

Расчет П-контура и параметров выходного каскада передатчика

1 Описание программы

Программа производит расчет выходного каскада передатчика с П-контуром, схема изображена на рисунке 1. В программе используются формулы расчета П-контура в соответствии с методикой К.Шульгина (U3DA), опубликованной в [1]. Данная программа является частичным клоном программы К.Шульгина, опубликованной в [2], в части расчета похожего набора параметров, однако написана «с чистого листа» по новой блок-схеме на современном языке программирования. Количество рассчитываемых параметров расширено. Режим работы — терминальный. По запросу пользователя программа производит запись результатов расчета в текстовый файл. Программа может выполнять расчет лампового каскада на тетраде или пентоде или транзисторного каскада при построении по классической схеме с П-контуром.

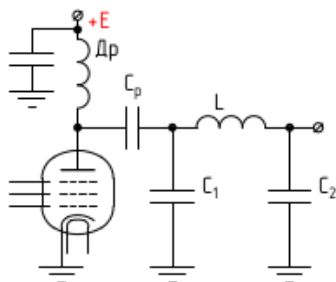


Рис. 1: Схема каскада

При расчете определяются следующие параметры:

1. По заданной выходной мощности рассчитываются подводимая от источника питания мощность, мощность 1-й гармоники в контуре, мощность потерь в П-контуре и рассеиваемая мощность на аноде лампы.
2. КПД П-контура, анодной цепи лампы и полный КПД выходного каскада по анодной цепи.
3. Коэффициенты разложения импульса тока лампы для постоянной составляющей, основной частоты и ее второй гармоники, в зависимости от

заданного угла отсечки и вида характеристики лампы (коэффициенты выводятся только при записи в файл). Расчет коэффициентов выполняется через прямое дискретное преобразование Фурье.

4. Величина импульса тока, амплитуда тока первой гармоники и величина постоянной составляющей тока выходного каскада.
5. Входное сопротивление П-контура (часто обозначаемое как R_{oe}).
6. Коэффициент трансформации П-контуром сопротивлений с учетом потерь в контуре.
7. Нагруженная добротность П-контура Q_n по заданному в дБ уровню фильтрации 2-й гармоники.
8. Критическая добротность П-контура с выполнением, при необходимости, автоматической коррекции нагруженной добротности контура для достижения условия его реализуемости.
9. Ширина рабочей полосы частот П-контура по уровню -1 дБ (вывод только в файл).
10. Значения элементов П-контура в пФ и мкГн.
11. Реактивные токи и мощности во всех элементах П-контура.
12. Среднеквадратичное значение напряжения первой гармоники на выходе передатчика.
13. Уровень подавления 2-й гармоники в дБ.
14. Мощность 2-й гармоники на выходе передатчика, мВт.
15. Параметры $|S_{11}|$ и $|S_{22}|$ П-контура на расчетной частоте (вывод только в файл), а так же полоса параметра $|S_{11}|$ контура по уровню 0.1 (эквивалентно КСВ $\approx 1,22$), как изображено на рисунке 2. Расчет этих параметров, для оценки точности, делается для режима равенства внутреннего сопротивления генератора и входного сопротивления контура.

На высокочастотных диапазонах по условию минимальной «горячей» емкости программа, при необходимости и при положительном ответе пользователя на вопрос программы, производит коррекцию нагруженной добротности и соответственно значений емкости и индуктивности элементов П-контура для достижения возможности его постройки.

