

Расчет двойного П-контура

1 Описание программы

Повышение фильтрующих свойств колебательных систем становится актуальным в связи с ростом требований к уровню побочных излучений передающих устройств. По степени фильтрации гармоник двойной П-контур обеспечивает лучшие показатели по сравнению с однозвенным П-контуром, а также ПЛ-контуром. Программа выполняет расчет двойного П-контура, его схема изображена на рисунке 1.

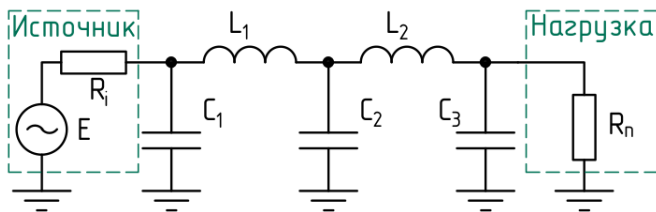


Рис. 1: Схема 2-го П-контура

Программа рассчитывает значения элементов контура на заданной частоте, значения токов и реактивных мощностей в его элементах, ширину полосы пропускания (АЧХ) по уровню -1 дБ, ширину полосы частот параметра S_{11} по уровню 0.1 (эквивалентно $K_{CB} \approx 1.22$), выходную мощность при заданной входной мощности, потери в контуре и его КПД, эффективные значения напряжений на входе и выходе, уровень фильтрации 2-й гармоники выраженный в дБ, параметры S_{11} и S_{22} . Большинство величин рассчитываются в комплексных числах. Для параметров S_{11} и S_{22} выводятся модули их значений, расчет ширины полосы частот по параметру S_{11} также выполняется по значению его модуля.

При определении подавления 2-й гармоники расчет выполняется для частот f и $2f$ в 2-х режимах: равенства сопротивлений источника и входного сопротивления контура на рабочей частоте (в параметрах обозначено как KF-U 2-й гармоники) и в режиме генератора тока, что свойственно для работы с пентодами и тетрами, имеющими высокое выходное сопротивление (в параметрах обозначено как KF-I 2-й гармоники).

Расчет полосы пропускания и графика АЧХ выполняется в режиме согласованного генератора, когда выходное сопротивление генератора равно входному

сопротивлению контура на расчетной частоте. Расчет выполняется с шагом 1...5 кГц, в зависимости от расчетной частоты. Далее, по рассчитанной АЧХ, выполняется сканирование по уровню -1 дБ с целью определения границ полосы пропускания. В случае образования «двухгорбой» характеристики, если ее «середина» опускается ниже уровня -1 дБ, учитывается только один участок, расположенный у основной гармоники. При расчете полосы частот по параметру S_{11} , в случае образования 2-х «впадин» характеристики, если участок расположенный между ними превышает уровень 0.1, также учитывается только один участок, расположенный у основной гармоники.

При наличии на компьютере программы GnuPlot программой будет построен график АЧХ, а также графики параметров S_{11} и S_{22} . Установка программы GnuPlot не обязательна для работы программы, однако желательна, так как иначе трудно полноценно проконтролировать полученный результат. При этом важно, что вид графиков и ширина полос указанных параметров могут иметь между собой большую разницу. Альтернативный вариант получения АЧХ — использование программы, способной строить такие графики по заданным значениям схемы, например RFSim99.

Поскольку ширина полосы АЧХ, а также сам график, рассчитываются для режима согласованного генератора необходимо учитывать, что при использовании в качестве источника сигнала генератора тока, применения тетрода, пентода или транзистора (за исключением схемы с общим коллектором), полоса частот АЧХ может стать существенно более узкой, а АЧХ изменить форму. По этой причине, если пользователю важны указанные параметры именно для режима генератора тока, для рассчитанных программой значений элементов контура желательно выполнить построение АЧХ отдельно, например в упомянутой выше программе. Значение сопротивления источника сигнала при этом рекомендуется принять на порядок больше расчетного входного сопротивления контура.

