **fs** и параллельной **fp** частоты кристалла. Емкость кристаллодержателя **Cp** здесь не показана, но может быть считана из поля ввода. Вычисленные значения динамической индуктивности и емкости отображаются с не менее чем шесть знаков после запятой. Этот факт не имеет общего с реальной точностью, но помогает оценить результат при моделировании.

Параметры фильтра

Следующие параметры показаны в верхней зоне:

Тип фильтра (Butterworth / Chebychev),

Полоса пропускания,

входной/выходной импеданс, (меняет цвет в **красный** при превышении значения **>3000 Ohm**)

число кристаллов,

и результирующая **Центральная частота**

Также показано значение ширины полосы пропускания по уровням:

-6db, -20db, -40db, -60db, -80db, and -100db

Шунтовые (параллельные) емкости

Это расчетные значения емкостей для обеспечения заданной полосы пропускания. Обозначения ("Ck12", "Ck23" и т.д.) показывают их схемное расположение.

Примечание: Значение соответствующего Ck принимает **красный** цвет, если Ck меньше, чем **10pF**.

Последовательные емкости

Эти емкости последовательно с кристаллами подгоняют частоты в соответствие с сеткой частот фильтра.

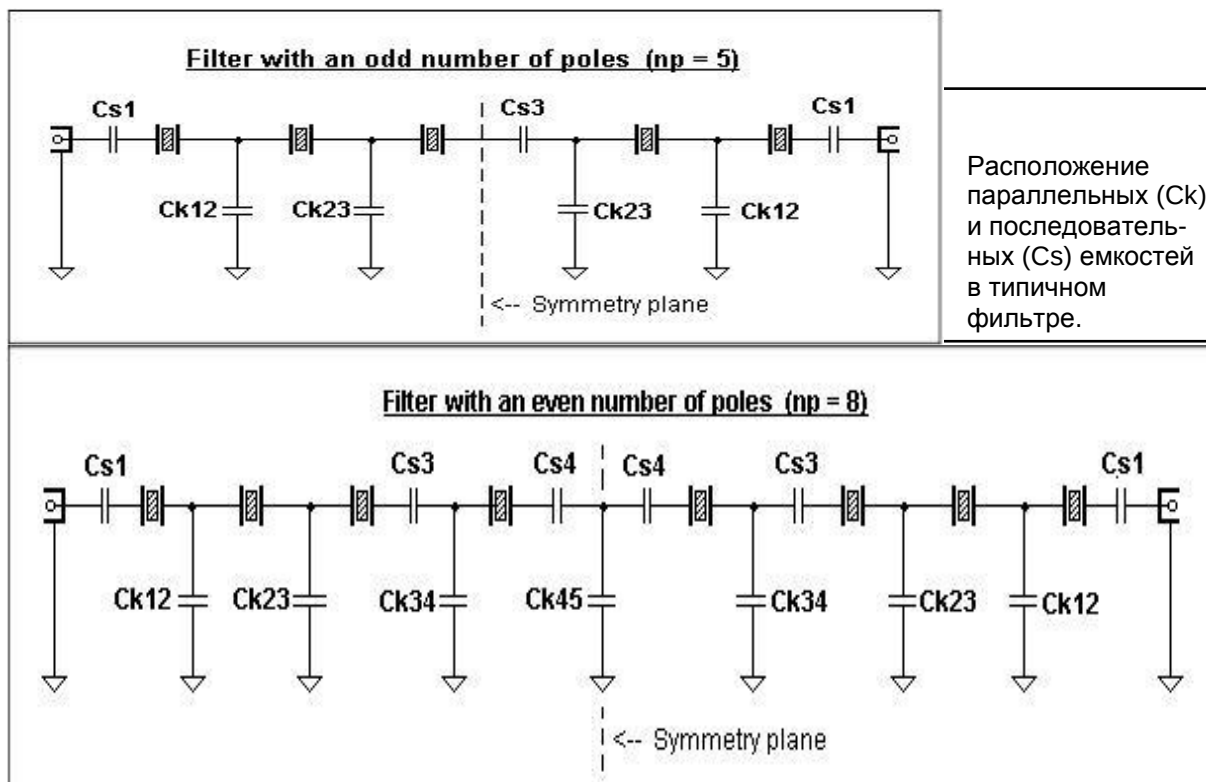
Обозначения ("Cs1", "Cs3", и т.д.) также соответствуют их подключениям.

Более подробная информация в разделе: "Частотная сетка"

На схемах, обратите внимание, указана только левая половина нужных емкостей.

Это связано с тем, что топология фильтра по Баттерворту и Чебышеву всегда симметричная, относительно середины. Поэтому емкость $C_{k1,2}$ всегда соответствует $C_{k-n+1,n}$.

Последующие схемы фильтров с четными и нечетным числом кристаллов показывают это свойство.

