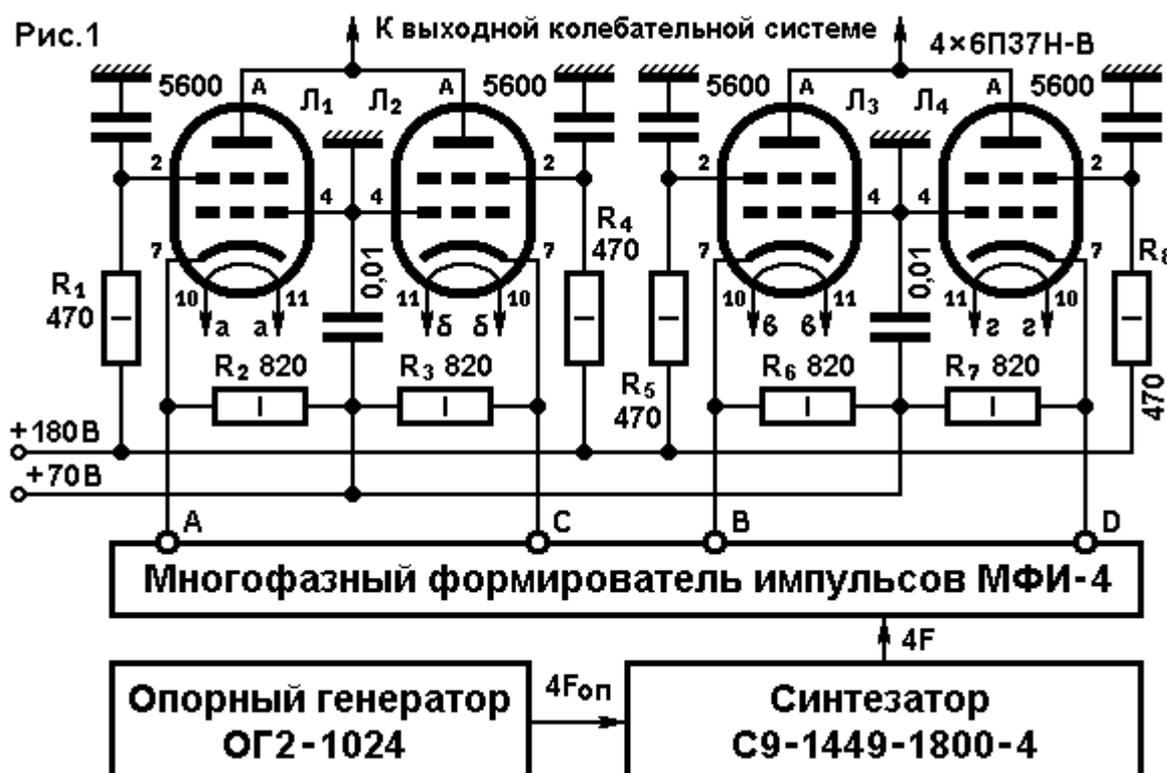


Проектирование и расчет ВКС двухтактного выходного каскада передатчика диапазона 200 м (1449 – 1620 кГц) для мощности 100 Вт.

для тех, кому интересно понимать, откуда что взялось и как оно работает

Сергей Комаров

При использовании в качестве возбuditеля синтезатора С9-1449-1800-4 с мощным 4-х фазным драйвером МФИ-4 [1], специально разработанного для двухтактно-двухфазных ламповых выходных каскадов на металлокерамических тетрах (Рис. 1), работающих в инверсном режиме класса F [2] и имеющего фиксированную скважность выходных прямоугольных импульсов на каждом выходе половинной частоты равную 5,333 а также учитывая неидеальные фронты импульсов анодного тока радиоламп 6П37Н-В, имеющие длительность 20 – 25 нс, коэффициенты разложения «плоского» импульса [3] составят: $\alpha_1 = 0,587$; $\alpha_0 = 0,377$. Расчет будет справедлив для ламп 6П44С, а также для режимов В и С при соответствующих значениях α_1 и α_0 .



Энергетический расчет. При использовании силового анодного трансформатора ТА238-127/220-50 (мощность 170 Вт), сумма напряжений обмоток $4 \times 28 + 4 \times 56 + 2 \times 12 = 360$ В. Выпрямленное напряжение будет в 1,24 раза выше: $360 \times 1,24 = 446,4$ В. При среднем токе обмоток 0,467 А, ток анодной цепи после выпрямителя не должен превышать $0,467 / 1,24 = 0,376$ А. После двух анодных дросселей: фильтра выпрямителя Д267В (1,2 генри при параллельном включении обмоток и допустимом токе 0,56 А с $R_{др} = 20,1 \Omega$), и модуляционного Д274В (4,8 генри при последовательном включении обмоток и допустимом токе 0,4 А с $R_{др} = 42,4 \Omega$) [4] напряжение на анодах ламп составит: $446,4 - (20,1 + 42,4) \times 0,376 = 423$ вольт.

Падение напряжения на открытой радиолампе при максимальном импульсе анодного тока можно определить по характеристикам [5] – около 40 вольт. Примем для удобства 43 вольт.

Тогда: $U_{a1} = E_a - e_{amin} = 423 - 43 = 380$ В.

Положив КПД выходной колебательной системы 90% и выходную мощность одного плеча двухтактной схемы 50 Вт, необходимая мощность, отдаваемая двумя лампами одного плеча в колебательную систему составит $P_1 = P_{вых} / \eta = 50 / 0,9 = 55$ Вт (лампы в плече работают по очереди, каждая со скважностью 5,333, при этом, для ВКС это эквивалентно работе одной лампы).

Амплитуда тока первой гармоники: $I_{a1} = 2 \times P_1 / U_{a1} = 2 \times 55 / 380 = 0,289$ А;

Амплитуда импульса анодного тока: $i_{amax} = I_{a1} / \alpha_1 = 0,289 / 0,587 = 0,493$ А;

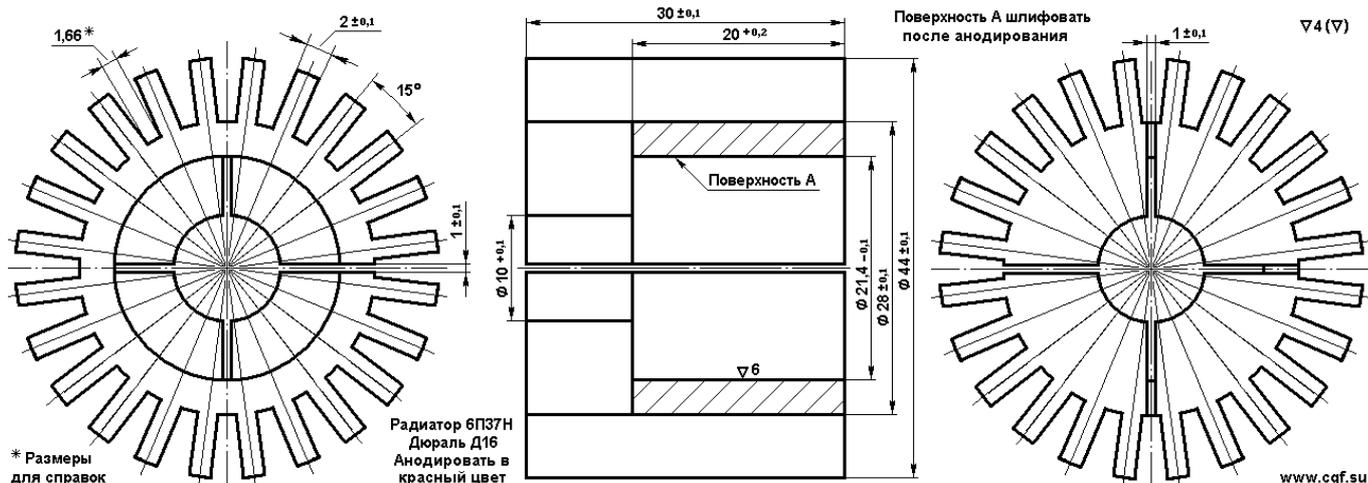
Постоянная составляющая тока анода: $I_{a0} = i_{amax} \times \alpha_0 = 0,493 \times 0,377 = 0,186$ А;

Мощность, потребляемая от анодного трансформатора: $P_0 = 360 \times 1,24 \times 2 \times 0,186 = 166$ Вт.