В программе реализован расчет контура двумя методами. Первый метод представляет собой расчет контура как ФСС с «внутренней» связью. Второй метод представляет собой расчет по формулам К.Шульгина [1] двух «спаренных» П-контуров. Программа позволяет выбрать любой из методов.

2 Расчет первым методом

Формулы для расчета контура давно известны, к сожалению автору не удалось найти первое издание их публикации. Формулы приведены ниже.

$$R_{sr} = \sqrt{R_i R_n} \quad X_{c1} = \frac{Q_n R_i + R_{sr}}{Q_n^2 - 1}$$

$$X_{c3} = \frac{Q_n R_n + R_{sr}}{Q_n^2 - 1} \quad X_{c2} = \frac{X_{c1} X_{c3}}{R_{sr}}$$

$$X_{l1} = X_{c1} + X_{c2} \quad X_{l2} = X_{c2} + X_{c3}$$

Здесь R_i - входное сопротивление, R_n - сопротивление нагрузки, R_{sr} - среднегеометрическое сопротивление от входного и выходного сопротивлений. При расчете необходимо задаться значением нагруженной добротности Q_n .

Расчет данным методом дает отличные результаты по форме графиков АЧХ, S_{11} и S_{22} , а также степени фильтрации гармоник. Для примера на рисунках 2-4 приведены графики для контура со следующими параметрами: $R_i = 1500 \text{ Ом}$, $R_n = 50 \text{ Ом}$, $f = 14.2 \text{ МГц}$, $Q_0 = 250$, $Q_n = 10$, $P = 1000 \text{ Вт}$. КПД, согласно расчету, получился равным 92,23 %.

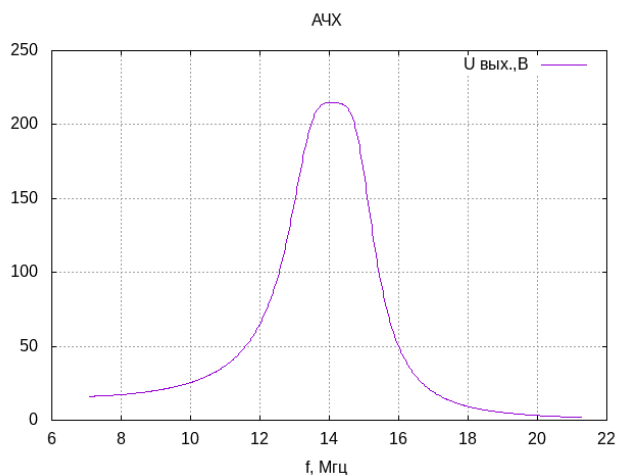


Рис. 2: АЧХ при $Q_n=10$

К сожалению данный метод расчета обладает существенным недостатком, он применим при достаточно высоких значениях нагруженной добротности. Например, уже при значениях $Q_n = 5...6$ параметры S_{11} и S_{22} получаются неважными, а при еще более низких Q_n откровенно плохими. По этой причине для данного метода расчета в программе введено ограничение на ввод значения нагруженной добротности, задать значение Q_n можно не менее 5-ти.