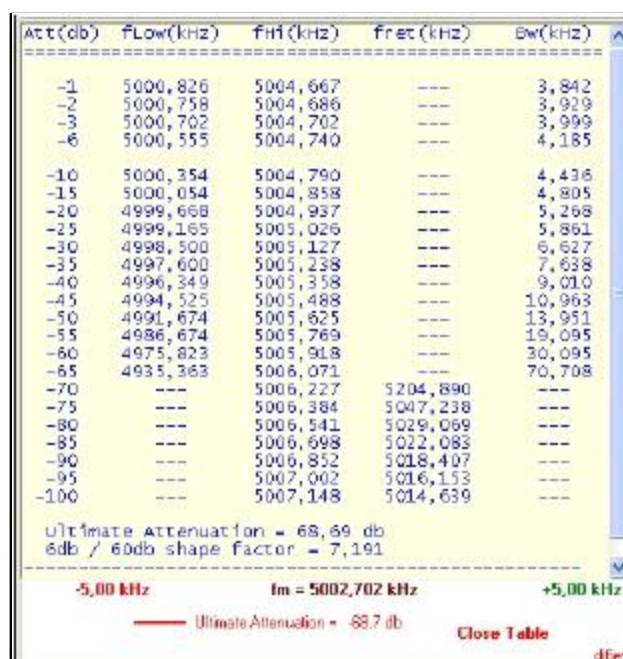
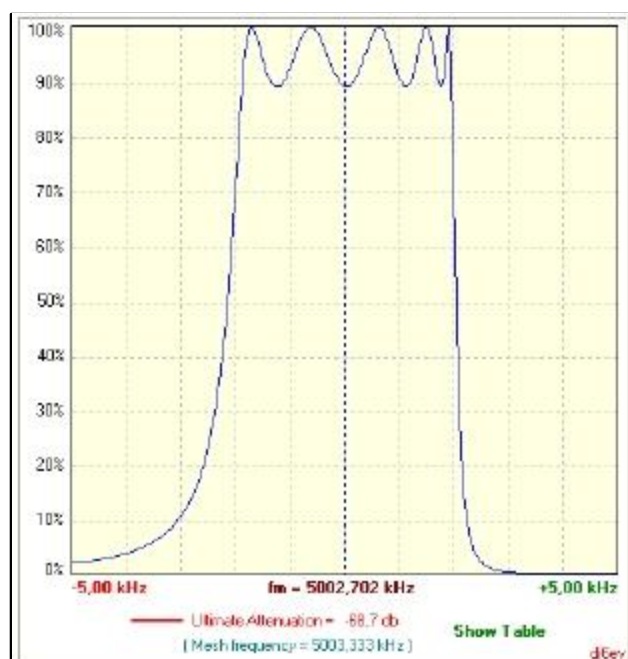
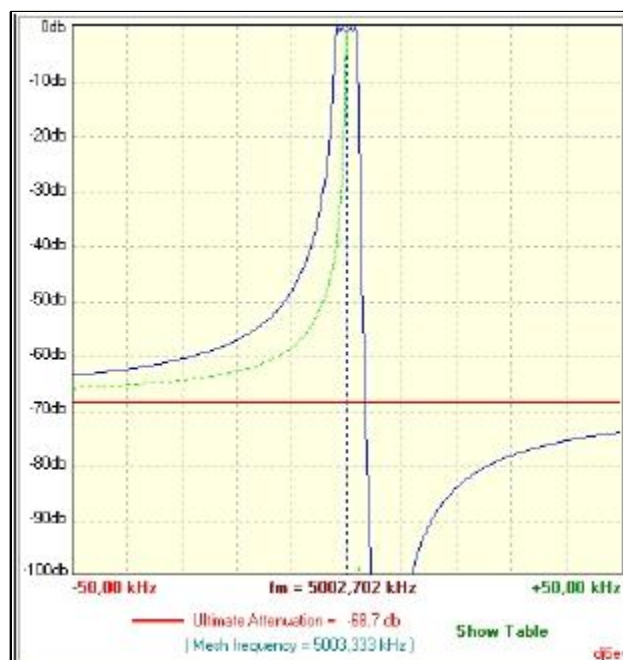


Полная таблица возможных схемных комбинаций при построении фильтра из кристаллов от 2 до 14 находится в конце этого файла.

Графический Дисплей

В окне графического дисплея показывается результирующая кривая рассчитываемого фильтра. Ширина просмотра может достигать 400 кГц. В середине дисплея показывается центральная частота "Fm". Масштаб результирующей кривой может быть просмотрен в логарифмическом, или в линейном масштабе. Для этого нужно ткнуть в кнопку **LOG Lin** ниже кнопки "**Расчет**".

Предельное значение затухания будет показано красной линией, если она находится в пределах 0 -100 dB. Усредненная линия зеленого цвета показывает отклонение симметрии фильтра.