Мощность, рассеиваемая на модуляционных дросселях: $P_{др} = 3 \times 27,5 \times 0,186 = 15,4$ Вт.

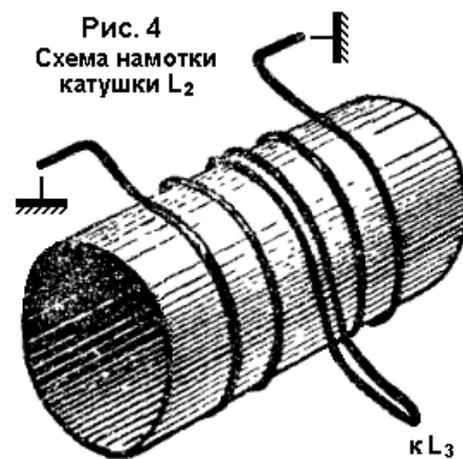
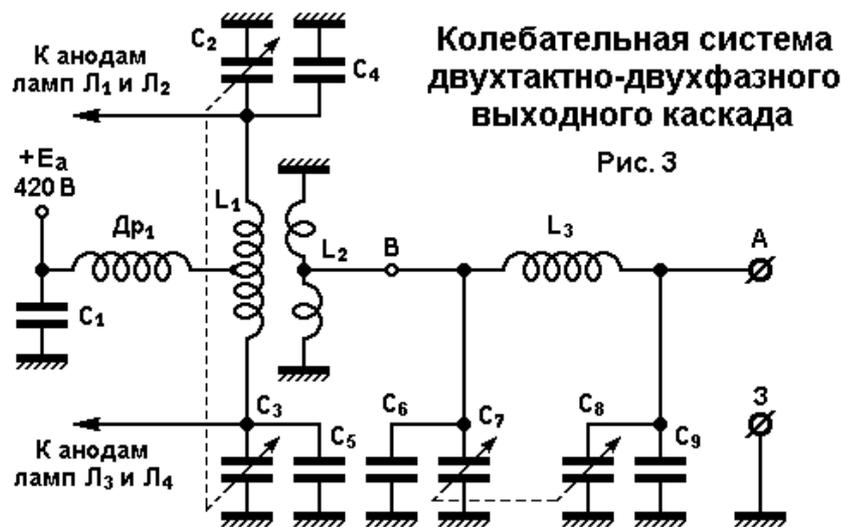
Мощность, рассеиваемая на анодах ламп: $P_a = P_0 - 2 P_1 - P_{др} = 166 - 2 \times 55 - 15,4 = 40,6$ Вт.

Поскольку ламп 4, мощность, на аноде каждой: $P_{a1} = P_a / 4 = 40,6 / 4 = 10,15$ Вт. ($P_{a_{max}} = 15$ Вт)
 Передатчик радиовещательный, и будет непрерывно работать длительное время, поэтому снабдим аноды ламп радиаторами для снижения температуры баллона и увеличения ресурса (Рис. 2).



Сопротивление анодной нагрузки в граничном режиме: $R_{aaгр} = 2 U_{a1} / I_{a1} = 2 \times 380 / 0,289 = 2630 \Omega$. Для заведомо стабильной работы передатчика необходимо обезопаситься от возможного кратковременного перехода в недонапряженный режим, где невозможна анодно-экранная модуляция (будут искажения), поэтому, перейдя в слегка перенапряженный режим и взяв запас в 2-3%, сопротивление анодной нагрузки составит: $R_{aa} = R_{aaгр} \times 1,025 = 2630 \times 1,025 = 2700 \Omega$.

Расчет элементов анодного колебательного контура. Для дальнейшего расчета нам потребуется принципиальная схема ВКС. Поскольку выходной двухтактно-двухфазный каскад работает в ключевом режиме с прямоугольными импульсами анодного тока, применим для лучшей фильтрации двухконтурную схему ВКС с критической связью между контурами. Первый контур – симметричный для работы с двухтактным каскадом, затем, индуктивная связь со вторым контуром, который для улучшения фильтрации высших гармоник выполнен по П-схеме (Рис. 3).



Положим нагруженную добротность обоих контуров $Q_n = 10$. В этом случае при собственной добротности контурных катушек $Q_{xx} = 200$ можно получить КПД каждого контура 95%, а КПД всей колебательной системы 90%. Далее, рассчитаем реактивное сопротивление катушки L_1 :

$$X_{L1} = R_{aa} / Q_n = 2700 / 10 = 270 \Omega$$

$$\text{Средняя частота 200-метрового диапазона } f_{cp} = \sqrt{f_n \times f_b} = \sqrt{1449 \times 1620} = 1532 \text{ КГц.}$$

$$\text{Длины волн: } \lambda_{cp} = 300000 / 1532 = 195,8 \text{ м; } \lambda_{min} = 300000 / 1620 = 185,2 \text{ м; } \lambda_{max} = 207 \text{ м.}$$

$$\text{Индуктивность катушки } L_1 = X_{L1} / (2 \pi f_{cp}) = 270 / (2 \pi \times 1,532) = 28 \text{ мкГ.}$$

Теперь посчитаем номиналы конденсаторов $C_2 - C_5$ (Рис. 3). Они представляют разделенную на две части емкость анодного колебательного контура. Определим C_k из приведенной формулы.

$C_k = C_1 = 531 \times \lambda_{cp} / X_{L1} = 531 \times 195,8 / 270 = 385$ пФ. Поскольку емкость контура образована двумя ветвями конденсаторов, включенных последовательно, то емкость каждой ветви будет в 2 раза больше – 770 пФ ($X_C = 135 \Omega$). По диапазону ее надо будет перестраивать в пределах:

$(f_b / f_{cp})^2 = (1620 / 1532)^2 = 1,118$ или на 11,8% в каждую сторону. С запасом на неточность индуктивности и емкость монтажа, примем диапазон перестройки на 10% больше, что составит $11,8 \times 1,1 = 13\%$. Таким образом, диапазон перестройки емкости $2C_k$ составит:

От $C_{kmin} = 770 \times (1 - 0,13) = 670$ пФ и до $C_{kmax} = 770 \times (1 + 0,13) = 870$ пФ.

Разница в номиналах составляет $870 - 670 = 200$ пФ.

Минимальная емкость 670 пФ включает в себя емкость монтажа, емкость анодов ламп и минимальную емкость переменного конденсатора. Положив емкость монтажа 20 пФ (два анодных радиатора на лампах), емкость анода (выходная емкость лампы) – $S_{вых} = 5,5 \pm 2,5$ пФ (максимум 8 пФ); минимальную емкость переменного конденсатора 12 пФ, получим значение 40 пФ, которое надо вычесть из минимальной емкости 670 пФ, чтобы получить максимальный номинал добавочных конденсаторов $C_4 = C_5 = 670 - 40 = 630$ пФ.

Учитывая 10% разброс, номинал конденсатора должен быть не более $630 / 1,1 = 573$ пФ.

Стандартный меньший номинал по 10% ряду E12 – 560 пФ.

Для выбора типа конденсатора необходимо рассчитать его реактивную мощность.

$N_C = U^2 a / X_C$, где $X_C = 531 \times \lambda_{min} / C = 531 \times 185,2 / 560 = 185,5 \Omega$.

Тогда $N_C = U^2 a / 2X_C = 380^2 / (2 \times 185,5) = 389$ ВАр.

Однако, не стоит забывать, что при анодной модуляции на пике сигнала реактивная мощность будет учетверенной: $4 N_C = 4 \times 389 = 1556$ ВАр.

Выбираем конденсатор типа K15-Y2-560 пФ $\pm 10\%$ -2,5 кВАр-2кВ-M1500.

Теперь посчитаем минимальное значение добавочной емкости. Она складывается из тех же составляющих, но с учетом минимальных значений допусков.

$C_{доб min} = 10 + 3 + 12 + 560 \times 0,9 = 529$ пФ.

Тогда необходимое перекрытие переменного конденсатора составит:

$\Delta C = C_{kmax} - C_{доб min} = 870 - 529 = 341$ пФ, а его номинал: 12/353 пФ.

Поскольку пластины переменного конденсатора открыты и в процессе регулировки могут быть случайно замкнуты (что приведет к аварии источника анодного напряжения), то необходимо последовательно с переменным конденсатором установить разделительный, с помощью которого можно одновременно подогнать стандартный номинал максимальной емкости переменного конденсатора (например, 495 пФ) к необходимому 353 пФ. Емкость такого конденсатора составит:

$C_p = 495 \times 353 / (495 - 353) = 1231$ пФ. Стандартный больший номинал 1300 пФ.