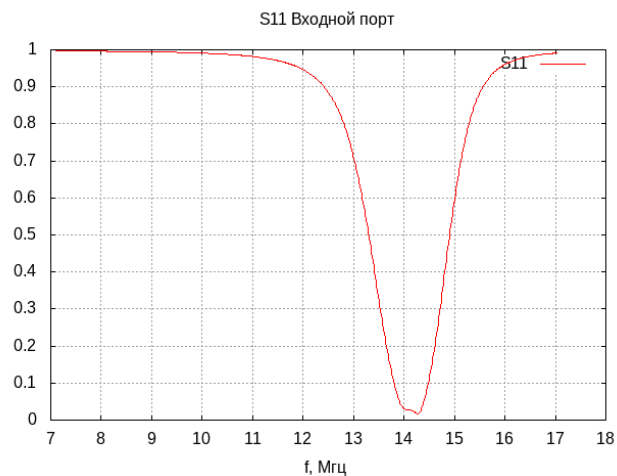


Рис. 3: S_{11} при $Q_n=10$

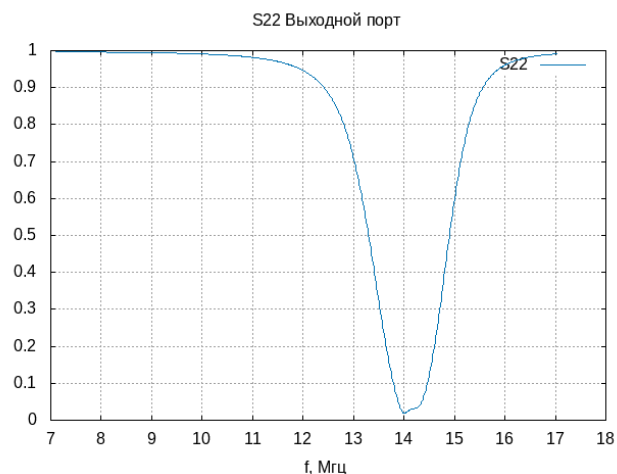


Рис. 4: S_{22} при $Q_n=10$

Напротив, хорошими свойствами этого метода расчета, как уже было сказано, является ровная, почти колоколообразная форма графиков, достаточно широкая полоса частот и очень хорошая степень фильтрации гармоник. Для вышеприведенного примера степень фильтрации 2-й гармоники (KF-U) составила 58,7 дБ!

Как следствие этот метод можно рекомендовать при необходимости получения очень хорошей фильтрации гармоник и достаточной полосы рабочих частот, но очень хороший КПД получить вряд ли получится по причине необходимости использования довольно высоких значений Q_n .

3 Расчет вторым методом

Расчет элементов контура производится в 2 этапа, с расчетом первой и второй половин контура, при этом добротность половин может быть задана индивидуально. При мысленном представлении после-

довательного соединения 2-х одиночных П-контуров в середине будут расположены 2 емкости, выходная для первого контура и входная для второго, поэтому емкость С2 двойного П-контура образуется суммой указанных емкостей. Значение сопротивления средней ступени трансформации может быть выбрано из 3-х вариантов:

1. как среднегеометрическое (рекомендуется), оно рассчитывается по формуле

$$R_{sr} = \sqrt{R_i \cdot R_n}$$

где R_i и R_n входное и выходное сопротивления двойного П-контура;

2. равным выходному сопротивлению контура;
3. может быть выбрано произвольно в пределах от 0,5 до 2-х наименьшего/наибольшего входного/выходного сопротивлений.

Предпочтение лучше отдавать первому варианту. В этом случае отношение входного и выходного сопротивлений для разных половин контура равны между собой, в результате, в случае необходимости обеспечения большого коэффициента трансформации по сопротивлению, не возникает завышенных требований по критической добротности контуров (программа выполняет проверку по критической добротности с небольшим коэффициентом запаса и в случае малой Q_n выдает соответствующее сообщение). В целом требования к критической добротности в такой схеме становятся существенно ниже по сравнению с требованиями к критической добротности однозвенного контура.

Выбор сопротивления средней ступени трансформации равным выходному сопротивлению может потребоваться в случае необходимости получения существенно большей «горячей» емкости для лампового УМ на ВЧ диапазоне, об этом будет сказано ниже.

Выбор произвольного значения сопротивления промежуточной ступени трансформации может потребоваться только в особых случаях.

Все остальные вычисления (АЧХ, подавление 2-й гармоники, ширина полосы пропускания, напряжения, реактивные токи и мощности, значения S_{11} и S_{22}) выполняются непосредственно по схеме двойного контура, без его деления на части.