Строка МЕНЮ

SaveWindow Cohn QER(G3UUR) Xtal Table LC-Match Cs2Cp Colours Info Help

Сохранить Окно

Нажатие на этой кнопки временно меняет цвет дисплея и в основной папке сохраняется файл с графическим отображением. Если нужно сделать несколько снимков (файлов), то предыдущие нужно переименовать.

Cohn

Конструкция фильтра, известная как "минимальные потери" **"minimum-loss"** опубликована Seymour Cohn [7], довольно популярная модель, особенно СВ фильтров – несмотря на известные недостатки, такие как неконтролируемая неравномерность в полосе пропускания и "звон" фильтра. Преимущество таких фильтров – простая конструкция из одинаковых резонаторов и емкостей, вкпе с довольно хорошей прямоугольностью фильтра.

Нажатие на эту кнопку вызовет дополнительную подпрограмму, которая позволит рассчитать подобный фильтр.

Эта подпрограмма также учитывает параллельную емкость кристалла по методу Dishal, что обеспечивает хорошие выходные данные для рассчитываемого фильтра.

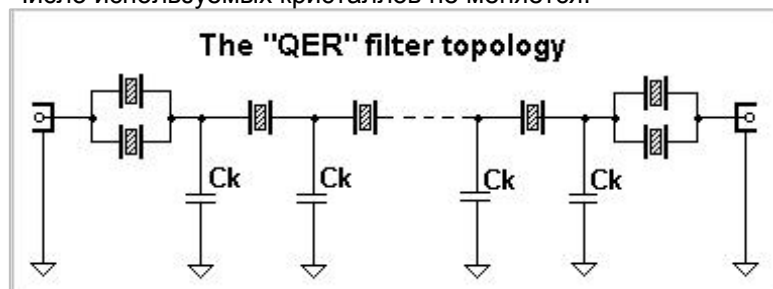
QER(G3UUR)

G3UUR разработал новый вариант расчета фильтра по Cohn с одинаковыми значениями C_k , который сочетает в себе простоту и обеспечивает резкое снижение неравномерности в полосе пропускания фильтра и снижением эффекта 'звона'.

Как пример - неравномерность 8-кристального QER фильтра имеет всего ~0.3dB, против довольно высоких значений неравномерности в 5 - 6 dB эквивалентной по структуре фильтра по Cohn.

Этот "Quasi-Equi-Ripple" (QER) фильтр достигает такого эффекта путем замены концевых емкостей на второй кристалл, из той же серии. Кроме того, значения емкостей и импедансов несколько отличается от классического фильтра по Cohn.

Число используемых кристаллов не меняется.



Дополнительную информацию по данному типу фильтров можно найти в ARRL-Handbook 2010 [9] и QRP Quarterly [10].

Примеры моделирования и сравнения 8 – кр. фильтров структуры по Cohn и QER можно найти в списке литературы в конце этого файла.

Эта программа также учитывает параллельную емкость кристалла по формулам Dishal для корректного расчета данных фильтра.

Xtal (Кварц)

Нажатие на эту кнопку вызывает меню, которое содержит две подпрограммы для легкого расчета параметров кварца и ещё одну подпрограмму – подпрограмму подгонки частоты кварца.

3dB-Method

Позволяет вычислить основные параметры кварца, на основе показаний, полученных во время измерений, с использованием пассивной схемы, точного сигнала генератора и детектора, или анализатора типа NWT. Все эти измерения подразумевают "3-dB" метод.

Более подробное описание, суть этого метода, описаны на web page of K8IQY под индексом "Precision VXO" :

<http://www.k8iqy.com/testequipment/pvxo/pvxopage.htm>

Это лишь один из множества примеров на эту тему.

Примечание:

3dB-метод использует соотношение напряжений " U_{out}/U_{in} [%]" для вычислений динамического сопротивления потерь R_m . Если значение R_m определяется методом замещения, как это описано у K8IQY, тогда можно подобрать основные данные методом подбора, до совпадения цифр R_m .

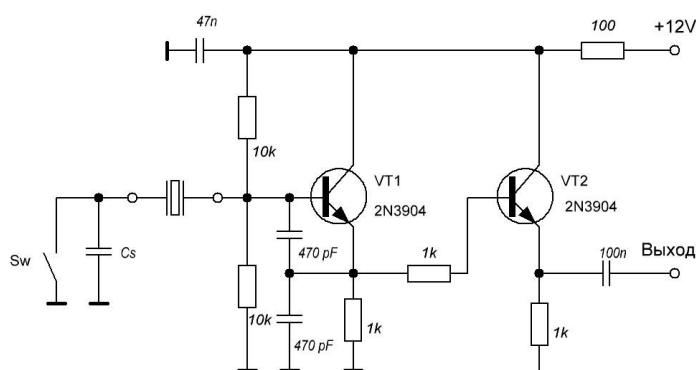
G3UUR-Method

Пожалуй, это самый популярный осцилляторный метод для определения динамических параметров кварца. Его описание можно найти во многих публикациях и интернете.