Для определения типа конденсатора, надо посчитать его реактивную мощность.

Наихудший случай (максимальная мощность), когда переменный конденсатор находится в положении максимальной емкости. Тогда емкость ветви с переменным конденсатором составляет 332 пФ. Параллельно ему установлен конденсатор $560 \times 0,9 = 504$ пФ. Таким образом, мощность $N_C = 389$ ВАр делится между параллельно соединенными конденсаторами пропорционально их емкости. $N_{Cmax Cp} = 389 \times 353 / 870 = 158$ ВАр.

В последовательной цепи содержащей переменный и разделительный конденсаторы мощность поделится между ними обратно пропорционально их емкостям:

$N_{Cp} = 158 \times 495 / 1300 = 60$ ВАр.

Установим в качестве разделительного два параллельно включенных конденсатора типа:

КТ-2-500 В – M700 – 680 пФ $\pm 5\%$ (реактивная мощность каждого 50 ВАр). То, что их общая емкость 1360 пФ, а не 1231 пФ приведет лишь к немного большему диапазону перекрытия переменного конденсатора, что никак не скажется на работе ВКС.

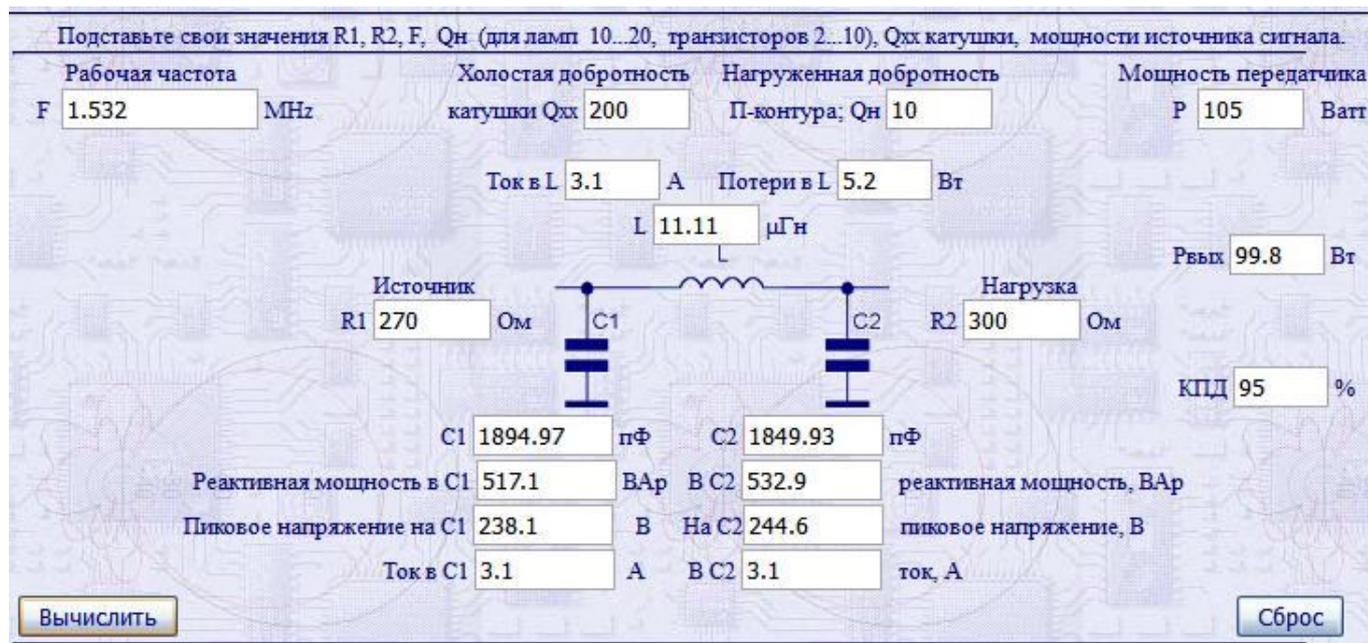
Расчет элементов второго колебательного контура. Для этого надо сначала определиться с сопротивлениями подключаемых антенн - R_n . Из практики известно [6], что сопротивления рационально сконструированных проволочных антенн средневолнового диапазона редко превышает 300Ω (слишком большое напряжение в питающей антенну линии и велики потери на поверхностные токи утечки в пыльных и влажных или покрытых снегом изоляторах) и так же редко бывает ниже 18Ω (слишком большой ток в линии, велики потери на сопротивлении проводов и требуется большое сечение провода для антенны).

Выберем для расчета второго контура максимальное сопротивление нагрузки $R_n = 300 \Omega$, а остальные значения получим, выполнив выходной конденсатор П-контура в виде переключаемого емкостного делителя напряжения.

Полагая КПД каждого контура 95%, мощность снимаемая с катушки L_2 на второй контур должна быть $P_B = 2 P_1 \times \eta_1 = 2 \times 55 \times 0,95 = 105$ Вт. Поскольку $R_{1-2} = 270 \Omega$ есть коэффициент пропорциональности между током и напряжением в точке В на схеме, то эффективное значение тока составит: $I_B = \sqrt{(P_B / R_{1-2})} = \sqrt{(105 / 270)} = 0,624$ А. Соответственно, эффективное значение напряжения на входе П-контура: $U_B = P_B / I_B = 105 / 0,624 = 168$ В.

Расчет второго контура ВКС выполним по программе расчета П-контуров [7]. Она свободно размещена в интернете по адресу: <http://dl2kq.de/soft/6-5.htm>

Исходные данные: Собственная добротность катушки $Q_{xx} = 200$; $Q_{нагр} = Q_2 = 10$; $R_1 = 270 \Omega$; $R_2 = 300 \Omega$; $P = 105$ Вт. Программа дает следующие данные (Рис. 5):



$L = L_3 = 11,1$ мкГ; $I_L = 3,1$ А; КПД = 95%; $P_{вых} = 99,8$ Вт; $C_1 = 1895$ пФ; $C_2 = 1850$ пФ.

Теперь посчитаем распределение емкости между конденсаторами C_6 и C_7 . Как было показано выше, при постоянной индуктивности емкость конденсатора колебательного контура для перекрытия диапазона частот 1449 – 1620 кГц необходимо перестраивать на 11,8% в плюс и минус относительно среднего значения, рассчитанного в программе ($C_1 = 1895$ пФ). Максимальное и минимальное значение емкости: $C_{min} = 1895 \times 0,882 = 1671$ пФ. $C_{max} = 1895 \times 1,118 = 2119$ пФ.

Перекрытие по емкости $\Delta C = C_{Kmax} - C_{доб min} = 2119 - 1671 = 448$ пФ.

Стандартный номинал переменного конденсатора КПВ-2 – 12/495, $\Delta C = 495 - 12 = 483$ пФ.

То есть, он обеспечивает перекрытие по емкости $\pm 12,74\%$. Поскольку на конденсаторе не действует постоянное напряжение питания (как в случае с переменными конденсаторами в анодном контуре), то разделительный конденсатор ставить не будем. Разницу в перекрытии $483 - 448 = 35$ пФ разделим пополам, по 17 пФ, чтобы диапазон перестройки ручки конденсатора имел бы одинаковый запас на регулировку в минимуме и в максимуме емкости. Положим емкость монтажа 10 пФ. Тогда:

$C_{доб} = 1671 - (10 + 12 + 17) = 1632$ пФ. $X_C = 531 \times \lambda_{min} / C = 531 \times 185,2 / 1632 = 60,2 \Omega$.

Для определения типа конденсатора рассчитаем его реактивную мощность.

$N_C = U_B^2 / X_C = 168^2 / 60,2 = 469$ ВАр. На пике модуляции: $4 N_C = 4 \times 469 = 1875$ ВАр.

Такую мощность могут обеспечить конденсаторы КТ-3 при параллельном соединении или конденсаторы К15У-2.