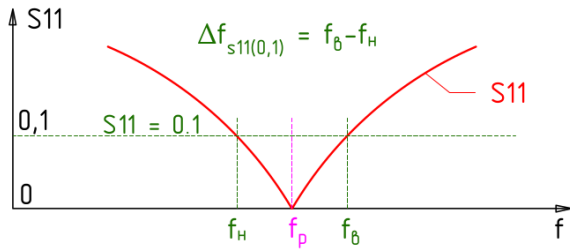


Рис. 2: S11 по уровню 0.1

2 Алгоритм работы

Довольно часто П-контур рассчитывают задаваясь значением нагруженной добротности, при этом уровень подавления 2-й гармоники проверять «забывают». Такое положение дел сложилось из-за относительной простоты такого метода, а также того факта, что значение нагруженной добротности является неотъемлемым параметром для самого расчета. Выполнять же расчет множества вариантов с проверкой уровня подавления гармоник достаточно трудоемко. Вместе с тем как раз уровень внеполосных излучений является одним из главных требований к построению передающего устройства. По этой причине в данной программе реализован метод определения Q_n в зависимости от заданного уровня фильтрации второй гармоники. В настоящее время при использовании ЭВМ выполнить такие расчеты совершенно не сложно.

Алгоритм работы программы крайне прост. В первую очередь рассчитываются коэффициенты разложения токового импульса для заданных пользователем угла отсечки и вида характеристики лампы. Далее программа определяет уровень переменного напряжения на аноде лампы, рассчитывает требуемое входное сопротивление П-контура и значения элементов П-контура для заданной частоты, а также все энергетические показатели. Начальное значение нагруженной добротности принимается в виде некоторого заведомо невысокого значения ($Q_{n0} = 7,0$) с проверкой по критическому значению и при необходимости ее коррекции. Далее программа относительно мелким шагом ($\Delta Q_n = 5 \cdot 10^{-2}$) поднимает нагруженную добротность до тех пор, пока не будет достигнут требуемый, заданный пользователем, коэффициент фильтрации 2-й гармоники. Расчет подавления 2-й гармоники выполняется на каждом шаге циклических вычислений и определяется через отношение величин выходных напряжений, в децибелах, на частотах f и $2f$, при этом, через коэффициенты Берга, учитывается меньший уровень второй гармоники на входе П-контура; режим расчета принимается для генератора тока, что свойственно для пентодов и

тетродов, имеющих высокое выходное сопротивление; для обеспечения гарантированного подавления 2-й гармоники, в соответствии с [1], принимается запас 2,5 дБ на неучтенные факторы. Конечно, на каждом шаге вычислений производится перерасчет элементов П-контура и всех энергетических величин. На этом данный этап расчетов заканчивается.

В том случае, если «горячая» емкость П-контура, а это частый случай для ВЧ диапазонов, окажется менее заданной пользователем выходной емкости лампы, конструктивной емкости монтажа и минимального значения емкости КПЕ (или, во втором варианте, только емкости монтажа и выходной емкости лампы) программа проинформирует об этом пользователя и спросит о необходимости дальнейшего подъема нагруженной добротности. При получении положительного ответа процесс вычислений будет продолжен, подъем добротности при этом продолжается до тех пор, пока горячая емкость П-контура не достигнет значения суммарной емкости монтажа, выходной емкости лампы и минимального значения КПЕ. При получении отрицательного ответа, на случай если пользователь решит минимизировать емкость или компенсировать ее часть, дополнительный подъем нагруженной добротности не производится.

На завершающем этапе вычислений производится расчет полосы П-контура по уровню 0,1 параметра S_{11} , а также параметров S_{11} и S_{22} на рабочей частоте. На этом же этапе рассчитывается ширина полосы пропускания П-контура по уровню -1 дБ. Для этого программой строится АЧХ контура с записью данных в числовой массив, после этого производится сканирование по уровню -1 дБ для поиска граничных значений частоты на указанном уровне. Расчет АЧХ, как и расчет подавления 2-й гармоники, производится в режиме источника как генератора тока.

По окончании последнего этапа вычислений расчетные данные выводятся на монитор. При выводе данных, во избежание «зрительной перегрузки» выдается только часть наиболее важных данных, полный перечень расчетных данных выводится в текстовый файл.

