

## П – КОНТУР

### Особенности П-контура

В век победного шествия современных полупроводниковых технологий и интегральных микросхем ламповые высокочастотные усилители мощности не утратили своей актуальности. Ламповым усилителям мощности, как и усилителям мощности на транзисторах присущи свои достоинства и недостатки. Но неоспоримым преимуществом ламповых усилителей мощности является работа на рассогласованную нагрузку без выхода из строя электровакуумных приборов и без оснащения усилителя мощности специальными цепями защиты от рассогласования.

Неотъемлемой частью любого лампового усилителя мощности является анодный П-контур рис1. В работе “Методика расчета П-контура передатчика” [1] Константин Александрович Шульгин дал очень подробный и математически точный анализ П-контура.

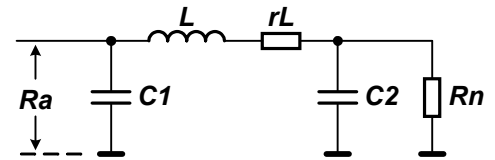


Рис.1

Что бы избавить читателя от поиска необходимых журналов (все таки прошло более 20 лет), ниже приведены формулы для расчета П-контура заимствованных из [1]:

$$f_0 = \sqrt{f_H \times f_B} \quad (1) \quad \text{—среднегеометрическая частота диапазона [Гц];}$$

$Q_n$  —нагруженная добротность П-контура;

$Q_0$  —собственная добротность П-контура, в основном определяется добротностью индуктивного элемента и имеет значение в пределах 150...250 (в некоторых источниках обозначается как  $Q_{xx}$ );

$rL = \frac{XL}{Q_0}$  —собственные потери в контуре, в основном в катушке индуктивности, точным расчетам не поддается, так как необходимо учитывать скин-эффект и потери на излучение по полю. Указанная формула имеет погрешность  $\pm 20\%$ ;

$$N = \frac{Ra}{Rn} \quad (2) \quad \text{—коэффициент трансформации П-контура;}$$

$Ra$  —эквивалентное сопротивление анодной цепи усилителя мощности;

$Rn$  —сопротивление нагрузки (сопротивление фидерной линии, входное сопротивление антенны и т.д.);

$$\eta = 1 - \frac{Q_n}{Q_0} \quad (3) \quad \text{—КПД П-контура;}$$

$$XC2 = \frac{Ra - \eta \times Rn}{\sqrt{\frac{N}{\eta} \times (Qn^2 + 1 + \eta^2) - N^2 - 1 - Qn}} \quad (4);$$

$$XC1 = \frac{Ra \times XC2}{Qn \times XC2 - \eta \times Rn} \quad (5); \quad XL = \frac{Qn \times Rn \times XC2^2}{\eta \times (Rn^2 + XC2^2)} \quad (6);$$

$$C1 = \frac{10^{12}}{2 \times \pi \times f_o \times XC1} |\text{пФ}| \quad (7); \quad C2 = \frac{10^{12}}{2 \times \pi \times f_o \times XC2} |\text{пФ}| \quad (8);$$

$$L = \frac{XL \times 10^6}{2 \times \pi \times f_o} |\text{мкГн}| \quad (9);$$

П-контур с одной стороны представляет собой резонансную цепь с добротностью  $Qn$ , с другой стороны трансформатор сопротивлений, преобразующий низкоомное сопротивление нагрузки в высокоомное эквивалентное сопротивление анодной цепи. Рассмотрим возможность трансформирования при помощи П-контра различных значений сопротивления нагрузки в эквивалентное сопротивление анодной цепи при условии  $Ra=const$ .

Допустим необходимо реализовать П-контур для усилителя мощности собранного на четырех пентодах ГУ-50 включенных параллельно по схеме с общей сеткой. Эквивалентное сопротивление анодной цепи такого усилителя составит  $Ra=1350\text{Ом}$  (для каждого пентода  $Ra \approx 5400 \pm 200 \text{ Ом}$ ), выходная мощность составит примерно  $P_{\text{вых}} \approx 270...320\text{Вт}$ , мощность потребляемая от источника питания  $P_{\text{пот}} \approx 430...480\text{Вт}$ .