Например: 3 x КТ-3-750 В-М700-470 пФ $\pm 5\%$ плюс КТ-3-500 В-М750-220 пФ $\pm 5\%$

При этом, номинал конденсатора 220 пФ необходимо подобрать для компенсации разброса емкости $\pm (3 \times 24 + 11 = 83)$. Подборный номинал должен быть от $222 - 83 = 139$ пФ до $222 + 83 = 305$ пФ. Учитывая стандартные номиналы и их точность в 5%, диапазон подбора емкости должен быть от 130 до 330 пФ. Подбор ведется на работающем передатчике при укладке диапазона.

Конструктивный расчет катушек индуктивности.

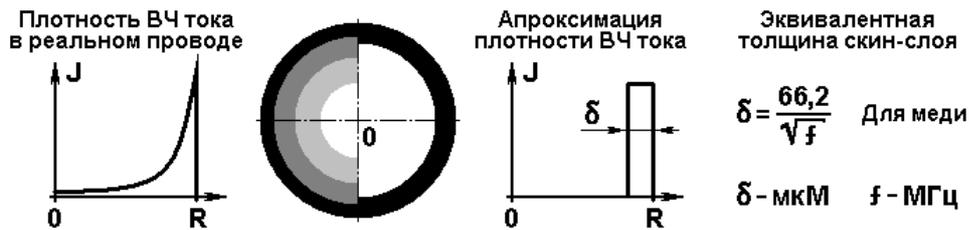
Катушка L_1 . Входное сопротивление контура, со стороны R_a , при резонансе чисто активно.

Это означает, что реактивная часть тока, протекающего через катушку L_1 (Рис. 3) в точности равна (и противоположна по направлению) току $I_{c_{2+4}} = 0,707 U_{a1} / X_{c_{2+4}} = 0,707 \times 380 / 135 = 1,99$ А.

Активная часть тока катушки L_1 равна эффективному значению составляющей первой гармоники анодного тока $I_{a1} = 0,289 \times 0,707 = 0,204$ А. И полный ток, протекающий через катушку, составит: $I_{L1} = \sqrt{I_{a1}^2 + I_{c_{2+4}}^2} = \sqrt{0,204^2 + 1,99^2} = 2,0$ А.

Таким образом, эффективное сечение провода катушки L_1 при рекомендованной для меди плотности тока $j = 3$ А/мм² составит: $S_1 = I_{L1} / j = 2,0 / 3 = 0,667$ мм².

Поскольку на частотах диапазона средних волн сильно выражен поверхностный эффект, то реализовать эффективное сечение $0,667$ мм², максимально близкое к сечению медного провода на постоянном токе, возможно лишь с применением литцендрата. Эффективную толщину скин-слоя можно определить по формуле: $\delta = 66,2 / \sqrt{f}$, где частота f задается в МГц, а толщина скин-слоя δ получается в микронах [8] (Рис. 6).

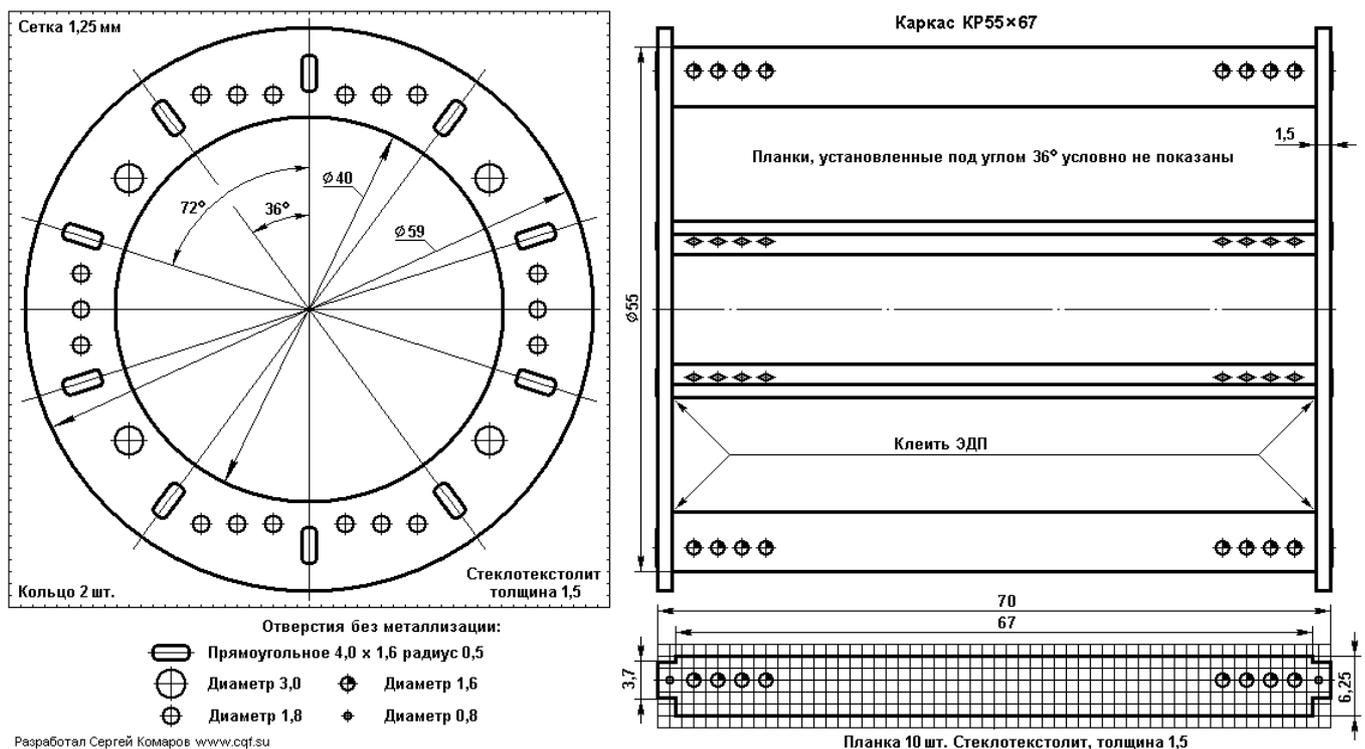


Для нашего случая $\delta = 66,2 / \sqrt{1,532} = 53,5$ м или $0,0535$ мм. Считая это значение радиусом одной жилки литцендрата (при полном использовании сечения для протекания ВЧ тока), ее диаметр должен быть не более $0,107$ мм.

Применим в качестве провода для катушки L_1 литцендрат ЛЭШО 49 x 0,1 мм, имеющий сечение по меди $0,385$ мм², сложенный и перевитый вдвое. В этом случае сечение провода составит $0,77$ мм², а плотность тока - $2 / 0,77 = 2,6$ А/мм², что еще более уменьшит потери в меди на нагревание катушки. Этот запас потребуется для работы катушки на пиках модуляции.

Внешний диаметр литцендрата ЛЭШО 49 x 0,1 по изоляции $1,1$ мм. Сложенный вдвое, он может быть намотан с шагом не менее $2,2$ мм.

Для каркаса КР55x67 (Рис. 7) [9] при диаметре $57,5$ мм и длине намотки 64 мм число витков составит: $n_1 = \sqrt{[(l/D + 0,44) \times L_1 / (0,01 \times D)]} = \sqrt{[(6,4/5,75 + 0,44) \times 28 / (0,01 \times 5,75)]} = 27,5$ витка.



Шаг намотки: $h = l / n_1 = 64 / 27,5 = 2,3$ мм. Провод помещается. Но при плотной намотке шаг будет $2,2$ мм и длина намотки - $60,5$ мм. При этом индуктивность катушки составит $29,14$ мкГ.

Важное замечание. Поскольку катушка в передатчике располагается не в свободном пространстве, а в окружении других деталей и металлоконструкций, то ее индуктивность будет меньше расчетной. Даже хорошо, что у нас получилась индуктивность больше. Мало того, полвитка мотать неудобно, и наматываем до ровного счета 28 витков. Длина намотки составит 61,6 мм. А индуктивность 29,83 мкГ. В случае чего (при окончательной регулировке передатчика), примененный каркас позволит намотать и 30 витков при длине намотки 66 мм и индуктивности 32,6 мкГ. Будем иметь ввиду, что у нас есть такой конструктивный запас.

Длина провода: $n \pi D = 28 \pi 5,85 = 5,15$ м, плюс длина 2 x 50 мм на заделку выводов. Итого 5,25 метра. Поскольку литцендрат сложен вдвое, то потребуется 10,5 метра ЛЭШО 49 x 0,1.