3 О вводе данных

После ввода требуемых данных, в процессе работы, программа позволяет внести изменения в ряд введенных параметров, не требуя вводить все заново. При этом могут быть изменены: частота, величина заданного значения фильтрации 2-й гармоники, уровень выходной мощности, уровень питающего напряжения, угол отсечки и минимальное мгновенное напряжение на аноде. При необходимости изменения

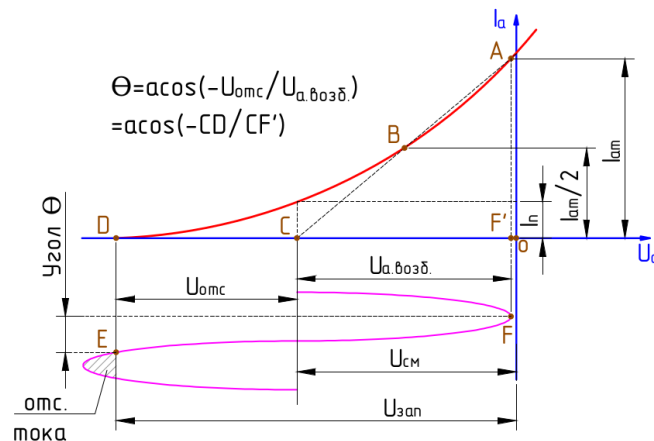
При вводе данных будет запрошен ряд параметров по которым желательно сделать пояснения:

Для ламп с линейной характеристикой вводится единица, для ламп с «квадратичной» характеристикой вводится число 1,5...2, в зависимости от вида анодно-сеточной характеристики лампы.

Чаще всего при расчете линейного усилителя для ламп с линейной характеристикой принимают угол 90° , выбирая точку смещения продолжением прямолинейного участка характеристики до пересечения с горизонтальной координатной осью. Из-за кривизны характеристики в нижнем участке характеристики иногда принимают некоторый поправочный коэффициент для постоянной составляющей [3] либо просто принимают чуть больший чем 90° угол отсечки, в пределах 93° . Расчеты показывают, что разница в получаемых результатах чаще всего не особенно велика. При расчете каскада телеграфного или ФМ/ЧМ передатчика для повышения общего КПД выгодно принять угол отсечки $75 - 80^\circ$.

Для ламп с квадратичной характеристикой, работающими как правило со значительными токами покоя (для линейного режима) и имеющих высокую крутизну, к вопросу выбора угла отсечки и тока покоя необходимо подходить более тщательно. Во-первых угол отсечки в таком случае составляет далеко не 90^0 , а значительно больше, во-вторых правильный выбор угла отсечки является необходимым требованием как для минимизации побочных излучений так и для правильности расчета. Значения угла отсечки и тока покоя необходимо определить расчетом по АСХ лампы. На рисунке 3 показан выбор тока покоя и приведена формула определения угла отсечки. Стоит отметить, что угол отсечки весьма сильно влияет на КПД усилителя, а также на получаемое значение нагруженной добротности Q_n , поскольку от угла отсечки сильно зависит уровень 2-й гармоники.

Как было сказано выше одним из главных требований к построению передающего устройства, наряду с



другими требованиями к уровню внеполосных излучений, является уровень подавления 2-й гармоники. В таблице 1 приведены несколько рекомендуемых значений подавления 2-й гармоники в децибелах для разных уровней выходной мощности. В случае расчета каскадов на триодах подавление 2-й гармоники лучше предусмотреть на 2-2,5 дБ больше, в связи с их меньшим выходным сопротивлением. Для маломощных QRP передатчиков значение требуемого уровня подавления 2-й гармоники может быть принято меньше рекомендуемого таблицей 1, например 35 дБ.

№	Р вых., Вт	Р 2-й гарм- ки, мВт	Отношение мощностей, дБ	Рекомендуемое подавление 2-й гарм- ки, дБ (не менее)
1	100	50	33.01	40
2	250	50	36.99	40
3	500	50	40.00	40.5
4	750	50	41.76	42.5
5	1000	50	43.01	43.5

Нужно учитывать, что во второй колонке таблицы, для удобства использования, приведена мощность основной гармоники на выходе передатчика, в то время как при расчете мощности 2-й гармоники отношение считается от мощности основной гармоники на входе П-контура (т.е. без учета потерь мощности в контуре). Поэтому в случае небольшого превышения, по результату расчета, мощностью 2-й гармоники уровня 50 мВт нужно немного увеличить коэффициент фильтрации (может быть достаточно увеличения на десятки доли дБ).