На рисунках 5-7 приведены графики рассчитанные по методике Шульгина, для параметров аналогичных приведенным выше, но при добротности контуров $Q_n = 5$. Рассмотрение графиков позволяет увидеть существенные отличия 2-х методов. Расчет по формулам Шульгина дает отличные результаты при низких значениях задаваемой добротности. Например

этим методом легко рассчитать низкодобротный двухзвенный контур с одинаковым входным и выходным сопротивлениями, представляющий собой фактически ФНЧ с практически равномерной АЧХ и приемлемыми параметрами S_{11} и S_{22} во всей полосе прозрачности, при этом на расчетной частоте параметры S_{11} и S_{22} получаются практически нулевыми. Применение относительно высоких значений добротности (6...7 и более) также дает хороший результат по параметрам S_{11} и S_{22} на расчетной частоте, но при отклонении от расчетной частоты значения параметров весьма быстро покидают минимум и графики принимают довольно «остроконечную» форму, хотя АЧХ может оставаться достаточно широкой. Этот эффект особенно заметен при применении разной нагруженной добротности 2-х половин контура.

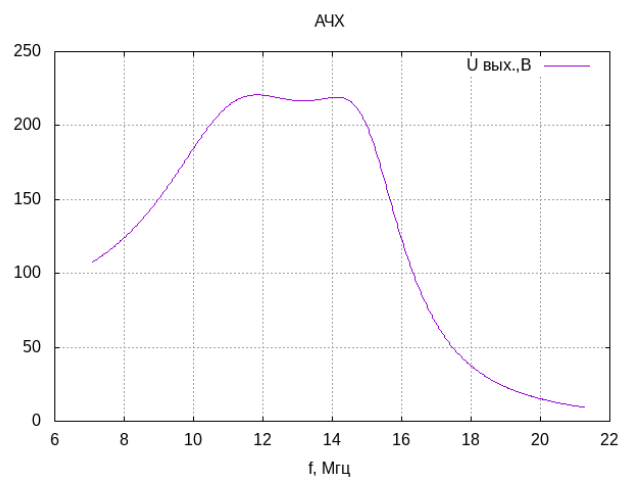


Рис. 5: АЧХ при $Q_n=5$

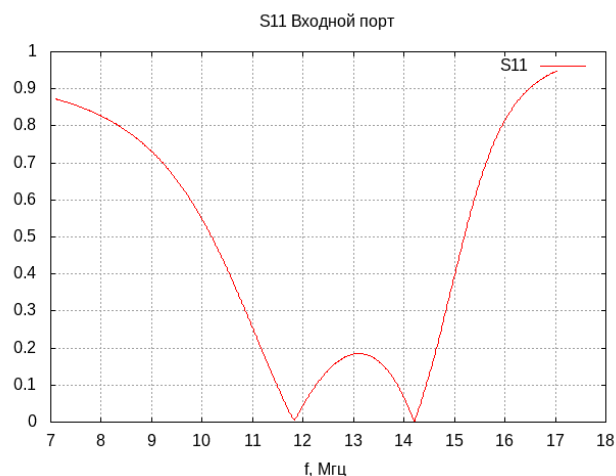


Рис. 6: S_{11} при $Q_n=5$

Применение разной нагруженной добротности 2-х половин контура может потребоваться для «регулирования» величины емкости «горячего» конденсатора, для ее увеличения на ВЧ диапазоне добротность