Расчет катушки L_2 и связи между контурами. Для обеспечения критической связи между контурами [10], коэффициент связи должен быть: $K_{кр} = 1 / \sqrt{Q_1 Q_2} = 1 / \sqrt{(10 \times 10)} = 0,1$.

Поскольку этот коэффициент связывает между собой величину вносимых сопротивлений (потери не учитываем и: $Q = R_{aa} / R_{вн}$), то коэффициент трансформации напряжений будет

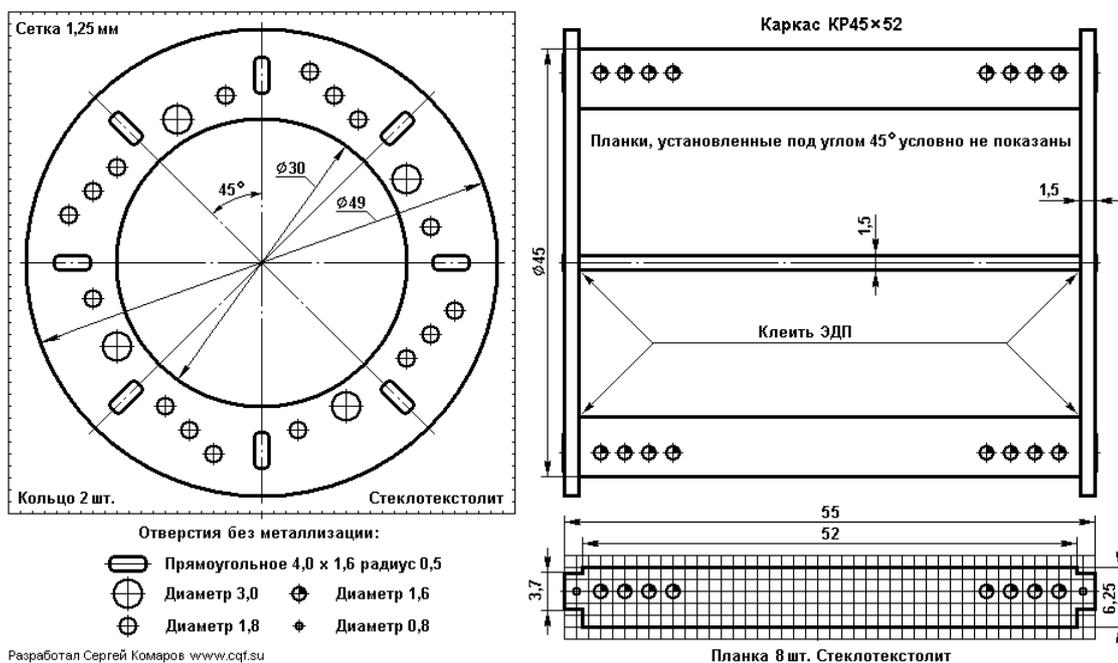
$$N = \sqrt{K_{кр}} = \sqrt{0,1} = 0,316$$

Стало быть, число витков в катушке связи L_2 должно быть: $n_2 = n_1 N = 28 \times 0,316 = 9$ вит.

Такой расчет справедлив при условии, что все силовые линии магнитного поля катушки L_1 пронизывают витки катушки L_2 . Для обеспечения этого, витки катушки L_2 наматываются непосредственно поверх витков катушки L_1 , причем, на каждые полтора витка L_1 приходится один виток L_2 . Если это условие соблюсти сложно, то число витков катушки L_2 надо домножить на число, обратное части силовых линий катушки L_1 , пронизывающих катушку L_2 . В нашем случае подробный расчет [11] коэффициента взаимной индукции составляет 0,94, поэтому число витков катушки L_2 станет 10. Разбивая катушку связи на две, намотанные встречно [12], для обеспечения симметрии колебательного контура, и соединенные параллельно, будем иметь две ветви по 10 витков. Средний вывод ветвей катушки будет выходом на второй контур (точка В), а крайние будут заземлены (Рис. 4). В этом случае емкостная связь между катушками станет минимальной. Импеданс в точке соединения контуров В составит: $R_{1-2} = R_{aa} K_{кр} = 2700 \times 0,1 = 270 \Omega$.

Через катушку L_2 передается мощность 105 Вт при эффективном напряжении 168 вольт и токе 0,624 А. Через каждую ветвь течет ток 0,312 А. Ток небольшой, поэтому в качестве провода катушки L_2 возьмем не литцендрат, а МС-0,2 с посеребренными жилами и литой фторопластовой изоляцией. Заодно, прочная изоляция провода обеспечит надежную развязку по постоянному току второго контура и цепи антенны от высокого анодного питающего напряжения. Впрочем, здесь с таким же успехом можно использовать и МГТФ-0,2.

Катушка L_3 . Ток через нее согласно расчету по программе [7] составляет: $I_{L3} = 3,1$ А. По аналогии с катушкой L_1 намотку выполним литцендратом ЛЭШО 49 x 0,1, но уже перевитым втрое. Площадь сечения провода составит $0,385 \times 3 = 1,155 \text{ мм}^2$ и плотность тока в проводе катушки: $3,1 / 1,155 = 2,68 \text{ А/мм}^2$. Шаг плотной намотки таким тройным проводом будет 2,37 мм. Используем каркас КР45x52 (Рис. 8) с ребрами, установленными под диаметр намотки 47 мм.



При длине намотки 44 мм число витков катушки составит:

$$n_3 = \sqrt{[(l/D + 0,44) \times L_3 / (0,01 \times D)]} = \sqrt{[(4,4/4,7 + 0,44) \times 11,1 / (0,01 \times 4,7)]} = 18 \text{ вит.}$$

Шаг намотки: $h = l / n_1 = 44 / 18 = 2,44$ мм. Провод помещается. Однако, при плотной намотке шаг будет 2,37 мм и длина намотки – 42,7 мм. Индуктивность составит 11,3 мкГ. Длина каркаса 52 мм дает большой запас для увеличения числа витков при подгонке точного значения индуктивности катушки.

Длина провода: $\pi n D = \pi 18 \times 4,85 = 2,75$ м, плюс длина 2 x 50 мм на заделку выводов. Но поскольку ЛЭШО 49 x 0,1 сложен втрое, то его потребуется $2,85 \times 3 = 8,55$ м.

Емкостной делитель напряжения.

В эквивалентной схеме второго контура П-типа (Рис. 6) емкостной делитель напряжения это выходная емкость $C_2 = 1850$ пФ. Реактивное сопротивление $X_2 = 56,15 \Omega$ на средней частоте 1532 кГц; Реактивная мощность: $N_{C_2} = 533$ ВАр.

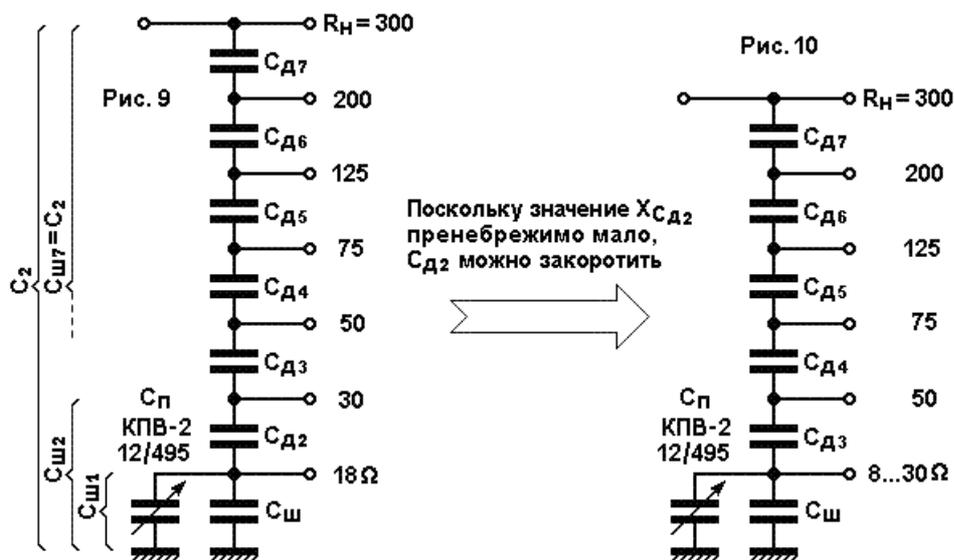
Выходное эффективное напряжение на сопротивлении $R_H = 300 \Omega$ при мощности $P_H = 100$ Вт составит: $U_H^{300} = \sqrt{(P_H \times R_H)} = \sqrt{(100 \times 300)} = 173,2$ В.