С ростом коэффициента фильтрации сужается полоса пропускания, растет уровень реактивной мощно-

сти и тока в элементах П-контура, падает его КПД и как следствие возрастает его нагрев, поэтому задавать значения значительно превышающие рекомендуемые таблицей не стоит. Впрочем, все данные легко контролировать по результатам работы программы.

3.4 Минимальное мгновенное напряжение на аноде

Параметр U_{min} принят для определения амплитуды переменного напряжения на аноде лампы. На рисунке 4 показан выбор этого параметра для лампы ГК-71 для рассчитываемого каскада на примере из [3]. По рисунку видно, что для определения U_{min} выбирается точка примерно в середине скругления выбранной анодной характеристики, эта точка примерно соответствует граничному режиму работы. Для ламп со «средними» характеристиками U_{min} должно получаться не меньше двойного-тройного максимального (пикового) напряжения на первой сетке, иначе будут быстро расти токи сеток, а вершина импульса анодного тока искажаться (притупляться) [3]. Исходя из потребности получения нужной мощности может быть выбрана другая линия анодной характеристики, например самая верхняя, соответствующая для лампы ГК-71 максимально допустимому значению тока 0,8-0,9А при амплитуде напряжения на первой сетке около 100В. Для ламп с «левыми» характеристиками, при работе без сеточных токов, кривая анодной характеристики выбирается с нулевым значением сеточного напряжения.

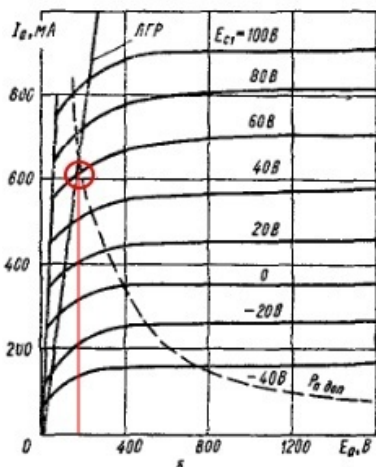


Рис. 4: Анодная характеристика ГК-71

Для тетродов минимальное напряжение на аноде согласно [3] не следует принимать ниже напряжения экранной сетки. Для некоторых ламп это может несколько снизить КПД (точное значение будет определено расчетом), но с этим приходится мириться для

минимизации нелинейных искажений и недопущения динаatronного эффекта. Для лучевых тетродов U_{min} можно допустить меньше напряжения 2-й сетки, однако по анодным характеристикам выбранного тетрода желательно убедиться в отсутствии характерного искривления характеристики в рассматриваемом диапазоне напряжений.

При выбранном U_{min} полезно проверить мощность рассеивания на второй сетке P_{c2} по формулам приведенным в [3], данные формулы показаны ниже.

$$P_{c2} = E_{c2} \cdot I_{0c2}$$

$$I_{0c2} = 0.7 \cdot I_{c2max} \cdot a_0$$

где

E_{c2} - напряжение на 2-й сетке,

I_{0c2} - постоянная составляющая тока 2-й сетки,

0.7 - коэффициент, учитывающий остроугольность импульса тока второй сетки,

I_{c2max} - максимальный ток второй сетки, определяемый по сеточно-анодной характеристике для второй сетки при значениях U_{min} и U_{c1} ,

a_0 - коэффициент постоянной составляющей тока анодной цепи (коэффициент Берга), расчетное значение выводится в файл или может быть принято как отношение I_0/I_{max} .

Уровень напряжения возбуждения принимается по отдельному расчету с учетом определенного по анодной характеристике лампы максимального напряжения на первой сетке, требуемого угла отсечки и, соответственно, напряжения смещения рабочей точки.