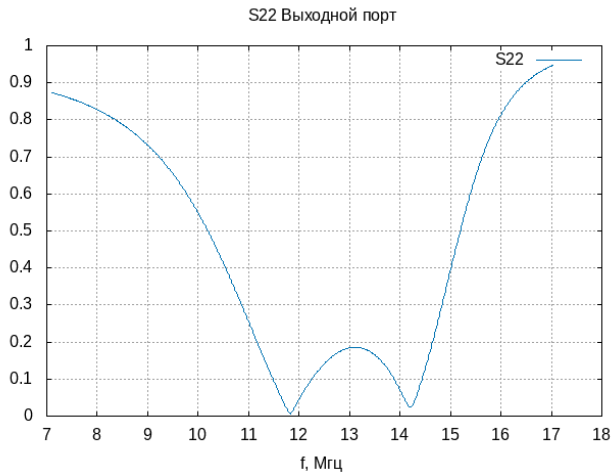


Рис. 7: S22 при $Q_n=5$

первого контура делают выше, добротность второго контура ниже. Повышение добротности первого контура и понижение на такую же величину добротности второго контура (т.е. $Q_{n1} + Q_{n2} = \text{const}$) практически не изменяет КПД контура, хотя форма графиков существенно изменяется. Для этой же цели, повышения «горячей» емкости, служит режим расчета с принятием сопротивления промежуточной ступени трансформации равным выходному сопротивлению двойного П-контура. Такой режим фактически равнозначен применению однозвенного П-контура с дополнительным фильтрующим звеном. Добротность первого контура при этом принимают достаточно высокой, Q_n второго контура напротив, низкой. В таком режиме можно получить неплохие параметры как по АЧХ, так и по параметрам S_{11} и S_{22} .

4 Общие оценки

Общие оценки применения двойного П-контура логично провести в его сравнении с обычным одиночным П-контуром. Для упрощения примем для сравнения двойной и одиночный П-контур, рассчитываемые по формулам Шульгина.

КПД двойного П-контура равен произведению КПД 2-х одиночных П-контуров. Через это соотношение можно выразить отношение нагруженных добротностей одинарного и двойного П-контуров, при одинаковом КПД, просто приравняв КПД друг к другу:

$$1 - \frac{Q_1}{Q_0} = \left(1 - \frac{Q_2}{Q_0}\right)^2$$

где Q_0 — холостая добротность, Q_1 — нагруженная добротность одиночного П-контура, Q_2 — нагруженная добротность одиночного П-контура в двухзвенной

схеме. Здесь полагается, что Q_2 первой и второй половинок контура численно равны. Перепишав формулу относительно Q_2 получим выражение:

$$Q_2 = Q_0 - \sqrt{Q_0(Q_0 - Q_1)}$$

дающее отношение Q_1/Q_2 около 2-х при достаточно большом отношении холостой и нагруженной добротностей, что выполняется практически. Т.е. для получения такого же общего КПД нагруженную добротность 2-х звенного П-контура (каждой половины) нужно выбирать в 2 раза меньшей по сравнению с 1-звенным контуром. Приняв Q_n однозвенного и двухзвенного контуров к примеру 16 и 8 получим коэффициент фильтрации 2-й гармоники (KF-U) двухзвенным контуром равный около 50 дБ, против 32-33 дБ у одиночного П-контура. Фактически это означает, что нагруженную добротность можно выбрать не в 2, а более чем в 2 раза меньшей, при этом получая лучший КПД и лучшую фильтрацию гармоник. Практические расчеты показали, что $Q_n = 4 - 6$ обычно достаточно для подавления 2-й гармоники на 40-45 дБ, т.е. примерно на 7-12 дБ лучше чем у однозвенного контура с $Q_n = 16$. АЧХ также получается более широкой, это позволяет сделать контур не перестраиваемый в диапазонной полосе частот, однако обязательно нужно рассматривать и ширину полос параметров S_{11} и S_{22} , которые могут быть существенно уже полосы АЧХ. Не будет лишним отметить и меньшие требования, при таком выборе Q_n , к максимально допустимой реактивной мощности элементов схемы.

Существенными недостатками двойного П-контура является большая сложность изготовления, прежде всего в многодиапазонных конструкциях, а так же меньшие значения получаемой «горячей» емкости, что также затрудняет применение такого контура на высокочастотных диапазонах.

Возвращаясь к сравнению двух методов расчета и выбору между ними можно сказать, что в целом, как отмечалось выше, использование расчета контура как ФСС с внутренней связью напрашивается при применении относительно высоких значений нагруженной добротности, при этом получаются хорошие формы графиков, хорошее согласование на расчетной частоте и отличная фильтрация гармоник. Напротив, использование расчета по формулам [1] предпочтительно при относительно невысоких значениях Q_n (3-7), а также при расчете контура как ФНЧ при еще более низких значениях Q_n (1,5-2,5).

В любом случае оценивать результат лучше всего изучая полученные графики для каждого конкретного случая, а также текстовые данные выводимые программой на монитор или записываемые в файл.