Ток через емкостной делитель составит: $I_{C_2} = U_H^{300} / X_2 = 173,2 / 56,15 = 3,1$ А.

Задавшись максимальным рассогласованием по активному сопротивлению в пределах 1,5 ... 1,66 можно построить следующий ряд сопротивлений нагрузки передатчика: 18, 30, 50, 75, 125, 200, 300. Подстройку в рабочем диапазоне частот нам обеспечит дополнительный переменный конденсатор $C_{\text{п}}$ (Рис. 9).

При переключении нагрузочных сопротивлений делителя реактивный емкостной ток $I_{C_2} = 3,1$ А и активный ток нагрузки (как будто на 300-омном эквиваленте $I_H = 0,577$ А) не должны изменяться. Полный ток делителя имеет емкостную и активную составляющие и его модуль составит: $I_d = \sqrt{(I_{C_2}^2 + I_H^2)} = \sqrt{(3,1^2 + 0,577^2)} = 3,15$ А.

При работе на нагрузку 200 Ω и меньше, этот ток протекает через «верхний» конденсатор делителя $C_{\text{д}}$ и далее делится на активный ток I_H переключаемого сопротивления нагрузки и ток $I_{C_{\text{ш}}}$ шунтирующей емкости $C_{\text{ш}}$ «нижнего» конденсатора делителя. Поскольку, модуль тока I_d представляет собой «гипотенузу», а токи I_H и $I_{C_{\text{ш}}}$ – «катеты» прямоугольного треугольника на векторной диаграмме, то зная ток нагрузки I_H (через выходную мощность) и заданные сопротивления нагрузки можно определить напряжения и далее значения емкостей делителя.



Составим таблицу расчетных значений при выходной мощности $P_1 = 100$ Вт и $I_d = 3,15$ А. Нулевой строчкой запишем минимально возможное сопротивление нагрузки, на котором можно получить выходную мощность 100 Вт при ее последовательном включении непосредственно в контур к выводу 18 Ω , отсоединив шунтирующий конденсатор $C_{\text{ш}}$. Здесь наблюдается интересный эффект. Если конденсатор $C_{\text{ш}}$ не отключать, а подключить к нижнему выводу емкостного делителя нагрузочное сопротивление меньше 18 Ω , то при его уменьшении выходная мощность остается почти без изменения до тех пор, пока требуемый ток нагрузки для обеспечения номинальной мощности не станет равным I_d . Это происходит за счет двух противодействующих факторов: уменьшения R_H и, напротив, уменьшения потерь в контуре, возрастания нагруженной добротности, что в свою очередь приводит к увеличению контурного тока и, соответственно, тока

через нагрузку. Но поскольку контурный ток протекает через катушку L_3 , сечение ее провода должно выдерживать такое увеличение. Сечение литцендрата $1,155 \text{ мм}^2$ при плотности тока $3,18 \text{ А/мм}^2$ обеспечит ток $3,673 \text{ А}$. Этот ток обеспечит выходную мощность 100 Вт на нагрузке $7,5 \text{ }\Omega$. Таким образом, емкостной делитель, рассчитанный на минимальное сопротивление нагрузки $18 \text{ }\Omega$, может обеспечить трансформацию сопротивлений до $8 \text{ }\Omega$. Такой режим можно использовать при работе на случайные короткие антенны (во время радиовещательной экспедиции, автопробега или на выставках), что ценно. Аналогичное свойство делителя, правда в меньшей степени, проявляется и на других выходах. Можно считать, что данная дискретно переключаемая цепь обеспечивает, плавное согласование с нагрузкой при изменении ее сопротивления от 8 до $300 \text{ }\Omega$. Этот же эффект позволяет не выдерживать с высокой точностью номиналы конденсаторов C_d .

Таблица 1. Расчет емкостного делителя напряжения (Рис 9 и 10).

№	R_n, Ω	$U_n, \text{ В}$	$I_n, \text{ А}$	$I_{сш}, \text{ А}$	$X_{сш}, \Omega$	$X_{сд}, \Omega$	$X_{сд}'$	$C_d, \text{ пФ}$	$N, \text{ ВАР}$	Номинал	КСО
0	10,1	31,75	3,15	-	-	-	-	-	-	-	
1	18	42,43	2,357	2,090	20,30	20,3 + 0,97		$C_{ш} = 4884$	211	1100 x 4	8
2	30	54,77	1,826	2,567	21,34	1,04	0	-	-	-	
3	50	70,71	1,414	2,815	25,12	3,78	3,85	26984	38	27000	8
4	75	86,6	1,155	2,931	29,55	4,43	4,43	23451	44	24000	8
5	125	111,8	0,894	3,020	37,01	7,46	7,46	13926	74	6800 x 2	8
6	200	141,4	0,707	3,070	46,06	9,05	9,05	11479	90	5600 x 2	8
7	300	173,2	0,577	3,097	55,93	9,87	9,87	10526	98	5100 x 2	8

Где: R_n – заданный ряд сопротивлений антенны; $U_n = \sqrt{P_1 \times R_n}$; $I_n = U_n / R_n$;

$I_{сш} = \sqrt{I_d^2 - I_n^2}$; $X_{сш} = U_n / I_{сш}$; $X_{сд} = X_{сш}^n - X_{сш}^{n-1}$; $C_d = 531 \times \lambda_{ср} / X_{сд}$;

$N = I_d^2 \times X_{сд}$. **Номинал** – выбранный номинал конденсатора. **КСО-8** – тип конденсатора.

Получившееся при расчете значение $X_{сд2} = 1,04 \text{ }\Omega$ наглядно подтверждает описанный выше эффект. Учитывая его малое значение, этот конденсатор можно смело заменить КЗ перемычкой и, соответственно, в окончательной схеме подключение нагрузки $30 \text{ }\Omega$, $18 \text{ }\Omega$ и менее будет производиться на один и тот же вывод емкостного делителя. А сопротивление $1,04 \text{ }\Omega$ раскидаем на два соседних конденсатора приблизительно пропорционально их сопротивлениям и так, чтобы в делителе напряжения получились бы удобные для реализации номиналы емкостей конденсаторов:

$X_{сш1} = 20,3 + 0,097 = 21,27 \text{ }\Omega$ и $X_{сд3} = 3,78 + 0,07 = 3,85 \text{ }\Omega$. Схема стала проще (Рис. 10). К тому же, чтобы не насиловать переключатель большими токами антенны, нижний антенный вывод емкостного делителя рационально вывести на отдельную клемму, предназначенную для подключения низкоомных антенн (Рис. 12).

Конденсаторы $C_{ш} + C_{п}$. Их емкость влияет на работу всего делителя. Эти конденсаторы совместно с первым конденсатором П-контура настраивает его в резонанс. Поэтому $C_{п}$ надо перестраивать относительно средней частоты синхронно с первой секцией, перестраивающей первый конденсатор П-контура, то есть на $\pm 12,74\%$. При номинале 4884 пФ двойная перестройка составит: $\Delta C = 4884 \times 2 \times 0,1274 = 1245 \text{ пФ}$. Это может быть реализовано с помощью второй, третьей и четвертой секций КПВ-4-12/495 пФ, соединенных параллельно. Максимальная перестройка трех секций составляет $3(495 - 12) = 1449 \text{ пФ}$, что больше, чем требуемые 1270 пФ . Поэтому последовательно с каждой секцией необходимо включить растягивающий конденсатор с емкостью $1449 \times 1245 / (1449 - 1245) = 2948 \text{ пФ}$. Выберем КСО-5-500-Г-3000 $\pm 5\%$

Поскольку средняя емкость трех секций КПВ-4 с растягивающими конденсаторами составляет 655 пФ , то номинал добавочного конденсатора должен быть $4884 - 655 = 4229 \text{ пФ}$. Его набираем из четырех параллельно соединенных КСО-8-Г-2500-1000 пФ $\pm 5\%$ с общей мощностью 200 ВАР , плюс подборный конденсатор КСО-6-Г-1000-220 пФ $\pm 5\%$ с мощностью 25 ВАР .

Сопряжение зависимости перестройки емкостей по диапазону здесь не требуется, поскольку она будет лишь незначительно влиять на изменение трансформации сопротивлений, что, как показали расчеты для П-контура с емкостным делителем на выходе, в точности не нуждается.