По заданным условиям: диапазон 80 метров,

$$f_o = \sqrt{f_H \times f_B} = \sqrt{3500000 \times 3800000} = 3646916 \approx 3650000,$$

$Ra=1350\text{Ом}$ ,  $Qn=12$ ,  $Qo=200$  по формулам (1)...(9) произведем расчет для пяти значений  $Rn$ :  $Rn=10 \text{ Ом}$ ,  $Rn=20 \text{ Ом}$ ,  $Rn=50 \text{ Ом}$ ,  $Rn=125 \text{ Ом}$ ,  $Rn=250 \text{ Ом}$ .

Результаты расчета приведены в таблице 1.

Таблица 1

диапазон 80 метров, $f_o=3650000\text{Гц}$ , $Ra=1350\text{Ом}$ , $Qn=12$ , $Qo=200$					
$Rn$	КСВ	N	C1 пФ	L мкГн	C2 пФ
10	5	135	378,78	5,12	1307,7
20	2,5	67,5	357,97	5,71	2126,8
50	1,0	27,0	333,04	6,58	1566,9
125	2,5	10,8	302,98	7,94	972,1
250	5	5,4	273,80	9,56	642,2

Аналогичные расчеты необходимо произвести и на другие диапазоны. Более наглядно изменение величин элементов C1, L и C2 от сопротивления нагрузки приведены в виде графиков как функции от  $Rn$  рис.2.

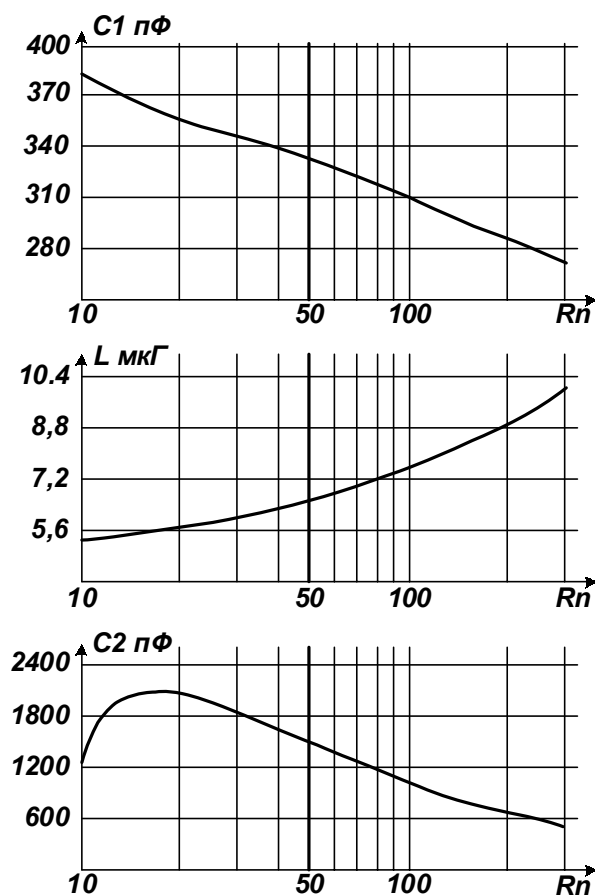


Рис.2

На основании выше изложенного приходим к выводу, что для согласования при изменении сопротивления нагрузки необходима перестройка всех трех элементов П-контура рис.3.

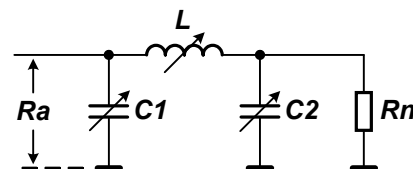


Рис.3

### Практическая реализация П-контура

С середины 60-х годов прошлого века “гуляет” схема П-контура рис.4 которая вроде “прижилась” и не вызывает особых подозрений. Но давайте, обратим внимание на метод коммутации индуктивного элемента в П-контуре.

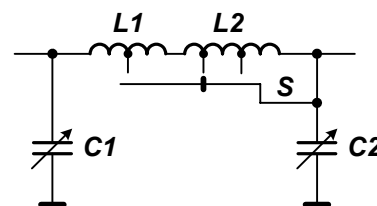


Рис.4

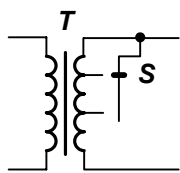


Рис.5

Кто ни будь пробовал коммутировать аналогичным образом трансформатор или автотрансформатор рис.5. Даже один короткозамкнутый виток может привести к полному выходу из строя всего трансформатора.

А с катушкой индуктивности в П-контуре мы без тени сомнения поступаем точно так же !?