Обновленная программа больше не использует упрощенные формулы, которые давали довольно большой разброс параметров. Теперь она базируется на точных уравнениях, которые учитывают делитель напряжения на емкостях (обычно 470 пФ). В итоге точность вычислений значительно повысилась.

Однако, можно вернуться к упрощенным вычислениям, установив значения емкостного делителя в 'нуль'.

Хотя с помощью этого метода, метода генерации, невозможно определить значение динамических потерь R_m . Но, измеряя амплитуду на выходе генератора, можно судить об активности кристалла и выбрать необходимые экземпляры.



Расчет параметров кварца по методу G3UUR

Эта программа использует осцилляторный метод G3UUR для получения динамических параметров индуктивности L_m и емкости C_m . Значениями делителей C1 и C2 не следует пренебрегать, так как они влияют на эффективную частоту и на другие параметры кристалла. Если нет необходимости, этот переключатель может быть замкнут и схема генератора может использоваться по другому назначению.

Парал. емкость: pF

Частоты генерации кварца

Osc. circuit: kHz SW закрыт

kHz SW открыт

Расчет

Индук. L_m [mH]: Емк. C_m [fF]: F посл. резон. F_s [kHz]:

Xtal Tuning (Подгонка Xtal)

Эта программа позволяет изменить частоту кварцевого резонатора, если частоты кварцев не попадают в нужные частоты (большой разброс). Или у вас всего 8 кристаллов, а фильтр сделать очень хочется. Основной пример использования приведен в приложении.

Таблица

Вычисленные результаты могут быть представлены не только в виде графика, но и в табличной форме. Когда нажата эта кнопка появляется выбор из : "Относительные / Абсолютные Частоты", "Показать/Закрыть Таблицу " и "Сохранить Таблицу как текст". А также можно переключаться из графического в табличный режимы.

Возможно, здесь более удобно переключаться из графики в таблицу. А также нажимая "Отн / Абс частоты" можно менять табличные данные на абсолютные и относительные значения.

Значения таблицы можно сохранить как текст, тогда к данным таблицы добавляются значения всех емкостей, а также кварца и входного сопротивления фильтра.

LC-согласование

В этом место можно согласовать импеданс полученного фильтра со схемой, где последний будет работать. Пожалуй, LC согласование лучший вариант, чем согласование трансформатором. Подпрограмма показывает согласование как ФНЧ, так и ФВЧ вариантами. Показываются их схемное решение. А также преимущества той или иной схемы. Если импедансы имеют значение не более 1:1.02 , то появляется сообщение " В согласовании нет необходимости ".

Примечание: когда вызывается эта программа, она автоматически берет данные из полученных вычислений. Однако, её можно использовать и как самостоятельную программу.

Cs2Cp

Эта подпрограмма может быть использована для преобразования последовательной емкости в параллельную и наоборот. Также учитываются и изменения импеданса при таких преобразованиях. При запуске программа берет данные из прошедших вычислений.

Цвета

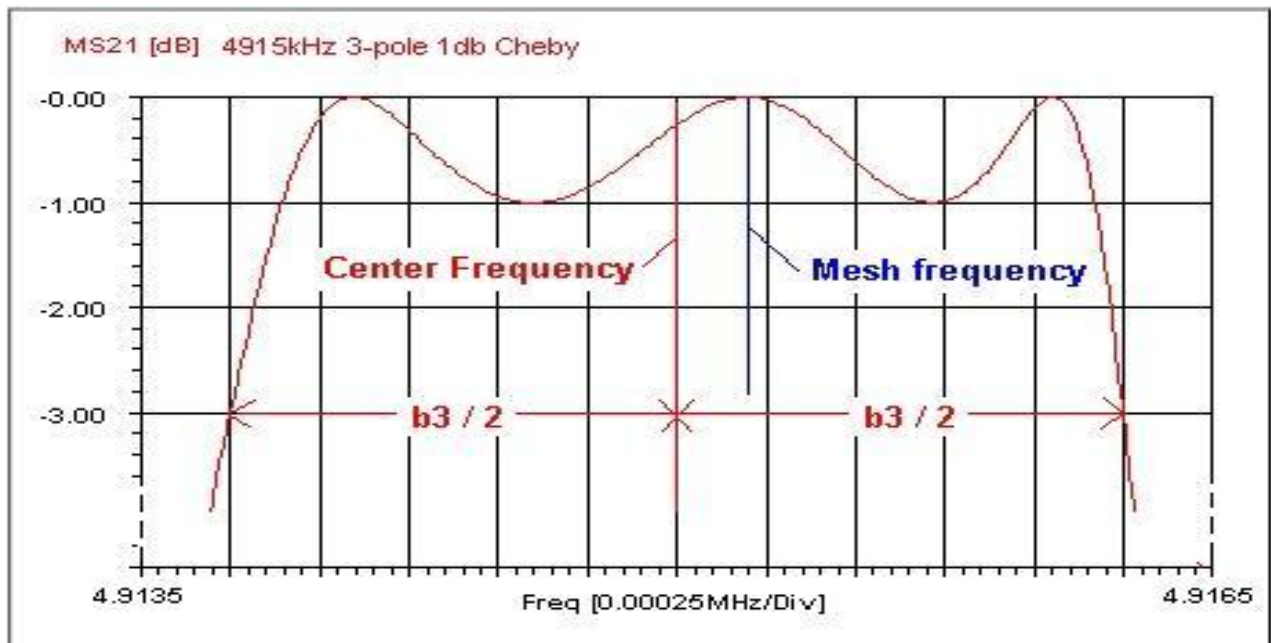
Это дополнительное меню позволяет менять цвета дисплея и его компонентов.