Амплитуда переменного напряжения на аноде лампы вычисляется по формуле:

$$U_{a.max} = E - U_{min}$$

где E - напряжение питания каскада. $U_{a.max}$ принимается для дальнейших расчетов, а также для расчета и вывода, информационно, коэффициента использования напряжения источника питания - КИАН.

По завершении расчета нужно проверить соответствие выбранного по анодной характеристике тока импульса лампы рассчитанному программой значению. Если рассчитанное программой значение импульса будет существенно больше или меньше определенного по анодной характеристике, то, при необходимости, можно скорректировать значение выходной мощности или напряжения источника питания либо принять для расчета другую лампу. В рассчитываемых параметрах обязательно нужно следить и за значением рассеиваемой на аноде мощности.

3.5 Выходная емкость лампы + емкость монтажа, пФ

Для возможности построения выходного каскада по минимально возможной емкости «горячего» конденсатора программа просит ввести значение выходной емкости лампы и емкости монтажа. При работе с программой нужно ввести суммарное значение указанных емкостей $C_{\text{л}} + C_{\text{м}}$. Минимальная емкость КПЕ не учитывается. К примеру выходная емкость лампы составляет 10 пФ, емкость монтажа принимается равной 20 пФ, значит нужно ввести значение $10 + 20 = 30$ пФ.

3.6 Минимальная емкость КПЕ

Вводится минимальное значение емкости КПЕ $C_{\text{кпе.мин.}}$, без учета других емкостей.

Здесь нужно сделать пояснение как программой учитываются данные значения емкостей. Для примера суммарная емкость монтажа и выходной емкости лампы принимается равной 30 пФ (по выше приведенному пункту), минимальная емкость КПЕ составляет 10 пФ. При вычислениях программа рассчитывает значение емкости горячего конденсатора, получаемое для заданных исходных параметров, и принимает его как оптимальное (по окончании расчетов оно будет выведено на монитор). Далее производится сравнение оптимальной емкости с суммарной емкостью лампы и монтажа $C_{\text{л}} + C_{\text{м}}$ и с суммарной емкостью лампы, монтажа и минимальной емкостью КПЕ $C_{\text{л}} + C_{\text{м}} + C_{\text{кпе.мин.}}$. В обоих случаях, при недостаточном значении оптимальной емкости, программа выводит сообщение и задает вопрос о дальнейших действиях. Разница между 2-мя вариантами заключается лишь в формулировке выводимого программой сообщения.

При малой оптимальной емкости для «изучения вопроса» можно сделать 2 расчета для нужной частоты, согласившись с предложением о поднятии Q_n в первом случае и отказавшись от предложения программы во втором.

4 Предупреждения и ограничения

При выводе данных программа делает предупреждения в случаях:

- полученного при расчете значения КПД П-контура ниже 90, 85 и 80%,
- полученного общего КПД менее 50%,
- заданного значения уровня фильтрации 2-й гармоники менее 40 дБ (допустимо для QRP),
- полученного при расчете значения мощности 2-й гармоники на выходе более 50 мВт,

- получения малой требуемой горячей емкости конденсатора C_1 П-контура (меньше конструктивной емкости $C_{\text{л}} + C_{\text{м}}$ или $C_{\text{л}} + C_{\text{м}} + C_{\text{кпе.мин.}}$), если пользователь отказался от поднятия добротности П-контура,
- при получении слишком низкого значения КПД П-контура (менее 70%) программа останавливает вычисления.

5 Права и запуск

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

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

Запуск программы в OS Linux осуществляется командой `./tx-p-linux`. Если файл не запустился 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.
2. Журнал «Радио» № 11, 1991 г. Расчет выходного каскада с однозвенным П-контуром, К.А. Шульгин.
3. «Справочник радиолюбителя-коротковолновика». С.Г. Бунин, Л.П. Яйленко, 1984 г.

RA9UEK, 2021