

# Расчет ПЛ-контура лампового каскада

## 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 ПЛ-контур занимает промежуточное положение между однозвенным и двухзвенным П-контуром. Программа выполняет расчет ПЛ-контура, его схема изображена на рисунке 1.

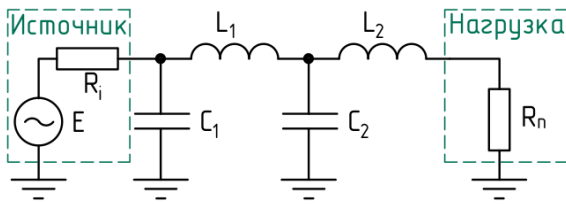


Рис. 1: Схема ПЛ-контура

Программа рассчитывает значения элементов ПЛ-контура для заданной частоты; значения токов и реактивных мощностей в его элементах; параметры  $|S_{11}|$  и  $|S_{22}|$  на расчетной частоте; ширину полосы пропускания (АЧХ) по уровню -1 дБ в двух режимах источника: равенства выходного сопротивления генератора и входного сопротивления контура на расчетной частоте (в параметрах обозначено как АЧХ-U) и в режиме генератора тока, что свойственно для работы с пентодами и тетрами, имеющими высокое выходное сопротивление (в параметрах обозначено как АЧХ-I); степень подавления второй гармоники в 2-х режимах (по аналогии с предыдущим параметром, обозначено как KF-U 2-й гармоники и, для генератора тока, KF-I 2-й гармоники), расчет выполняется с определением уровней напряжения на частотах  $f$  и  $2f$  с выводом результата подавления в дБ; выходную мощность при заданной входной; потери в контуре и его КПД; эффективные значения напряжений на входе и выходе. В режиме согласованного генератора рассчитывается полоса частот для параметра  $|S_{11}|$  по уровню 0.1, учитывая формулу  $KCB = (1 + |S_{11}|)/(1 - |S_{11}|)$  это эквивалентно полосе по уровню  $KCB \approx 1.22$ .

Сканирование по частоте, при определении ширины полосы АЧХ и параметра  $|S_{11}|$ , выполняется с шагом 1...5 кГц, в зависимости от заданной частоты. Тангенс угла диэлектрических потерь конденсаторов принимается равным  $\text{tg } \delta = 1 \cdot 10^{-4}$ . Большинство параметров рассчитывается в комплексных числах.

## 2 Метод расчета

Расчет первой части ПЛ-контура, а это обычный П-контур, выполняется по формулам [1]. Далее, для лучшего представления, выделим синим цветом элементы схемы  $L_2$  и сопротивление нагрузки с рисунка 1, как изображено на рисунке 2.

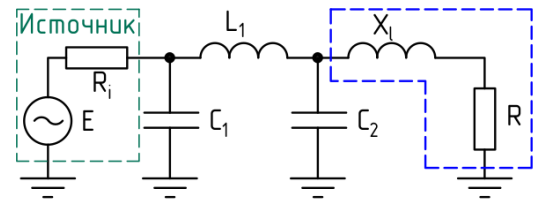


Рис. 2:

Последовательно соединенные индуктивность и сопротивление нагрузки можно представить в виде эквивалентного параллельного соединения элементов, как показано на рисунке 3. В результате такого эквивалентного преобразования схема получит вид, изображенный на рисунке 4.

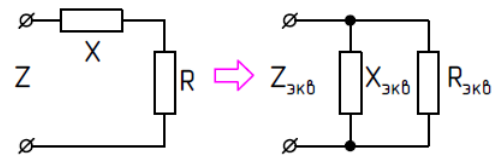


Рис. 3:

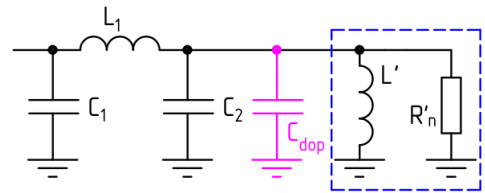


Рис. 4:

На полученной схеме  $L'$  и  $R'_n$  являются пересчитанными значениями. Теперь, в общем случае, остается рассчитать П-контур на пересчитанное значение  $R'_n$ , это будет промежуточной ступенью трансформации, и скомпенсировать индуктивность  $L'$  включением конденсатора  $C_{доп}$  (выделен фиолетовым цветом). Соответственно

в завершении производится расчет требуемого  $C_{dop}$  с рисунка 4 и  $L_2$  с рисунка 1.