Приложение

Фильтр "Mesh" и центральная частота

В обычных LC полосовых лестничных фильтрах, центральная частота фильтра и срединный горб совпадают. Это не тот случай, когда используются кристаллы. (Спасибо Jack Hardcastle, G3JIR, кто указал на это несоответствие)

Причины этого, опять же в паразитных емкостях кристаллодержателя C_p , которые вызывают не только асимметрию на частотах задержания, но и на частотах пропускания. Таким образом, поскольку центральная частота определяется как среднее между 3 дБ, срединный горб всегда немного выше, а провал всегда немного ниже по частоте от центральной. Картинка ниже показывает этот эффект. Горб в трех кристалльном фильтре Чебышева на 195 Гц выше центральной частоты.



Частота горба всегда показывается под указателем мыши, когда указатель движется по графику в районе центральной частоты.

Примечание: Если картинка взята из сохраненного окна, то частота горба заменяется на частоту оси симметрии.

Программа предусматривает изменения значения C 's для обеспечения совпадения всех частот. Если же нужны какие то определенные настройки отдельных кристаллов, то следующая информация будет полезной:

- 1) Частота горба фильтра определяется всегда по второму (слева и второй справа, т.к. они идентичные). Все остальные всплески частот будут определяться по ним, с дальнейшим расчетом емкостей.
- 2) Применение подгонки частот фильтра в "Xtal" меню с индивидуальной подстройкой ячеек кварцев, описано ниже.

Подгонка частоты кристалла с помощью программы "Xtal Tuning"

Рекомендуется всегда выбирать кристаллы с одинаковой частотой последовательного резонанса и динамической индуктивностью. Это дает отличные результаты и полное совпадение с теорией по расчетам программы Dishal. Отклонение частоты не должно превышать $\pm 2\%$ от необходимой полосы пропускания. Разброс в $\pm 5\%$ может быть приемлемым только в случае, если неравномерность в полосе пропускания допустима.

Однако, возможны случаи, когда кристаллы отличаются больше допустимого. В этом случае может помочь индивидуальная подгонка последовательной емкостью. Для этих целей допустимый сдвиг частоты показывается программой как Cs_x.

Подстройка частот кварца очень проста, так как необходимая информация уже показывается программой Dishal. Результирующая полоса может слегка отличаться от идеальной кривой. Но эти отклонения во много раз меньше, чем отклонения вызванные несовпадением частот кристаллов. Объяснение почему это происходит, выходит за рамки данного повествования.

Объяснение метода подгонки на типичном примере.

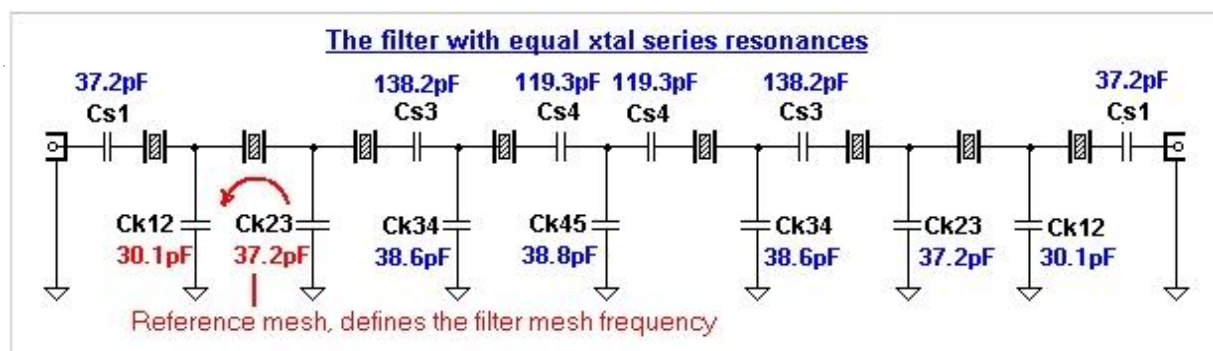
Предположим, что у нас 8 кристаллов со следующими частотами F_s резонанса (kHz):

#1: 4999.670, #2: 4999.895, #3: 5000.010, #4: 5000.120, #5: 5000.235, #6: 5000.320,
#7: 5000.485, #8: 5000.680. (это необычно большое отклонение 1010Hz)

И будем конструировать 8 кристалльный фильтр с полосой 2,5 кГц по уровням 3 дБ и неравномерностью 0,5 дБ.