Во первых, магнитное поле не замкнутой части катушки индуктивности создает ток короткого замыкания  $I_{K3}$  в замкнутой части катушки рис.6.

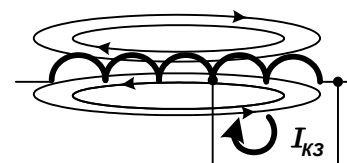


Рис.6

Для справки: амплитуда тока в П-контуре (да и в любой другой резонансной системе) имеет не так уж малую величину:

$$I_{K1} = I_{A1} \times Qn = 0,65 \times 12 = 7,8 A ,$$

где:  $I_{K1}$  –амплитуда резонансного тока в П-контуре;

$I_{A1}$  –амплитуда первой гармоники анодного тока (для четырех ГУ-50  $I_{A1} \approx 0,65 A$ )

И куда будет расходоваться энергия тока короткого замыкания ( $I_{K3}$  рис.6): на нагрев самих короткозамкнутых витков и на нагрев контактных узлов переключателя  $S$  (рис.4).

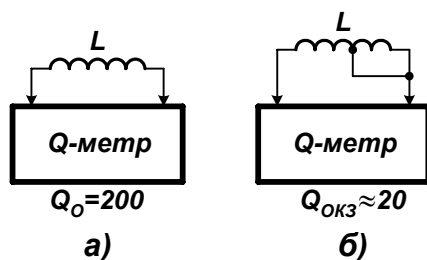


Рис.7

Во вторых, если имеется возможность воспользоваться Q-метром (измеритель добротности) снимите показания с незамкнутой катушки индуктивности и с частично замкнутыми витками рис.7а, рис.7б  $Q_{окз}$  будет в 10...15 раз меньше чем  $Q_0$ , теперь по формуле (3) определим КПД П-контур:

$$\eta = 1 - \frac{Qn}{Q_0} = 1 - \frac{12}{200} = 0,94 ,$$

$$\eta_{K3} = 1 - \frac{Qn}{Q_{окз}} = 1 - \frac{12}{20} = 0,4 ?!$$

На выходе П-контур имеет 40% мощности, 60% ушло на нагрев, вихревые токи и т. д. Обобщая первое и второе в итоге получаем не П-контур, а какой то “ВЧ-тигель”.

Какие имеются пути конструктивного улучшения П-контур:

Вариант1 –схему по рис.4 можно модернизировать следующим образом: количество индуктивных элементов должно быть равно количеству диапазонов, а не две, три катушки как обычно. Для уменьшения магнитного взаимодействия рядом расположенных катушек их оси необходимо располагать перпендикулярно друг к другу, по крайней мере, в пространстве есть три степени свободы, координаты X, Y, Z. Коммутацию осуществлять в местах соединения отдельных катушек.

Вариант2 –использовать перестраиваемые индуктивные элементы, например вариометры. Вариометры позволят более “тонко” настраивать П-контур (табл.1 и рис.3).

Вариант3 –использовать такой вид коммутации, который исключал наличие замкнутых или частично замкнутых катушек. Один из возможных вариантов схемы коммутации приведен на рис.8.

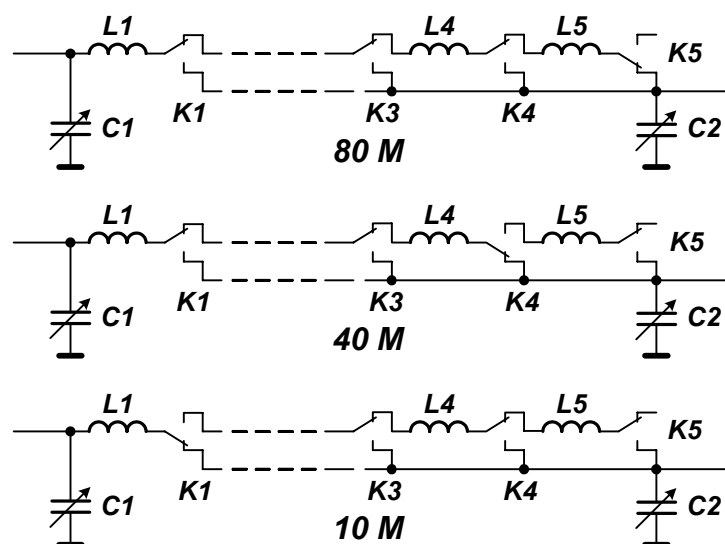


Рис.8

### Литература

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