Теперь более подробно рассмотрим алгоритм выбора промежуточной ступени трансформации контура. Это можно сделать 2-мя способами. Первый заключается в том, что сопротивление принимается пользователем в виде некоторого исходного значения. Оно выбирается в промежутке от несколько большего сопротивления нагрузки, превышающего его в 2-3 раза, до значения равного входному сопротивлению контура (теоретически можно выбирать и больший верхний предел, но это излишне). Далее на выбранное сопротивление производится расчет П-контура и элементов  $C_{dop}$  с рисунка 4 и  $L_2$  с рисунка 1. Емкости  $C_2$  рассчитанного П-контура и  $C_{dop}$  складываются. Расчет емкостного сопротивления  $C_{dop}$  можно сделать по формуле (1).

$$X_{c_{dop}} = \frac{R'_n \cdot R_n}{\sqrt{R'_n \cdot R_n - R_n^2}} \quad (1)$$

где  $R'_n$  выбранное сопротивление промежуточной ступени трансформации,  $R_n$  — сопротивление нагрузки. Вычислить значение индуктивного сопротивления  $L_2$  можно по формуле (2)

$$X_{l_2} = \frac{X_{c_{dop}} \cdot R_n'^2}{X_{c_{dop}}^2 + R_n'^2} \quad (2)$$

Формулы (1) и (2) являются приведенными от формул преобразования схемы последовательного соединения элементов в эквивалентное параллельное и напротив, параллельного в последовательное, поэтому можно воспользоваться формулами и в их классическом представлении. Необходимо отметить, что с ростом сопротивления промежуточной ступени трансформации растет степень фильтрации гармоник, ведь добротность второго контура  $C_{dop} - L_2 - R_n$  также возрастает. Кроме того, распределение уровней подавления гармоник, а также потерь, в первом и втором контурах становится более равномерным.

Однако в предлагаемой программе принят второй алгоритм расчета промежуточной ступени трансформации, как более наглядный с точки зрения предварительной оценки степени фильтрации гармоник, распределения потерь в 2-х половинах контура и соответственно КПД. Данный алгоритм предлагает предварительное определение максимально возможной добротности контура  $C_{dop} - L_2 - R_n$ ; выбор добротности пользователем, минимально возможное значение добротности при этом принимается в виде некоторой небольшой константы (программа предлагает значение 1,0); дальнейший расчет сопротивления средней ступени трансформации; расчет П-контура по формулам [1]; расчет элементов  $C_{dop}$  и  $L_2$ . Кроме того, такой алгоритм прост и не требует операций преобразования схемы. Максимально

возможную добротность контура  $C_{dop} - L_2 - R_n$  можно вычислить по формуле (3) определения добротности Г-контура, формула используется для определения критической добротности П-контура и приведена в [1].

$$Q_{n_2 \max} = \sqrt{\frac{\eta R_i}{R_n}} - 1 \quad (3)$$

где  $\eta$  - КПД контура, для расчета его можно принять равным единице,  $R_i$  - максимальное входное сопротивление рассматриваемого Г-контура, оно же является максимальным значением средней ступени трансформации (принимается чуть меньшим входного сопротивления ПЛ-контура),  $R_n$  — сопротивление нагрузки. Далее выбираем, как говорилось ранее, желаемый уровень добротности второго контура  $Q_{n_2}$  и, выразив  $R_i$  из формулы (3), находим среднюю ступень трансформации, обозначим ее в данном случае через  $R_{sr}$

$$R_{sr} = \frac{R_n(Q_{n_2}^2 + 1)}{\eta} \quad (4)$$

Теперь найдем  $X_{c_{dop}}$  и  $X_{l_2}$ . Эквивалентное сопротивление контура  $R_e$  вычисляется по известной формуле (5)

$$R_e = Q R_{har} \quad (5)$$

где  $R_{har}$  характеристическое сопротивление контура,  $Q$  его добротность, отсюда находим емкостное сопротивление конденсатора  $C_{dop}$ .

$$X_{c_{dop}} = \frac{R_{sr}}{Q_{n_2}} \quad (6)$$

Добротность катушки индуктивности определяется общеизвестной формулой (7)

$$Q_l = \frac{X_l}{R_l} \quad (7)$$

отсюда  $X_{l_2}$  можно найти по формуле (8), поскольку, в соответствии со схемой ПЛ-контура, полезную нагрузку  $R_n$  можно рассматривать как «элемент потерь» в катушке индуктивности.

$$X_{l_2} = Q_{n_2} R_n \quad (8)$$

Далее следует не обязательный, но несколько улучшающий результаты работы программы шаг. Элементы второго контура уточняются численным методом для получения лучшего согласования по входному сопротивлению ПЛ-контура (получения минимального значения  $S_{11}$ ). В завершении программой определяются остальные параметры, перечисленные в начале статьи.

### 3 Использование

Как сказано в заголовке к описанию, программа предназначена для расчета РЛ-контура лампового каскада.