Первый шаг – это выбор кристалла, частота которого лежит где то посередине. Итак, берем #4 (5000.120kHz) для эталонной ячейки #2 (здесь это нужно понимать, как место кварца в фильтре, считая от середины). Он же будет определять номинальную последовательную частоту F_s для программы Dishal.

Первоначально мы рассчитываем фильтр из предположения, что все кристаллы имеют выбранный резонанс в 5000.120 kHz. Будут использоваться значения динамической индуктивности $L_m = 70\text{mH}$ и параллельной емкости $C_p = 3.7\text{pF}$. Программа Dishal выдает следующие результаты:



Ячейки кварцев #2 и #7 будут без последовательных емкостей. Они определяют пики частот, которые будут наивысшими, из-за наименьших последовательных емкостей, включенных до них. Следовательно, их сдвиг частоты будет равен нулю и не корректируется. Все остальные кристаллы должны быть настроены на эти частоты последовательными емкостями Cs1...Cs4.

Программа дает нам значения конденсаторов, которые определяют свойства фильтра, а также важные для расчета фильтра и его настройки. Значения для ячеек от Cs1 до Cs4 в картинке выше нам неинтересны, так как мы должны их изменить в любом случае из-за разных частот кварцев. Однако, в списке ниже, показаны соответствующие значения частот. Они необходимы для процесса настройки.

Tuning (Series) Capacitances (pF)		
		equiv. Freq. Offset (Hz)
Cs1=	37,2	709
Cs3=	138,2	179
Cs4=	119,4	208

Используются значения в ячейке "equiv. Freq. Offset" в процедуре настройки программы "Xtal Tuning". Значения параллельных вычисленных емкостей изменены не будут.

Теперь мы можем активировать "Xtal Tuning" из выпадающего меню. Для удобства пользователя все данные будут автоматически импортированы. Останутся только поля необходимые для процесса подстройки "Current Xtal Series Freq." и "Nominal Offset".

Поскольку кварц #4 используется на месте ячейки #2, мы выбираем кристалл #3 (5000.010kHz) для ячейки на другой стороне фильтра (mesh n-1 = #7). Мы ставим значение частоты в действительная последовательная частота ('Current Xtal Series Freq.') и номинальная последовательная частота 'Nominal Offset' в подпрограмме подгонки Xtal "Xtal-Tuning" и получаем следующий результат:

Ck12 30,1 pF Ck23 37,2 pF <-- Reference Mesh (#2), defining Fmesh

Select either Lm or Cm of xtal

☒ Lm 70 mH

☐ Cm Cm = 14,47376 iF

5000,120 kHz Nominal Xtal Series Freq.

3,7 pF Xtal Holder Capacitance Cp

5000,010 kHz Current Xtal Series Freq.

Current - Nominal [Hz] -110

Actual Xtal offset [Hz] 110

Nominal Offset in (Hz) 0

Tuning Capacitance (pF) 217

Calculate

← Значение для ячейки #2, взятое из программы Dishal

← Эта частота используется как основная частота последовательного резонанса "Fs" в программе Dishal для расчета параллельных и первичных последовательных емкостей.

← Рассчитанные смещения частоты и показанные в списке последовательных емкостей Csx. В других случаях здесь: Zero

Кварц #7 требует последовательной емкости в 217pF.

Далее, глядя на значения (#1 and #8) понимаем, что тут обязательная, наибольшая правка. Это очевидно, так как мы тут поставили кристаллы с наибольшим отклонением частоты от номинальной в 5000.120kHz. Это кристаллы #7 и #8 (5000.485 и 5000.680kHz). Необходимый сдвиг в конце таблицы составляет 709 Hz. Вводим эту цифру и получаем :

Select either Lm or Cm of xtal

☒ Lm 70 mH

☐ Cm Cm = 14,47376 iF

5000,120 kHz Nominal Xtal Series Freq.

3,7 pF Xtal Holder Capacitance Cp

5000,680 kHz Current Xtal Series Freq.