Расчет зазора в разряднике и резистора утечки статических зарядов.

Поскольку ВКС работает на протяженную проволочную антенную систему, подверженную как наводкам статического электричества, так и импульсам, возникающим при грозовых разрядах, необходима защита от перенапряжений. Эту задачу на выходе ВКС выполняет искровой

разрядник $Ир_1$. В простейшем случае он представляет собой два скрещенных толстых проводника. В домашних условиях можно использовать автомобильную свечу зажигания с установленным расчетным зазором или, для надежной защиты транзисторных передатчиков, – сложную многоискровую конструкцию [13].

Напряжение пробоя разрядника должно быть больше, чем максимальное ВЧ напряжение на выходе передатчика, но меньше, чем рабочее напряжение конденсаторов емкостного делителя, т. е. 500 вольт. Но поскольку работа передатчика Индивидуального радиовещания во время грозы случается не часто (себе дороже), а у конденсаторов КСО испытательное напряжение в 2 раза больше рабочего, то напряжение пробоя разрядника может иметь разброс от 500 до 1000 вольт (лучше – меньше).

Считая электрическую прочность воздуха 3000 В/мм, можно определить ширину зазора:
 $s_{min} = 500 / 3000 = 0,167$ мм; $s_{max} = 1000 / 3000 = 0,333$ мм. Толщина 2-х листов писчей бумаги.

Резистор утечки R_1 Для стекания статических зарядов с коротких антенн в землю следует шунтировать выход A_3 резистором большого сопротивления и мощностью не менее 2 Вт, на котором не теряется сколько-нибудь значительная мощность передатчика. Его номинал можно выбирать достаточно свободно, однако при случайном замыкании антенны на электросеть 220 вольт, резистор не должен сгореть. Поэтому, сопротивление $R_ш$ должно быть не менее 47 к Ω .

Расчет конструкции анодного дросселя Dp_1 и емкости блокировочного конденсатора C_1 .

Дроссель Dp_1 в данной схеме служит для автосимметрирования колебательного контура. Поскольку при сборке передатчика весьма сложно сделать монтаж двухтактного выходного каскада и его колебательной системы идеально симметричными, то точка нулевого потенциала в катушке L_1 может быть смещена относительно геометрического центра. Чтобы блокировочный конденсатор C_1 не шунтировал бы ВЧ ток несимметрии контура, между ним и центральным отводом катушки устанавливают дроссель. Положив для наихудшего случая максимальную несимметрию одного плеча относительно другого в 15% (с учетом разброса параметров ламп и монтажа), будем считать, что эквивалентное сопротивление несимметрии в средней точке составит: $R_{нс} = 0,15 R_{aa} = 0,15 \times 2700 = 405 \Omega$.

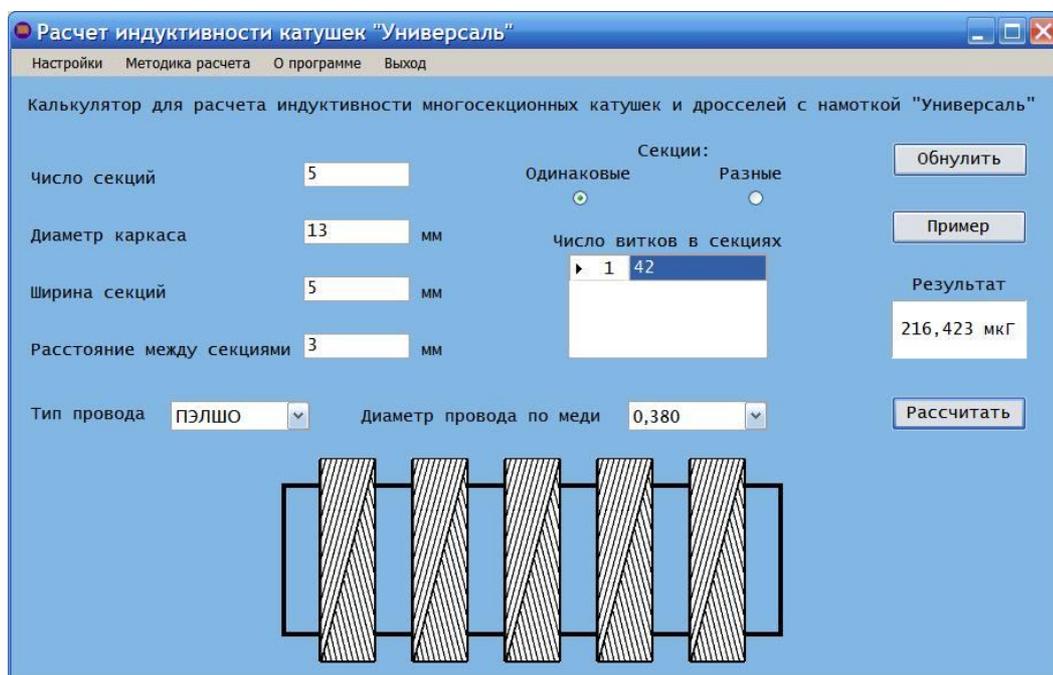
Взяв превышение $k = 5$ для мощности 100 Вт [14], $X_{др} = k R_{нс} = 5 \times 405 = 2025 \Omega$.

На средней частоте диапазона индуктивность дросселя составит:

$$L_{др} = X_{др} / (2 \pi f_{ср}) = 2025 / (2 \pi 1,532) = 210 \text{ мкГ.}$$

Ток, протекающий через дроссель, складывается из тока несимметрии и удвоенной постоянной составляющей анодного тока каждого плеча: $I_{др} = \sqrt{(I_{нс}^2 + 4 I_{a0}^2)}$. Поскольку ток $I_{нс}$ мал по сравнению с I_{a0} , то им пренебрегаем и считаем, что $I_{др} = 2 I_{a0} = 2 \times 0,186 = 0,372$ А. Мотаем дроссель проводом ПЭЛШО диаметром: $d = 0,02 \sqrt{I_{др}} = 0,02 \times \sqrt{372} = 0,38$ мм.

Для намотки дросселя используем каркас ВЧД13х50 [15]. Мотаем «Универсалью» пять одинаковых секций шириной 5 мм с расстоянием между секциями 3 мм.



Подбором на программном калькуляторе Inductors [16] определяем число витков в каждой секции $n_1 = 42$ витка (Рис. 11). Скачать Inductors можно тут: <http://www.cqf.su/technics/Setup.msi>

Блокировочный конденсатор C_1 . Образует вместе с дросселем фильтр нижних частот для ВЧ сигнала. При этом он не должен шунтировать верхние модулирующие частоты при АЭМ.

По Таблице 4, столбец 9, для случая работы четырех ламп 6П37Н-В [17] определяем максимальное значение шунтирующего конденсатора $C_{б8} = 8293$ пФ. Поскольку у нас схема двухтактная с индуктивной связью и разделительного конденсатора нет, то для определения значения емкости блокировочного конденсатора необходимо вычесть из этого значения сумму емкостей всех конденсаторов первого контура. Тогда $C_{бmax} = C_{б8} - C_k = 8293 - 2 \times 770 = 6753$ пФ. Применим конденсатор КСО-8-Г-1000 В-6800 пФ $\pm 10\%$.