Значение нагруженной добротности первого контура рекомендуется принимать, как и для расчета обычного П-контура, в районе 11-16. Добротность второго контура можно принять в середине предлагаемого диапазона значений и далее, при необходимости, корректировать, опираясь на полученный результат. При выборе  $Q_n$  второго контура близкой к максимальной напряжению на конденсаторе  $C_2$  будет близким к напряжению на конденсаторе  $C_1$ . При получении малой «горячей» емкости на ВЧ диапазоне значение  $Q_n$  первого контура можно несколько увеличить, а второго, напротив, уменьшить, вплоть до минимального значения.

Значение холостой добротности катушек выбирается по качеству их изготовления, обычно в пределах 150-300.

При расчетах каскада в целом нужно учитывать, что программой производится расчет уровня фильтрации 2-й гармоники только самым ПЛ-контуром, т.е. без учета «уже» меньшего уровня 2-й гармоники на его входе, но учитывать данный показатель необходимо. Например, при широко используемом значении угла отсечки  $90^\circ$  для ламп с линейной характеристикой на выходе усилительного каскада (в анодной цепи лампы) уровень тока второй гармоники будет меньше уровня первой на

$$k = 20 \log \left( \frac{a_1}{a_2} \right) \approx 20 \log \left( \frac{0.5}{0.212} \right) \approx 7.45 \text{ дБ} \quad (9)$$

значит для правильной оценки уровня 2-й гармоники на выходе каскада в целом к рассчитанному программой значению (для пентодов и тетродов КФ-I) нужно прибавить 7,45 дБ. Однако, с целью обеспечения некоторого запаса на неучтенные факторы, согласно [1], принимают запас по фильтрации 2-3 дБ. Например, в рассмотренном выше случае вместо 7,45 дБ будет правильно прибавить 5-5,5 дБ. При расчете каскадов на триодах, в связи с их существенно меньшим выходным сопротивлением, дополнительный запас лучше увеличить до 3-4 дБ, либо ориентироваться на параметр подавления 2-й гармоники КФ-U. Для другого угла отсечки и другой характеристики лампы нужно применить другие коэффициенты разложения токового импульса, которые можно определить по графикам изображенным на рисунке 5 для линейной характеристики и на рисунке 6 для квадратичной характеристики лампы.

### 4 Права и запуск

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

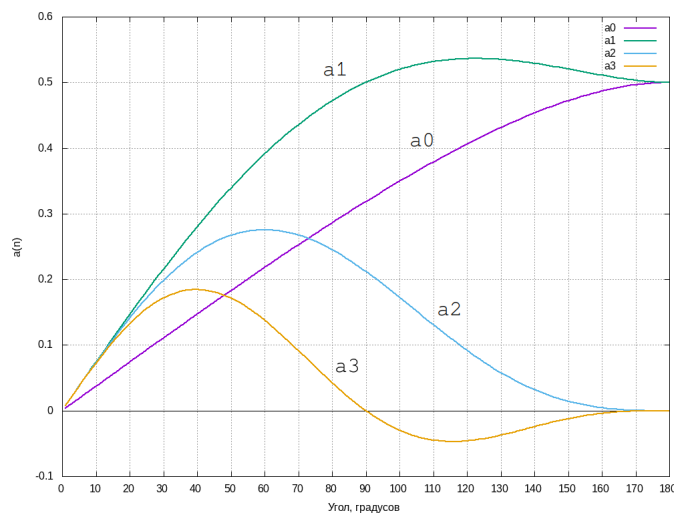


Рис. 5: Для линейной характеристики

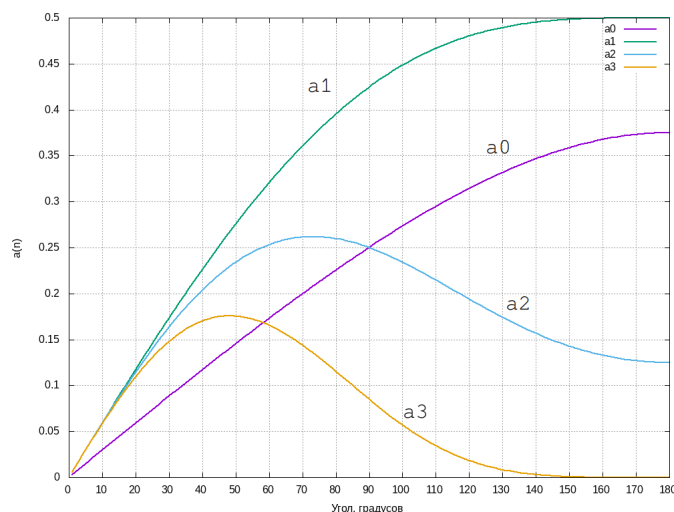


Рис. 6: Для квадратичной характеристики

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 Concole.

Запуск программы в OS Linux осуществляется командой `./PL-linux`. 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.