Current - Nominal [Hz] 560

Actual Xtal offset [Hz] 149

Nominal Offset in (Hz) 709

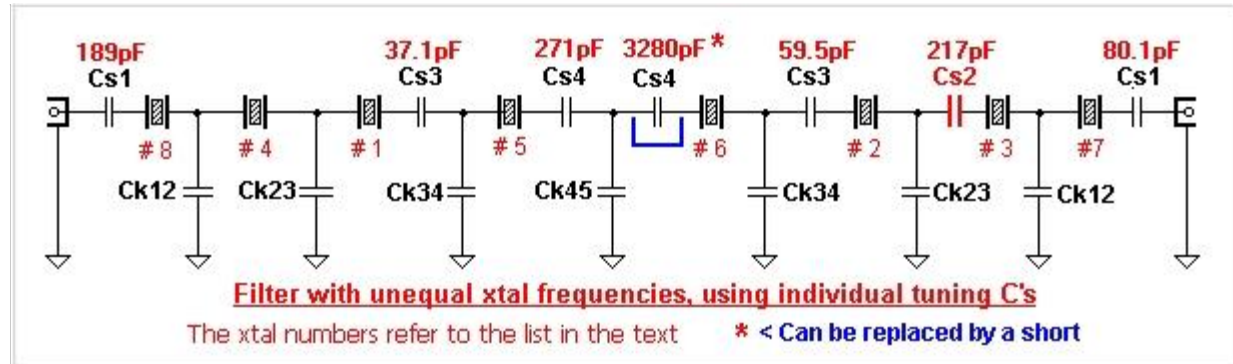
Tuning Capacitance (pF) 189

Calculate

Потому, что кристалл уже имеет сдвиг на 560 Hz и дополнительный сдвиг нужен всего на 149 Hz. Рассчитанная последовательная емкость 189 pF.

Для кристалла 5000.485kHz на другом конце фильтра требуется всего 80.1 pF для номинального сдвига.

Теперь мы можем вычислить остальные необходимые емкости для фильтра *:



Это лишь один образец применения кристаллов с разной частотой последовательного резонанса. Неудобство состоит в том, что возможен сдвиг только на повышение частоты и не исключена ситуация, когда действительный сдвиг уже больше, чем требуется. В этом случае можно переставить местами кристаллы и повторить расчет.

Это не отнимет много времени.

Частота кристалла не может быть смещена очень сильно. При таком смещении падает добротность. Поэтому программа дает предупреждение, когда емкость сдвига опускается ниже 10pF.

Конечно, есть и другие методы и расчеты смещения частот отдельных кристаллов в фильтре. Wes Hayward, W7ZOI описал такой способ в программе "FineTune", который идет с книгой "EMRFD" [5] как часть "LADPAC2002", его эквивалент "MeshTune" (DOS), который шел с книгой "RF Design" [6].

Так как математика описанных программ сильно отличается от используемой здесь, рекомендуется ознакомиться с ними более тщательно.

Если кто то очень стремится построить идеальный фильтр, то должен ознакомиться со статьей J. Makhinson, N6NWP [8], в которой описаны подробно основы построения фильтров. Однако, следует заметить, что и N6NWP также использует более или менее кристаллы с одинаковыми параметрами. Его тонкая настройка компенсирует все возможные отклонения для получения отличного результата, как это показано в статье.

- Фильтр может быть построен и без применения каких либо последовательных емкостей, но для этого нужен подбор кристаллов с необходимым с частотным сдвигом при одинаковых значениях L_m C_m . Необходимые частоты можно рассчитать в программе Dishal. Допустимый разброс L_m / C_m (max. $\pm 2\%$). В этом примере показаны необходимые частоты:

2x 5000.120kHz for the meshes 2 and 7(n-1) (as the reference frequency f_s)

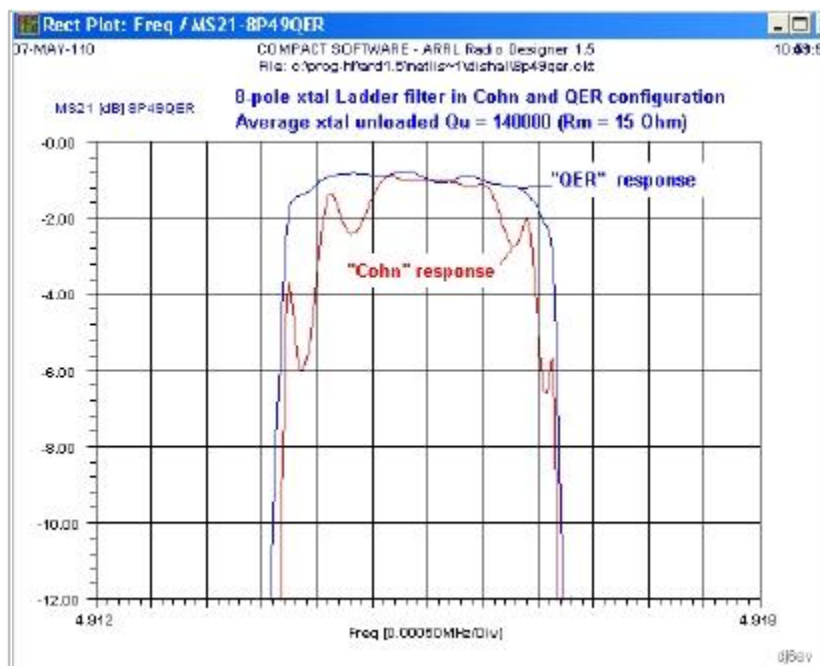
2x 5000.829kHz for the meshes 1 and 8 (+ 709 Hz)