5 Построение графиков

Для построения графиков на компьютере должна быть установлена программа GnuPlot. Это небольшая свободно распространяемая программа для построения различных графиков и диаграмм, активно используемая научным и инженерным сообществом по всему миру. При наличии программы GnuPlot графики будут построены автоматически. Скрипт построения АЧХ «plot.plt» приложен к файлу программы, данные для построения записываются в файлы «data1-data3», построенные графики в файлы afr.png, S11.png и S22.png. В случае отсутствия программы GnuPlot построение графиков будет просто проигнорировано.

В операционной системе Linux программу GnuPlot установить очень просто прямо из репозитория системы, например в ОС Ubuntu для этого нужно от имени администратора дать команду `apt-get install gnuplot`, ввести пароль, ответить утвердительно на вопрос системы о необходимости установки и дождаться установки программы. В операционной системе windows программу придется установить скачав дистрибутив с официального сайта¹. На способе установки программы в ОС windows нужно остановиться немного подробнее. При установке в этой ОС программа не записывается в переменную окружения «PATH» операционной системы, хотя это можно сделать указав данную опцию при установке, однако было замечено, что иногда эта операция выполняется не корректно (для версии gr5.2.8 в windows 7, с затиранием другой имеющейся в «PATH» информации, трудно сказать почему это происходит, возможно из-за различия операционных систем разных версий, остается ожидать, что в новых версиях эта ошибка будет исправлена). Поэтому лучше установить программу GnuPlot без ее «прописки» в «PATH» на стадии установки, просто нажимая «далее» ничего не меняя, а после корректно прописать ее там вручную. На примере windows 7 это можно сделать следующим образом. После установки программы:

- заходим в «Свойства компьютера» (правый клик мышки по компьютеру)
- кликаем по ссылке «Дополнительные параметры системы»
- заходим в «Переменные среды»
- нажимаем кнопку «Создать»

вписываем имя переменной PATH, а в поле значения строчку `C:\Program Files\gnuplot\bin`. Путь должен соответствовать месту установки программы. Лучше всего, во избежание длинных путей до файлов,

установить программу в корневой каталог, например в папку `C:\plot`.

Результат должен получиться таким как на рисунке 8. Если переменная «PATH» уже есть, то достаточно дописать путь через точку с запятой. На этом настройка должна быть закончена, перезагрузка компьютера потребоваться не должна.

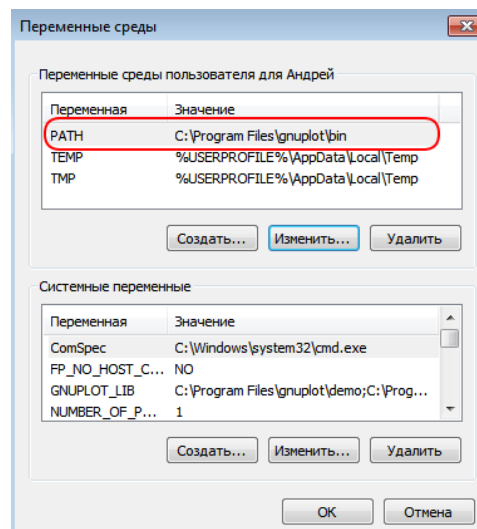


Рис. 8:

6 Права и запуск

Программа распространяется на условиях freeware. Установка программы не требуется. Для работы необходима 64-х битная ОС windows или linux.

Запуск программы в OS Windows осуществляется файлом с именем соответствующим кодовой странице терминала вашего компьютера. Если символы отображаются неправильно с любым из файлов примените в терминале шрифт Lucida Console.

Запуск программы в OS Linux осуществляется командой `./2p-kontur-lin`. Если файл не запустится по причине отсутствия прав на запуск, то нужно их предоставить с помощью файлового менеджера через контекстное меню «свойства — права — разрешить выполнение файла как программы».

Литература:

1. Журнал «Радио» № 5, 7, 1985 г. Методика расчета П-контура передатчика, К.А. Шульгин.

Ссылки:

1. <http://www.gnuplot.info/>