Окончательная схема ВКС будет иметь вид (Рис. 12):

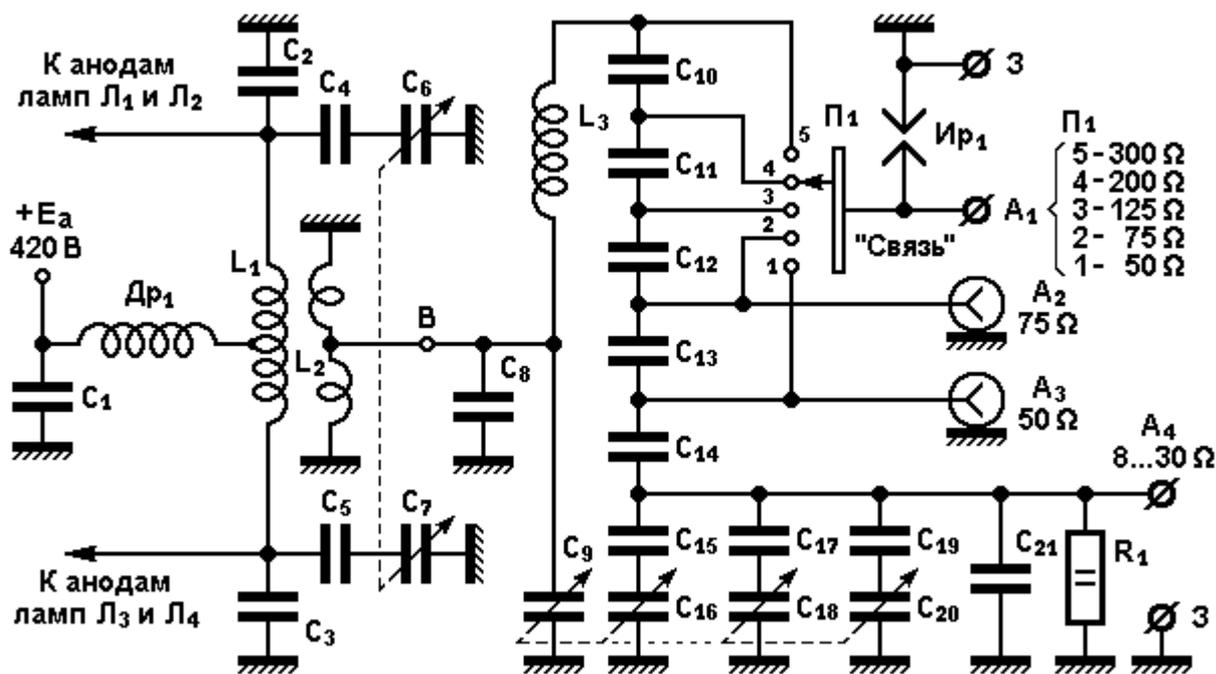


Таблица 2. Спецификация к схеме (Рис. 12).

Поз.	Номинал	Наименование, тип	Кол.	Примечание
R1	47 кΩ	Резистор МЛТ-2-47 кΩ $\pm 5\%$	1	
Конденсаторы				
C1	6750 пФ	КСО-8-1600-Г-6800 пФ $\pm 10\%$.	1	
C2, C3	560 пФ	К15-У2-560 пФ $\pm 10\%$ -2 кВАр-2кВ-М1500	2	
C4	1360 пФ	КТ-2-500 В-М700-680 пФ $\pm 5\%$	2	Параллельно
C5	1360 пФ	КТ-2-500 В-М700-680 пФ $\pm 5\%$	2	Параллельно
C6, C7	2x12/495 пФ	КПВ-2-12/495 пФ	1	
C8	1632 пФ	КТ-3-750 В-М700-470 пФ $\pm 5\%$ КТ-3-500 В-М750-220 пФ $\pm 5\%$ * 130...300	3 1	Параллельно, * подбор
C9, C16, C18, C20	4x12/495 пФ	КПВ-4-12/495 пФ	1	Замена на два КПВ-2-12/495
C10	10500 пФ	КСО-8-1600-Г-5100 пФ $\pm 5\%$	2	Параллельно
C11	11500 пФ	КСО-8-1600-Г-5600 пФ $\pm 5\%$	2	Параллельно
C12	13900 пФ	КСО-8-1600-Г-6800 пФ $\pm 5\%$	2	Параллельно
C13	23500 пФ	КСО-8-500-Г-24000 пФ $\pm 5\%$	1	
C14	27000 пФ	КСО-8-500-Г-27000 пФ $\pm 5\%$	1	
C15, C17, C19	2950 пФ	КСО-5-500-Г-3000 пФ $\pm 5\%$	3	
C21	4141 пФ	КСО-8-2500-Г-1000 пФ $\pm 5\%$ КСО-6-1000-Г-150 пФ $\pm 5\%$ * от 0 до 470 пФ	4 1	Параллельно * подбор
Намоточные изделия				
L1	28 мкГ	27 витков 2 x ЛЭШО 49 x 0,1 каркас КР55x67	1	Виток к витку
L2	-	2 x 9 витков МС-0,2 в две секции, поверх L1, мотать зеркально, от центра в разные стороны.	1	Шаг намотки 3 мм
L3	11,1 мкГ	18 витков 3 x ЛЭШО 49 x 0,1 каркас КР45x52	1	Виток к витку
Др1	210 мкГ	5 x 42 витка, ПЭЛШО 0,38, ширина секций по 5 мм, на расстоянии 3 мм, каркас ВЧД13x50	1	«Универсаль»

При использовании этой схемы в передатчиках, которые будут работать на полноразмерные антенны, с высотой, до оптимальных $0,53\lambda$ (110 метров), следует рассчитать П-контур на сопротивление нагрузки 450Ω , добавить в емкостной делитель – еще конденсатор (как на Рис. 9), и в переключатель Π_1 – шестое положение. При этом амплитуда ВЧ напряжения на выходе A_1 (Π_1 в положении б) в режиме несущей составит 300 вольт, а на пиках модуляции будет подниматься до 600, и это надо будет учитывать при выборе типов конденсаторов и при расчете зазора в защитном разряднике.

Поскольку наша промышленность перестала выпускать даже конденсаторы К31У-3Е-5Г и так и не освоила выпуск К31У-3Е-8Г, К31У-3Е-11Г, К31У-3Е-12Г и К31У-3Е-13Г, то радиолюбителям придется искать по кладовкам еще не уничтоженных мощных КВ-СВ передающих радиочастотных и запасливых снабженцев предприятий (не сдавших советские радиодетали на цветметаллы) старые и добрые КСО-8, КСО-11, КСО-12 и КСО-13. При уровнях мощности передатчиков более 100 Вт придется использовать К15-У2 (вариант «Г») и весьма крупногабаритные «блинчики» К15-У1. Но, увы, новые конденсаторы К15 имеют точность $\pm 10\%$ и даже $\pm 20\%$. Пятипроцентная точность старых КСО-шек им и не снилась. К сожалению, «новое», в наше время, не означает, «хорошее».

Литература:

1. **С. Комаров, А. Тертышников.** Разработка и исследование многофазных синтезаторов радиочастот с мощным выходом, «Т-Сотт – Телекоммуникации и транспорт» № 9, 2013, стр. 97 – 99.
2. **С. Комаров, А. Морозова.** Исследование усилителя мощности радиочастотных колебаний с многофазным возбуждением, «Т-Сотт – Телекоммуникации и транспорт» Том 8, № 10-2014, стр. 33 – 38.
3. **Б. С. Агафонов.** Теория и расчёт радиотелефонных режимов генераторных ламп. – Москва, «Советское радио», 1955;
4. **С. Комаров.** Параллельный анодно-экранный модулятор. Радио 2015 № 4, стр. 30 – 33.
5. **Б. В. Кацнельсон, А. С. Ларионов.** Отечественные приемно-усилительные лампы и их зарубежные аналоги (справочник) Изд. Второе. «Энергия», Москва 1974.
6. **К. Ротхаммель.** Антенны. МРБ выпуск № 637. «Энергия», Москва 1967 г.
7. **И. Гончаренко, DL2KQ.** Расчет П-контур.
8. **Гинкин Г. Г.** Справочник по радиотехнике (издание четвертое, переработанное). Государственное энергетическое издательство. Москва – Ленинград 1948 г.
9. **С. Комаров.** Самодельные ребристые каркасы для катушек передатчика. - Радио, 2015, № 5, с. 33.
10. **В. И. Сифоров.** Усилители высокой частоты. Государственное издательство оборонной промышленности. Москва-Ленинград 1939.
11. **Справочник по радиотехнике.** Под ред. инженера Б. А. Смиренина. Госэнергоиздат 1950.
12. **Д. Стародуб.** Симметрирование выходного каскада передатчика. «Радио» 1959, № 1, с. 32.
13. **С. Комаров.** Защитный разрядник на выходе маломощного средневолнового радиовещательного АМ передатчика.
14. **С. Комаров.** Анодный дроссель выходного каскада маломощного радиовещательного АМ передатчика.
15. **С. Комаров.** Каркасы для анодных дросселей маломощных радиопередатчиков диапазона длинных и средних волн под намотку «Универсаль».
16. **Д. Харб.** Расчет индуктивности многосекционных катушек и дросселей.
17. **С. Комаров.** О блокировочном и разделительном конденсаторах в анодной цепи радиопередатчика с АЭМ.