2x 5000.299kHz for the meshes 3 and 6 (+ 179 Hz)

2x 5000.328kHz for the meshes 4 and 5 (+ 208 Hz)

Даже здесь мы получаем отклонения от идеального полосового фильтра, но они крайне малы.

Quasi-Equiripple (QER) – Filter vs. Cohn-Filter



На рисунке показаны типичная кривая полосы пропускания классического 8-кр. фильтра 2,5 кГц по Cohn и в сравнении QER фильтром, с использованием другой топологии.

Выраженные узкополосные провалы достигают более, чем 5dB и делают этот 8-кристалльный фильтр по Cohn непригодным для использования в SSB. Напротив QER фильтр имеет неравномерность менее 0.5dB и даже меньшие потери.

Некоторые практические советы

Программа "Dishal" предполагает минимальные потери при расчете фильтров.

Конечно, реальные фильтры вносят потери и сглаживание скатов фильтра из-за потерь в кристаллах (динамические потери R_m) и, в меньшей степени, потери по паразитным емкостям. Это приводит к чуть меньшей, чем рассчитано, полосе пропускания по 3dB. Однако этот эффект очень мал по сравнению с потерями при отклонении от номинала. К примеру: разработанный 8-кристалльный фильтр на 2,4 кГц по 3 дБ имел реальную полосу 2.36 kHz. По уровню 6dB разница была уже меньше (<20Hz). Если вам нужен гарантированный фильтр, то используйте нужные 5-6 дБ полосы при расчетах фильтра по 3 дБ.

Также учитываете влияние паразитной емкости проводов, соединений, которые могут достигать 1.5 to 2pF, и должны быть вычтены из параллельных емкостей, что получены при расчетах.

И всегда очень полезно промоделировать влияние таких ситуаций при проектировании фильтра, проверке его затухания, проверить отклонения емкостей от идеального случая.

Horst Steder, DJ6EV November 2007 (revised January 2009)
Revised May 2010

Благодарности

Особую благодарность выражаю Jack Hardcastle, G3JIR, за многочисленные плодотворные дискуссии и обмен идеями в течение последних нескольких лет, связанных с этой интересной темой. Он также заставил меня преодолеть свою лень и переделать мои старые DOS программы в Windows версии и добавить некоторые полезные инструменты. Его работы заложили основы для алгоритмов, которые привели к текущей версии программы. Я также хотел бы поблагодарить Dave Gordon-Smith, G3UUR, за множество ценных советов относительно улучшения осцилляторного метода, моей реализации Dishal и вычислению его модели QER фильтра.

Литература (помимо многих других источников)

- [1] "Calcul et realisation des filtres à quartz en echelle"
Patrick Magnin F6HYE, Bernard Borcard F3BB
Radio – REF, April 1990
- [2] "Computer aided ladder crystal filter design"
Jack A. Hardcastle G3JIR
Radio Communication, May 1983
- [3] "Two new equations for the design of filters"
M. Dishal
Electrical Communications , Vol.3, December 1955
- [4] "Modern network theory design of single-sideband crystal ladder filters"
M. Dishal
Proceedings of the IEEE, Vol.53 , September 1965
- [5] "Experimental Methods in RF Design" ("EMRFD")
W. Hayward, W7ZOI R. Campbell, KK7B B. Larkin, W7PUA
ARRL publication No.288, 2003
- [6] "Introduction to Radio Frequency Design"
Wes Hayward, W7ZOI
ARRL publication No.191, 1994-96
- [7] "Dissipation Loss in Multiple-Coupled-Resonator Filters"
Seymour B. Cohn
Proceedings of the IRE, August 1959
- [8] "Designing and Building High-Performance Crystal Ladder Filters"
Jacob Makhinson, N6NWP
QEX No.155, January 1995
- [9] "Crystal Filter Design"
ARRL HANDBOOK 2010, Chapter 11.6.2
- [10] "Further Thoughts on Crystal Ladder Filter Design"
Dave Gordon-Smith, G3UUR
The QRP Quarterly, Spring 2010

Возможные допустимые преобразования в схеме фильтра.
Необходимые формулы для расчета находятся в файле
“Звезда-Треугольник-Децибел”

