

Проектирование и расчет ВКС двухфазного выходного каскада передатчика диапазона 200 м (1449 – 1620 кГц) для мощности 50 Вт.

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

Сергей Комаров

При использовании в качестве возбудителя синтезатора С9-1449-1800 [1] (или аналогичного С9-1449-1800-2), специально разработанного для ламповых выходных каскадов, работающих в инверсном режиме класса F [2] и имеющего фиксированную скважность выходных импульсов на каждом выходе половинной частоты равную 5, а также учитывая неидеальные фронты импульсов анодного тока радиоламп 6П37Н-В, имеющие длительность 20 – 25 нс, коэффициенты разложения «плоского» импульса [3] составят: $\alpha_1 = 0,604$; $\alpha_0 = 0,401$. Расчет будет справедлив для ламп 6П44С, а также для режимов В и С при соответствующих значениях α_1 и α_0 .

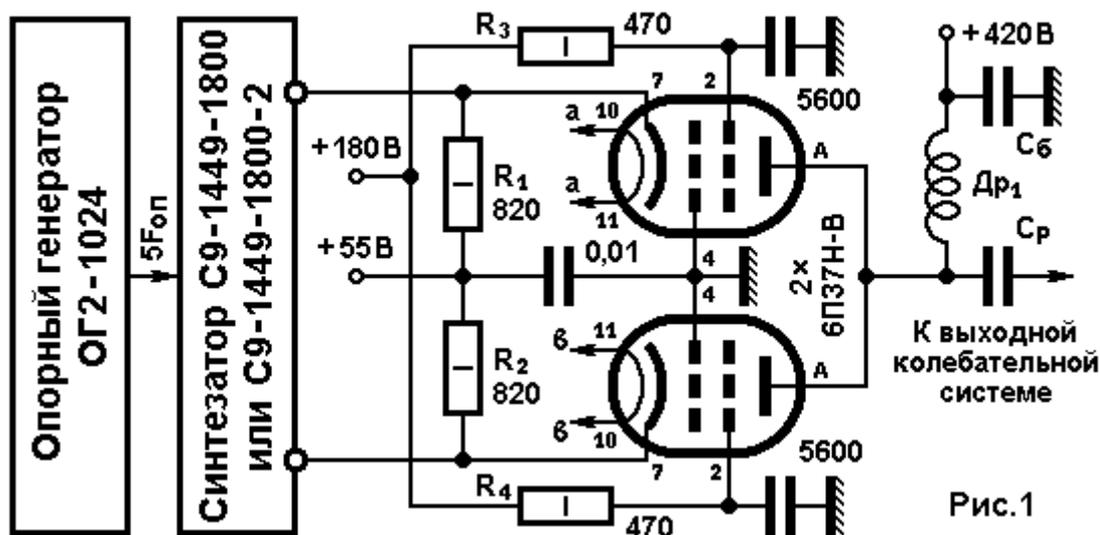


Рис. 1

Проектирование будем вести максимально приближенное к практике и ориентируясь на отечественную элементную базу, как самую доступную, самую надежную и недорогую.

Энергетический расчет. При использовании двух питающих трансформаторов ТАН27-220-50 и ТА90-220-50 напряжение анодных 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 0,235 А, ток анодной цепи после выпрямителя не должен превышать $0,235 / 1,24 = 0,19$ А. После анодных дросселей: фильтра выпрямителя Д258В (2,4 генри при максимальном токе 0,28 А с $R_{др} = 58,4 \Omega$), и модуляционного Д267В (4,8 генри при допустимом токе 0,28 А с $R_{др} = 80,4 \Omega$) [4] напряжение на анодах ламп составит: $446,4 - (58,4 + 80,4) \times 0,19 = 420$ вольт.

Падение напряжения на открытой радиолампе при максимальном импульсе анодного тока можно определить по характеристикам [5] – около 40 вольт. Тогда амплитуда синусоидального напряжения на аноде лампы: $U_{a1} = E_a - e_{amin} = 420 - 40 = 380$ В.

Поскольку выходной каскад работает в импульсном режиме, для получения чистого спектра сигнала на выходе передатчика применим двойной П-контур. Он имеет лучшую фильтрацию, чем одиночный, и более высокий КПД. Положив КПД выходной колебательной системы около 92%, мощность отдаваемая лампами выходного каскада должна быть: $P_1 = 50 / 0,92 = 54,4$ Вт.

Амплитуда тока первой гармоники: $I_{a1} = 2 \times P_1 / U_{a1} = 2 \times 54,4 / 380 = 0,286$ А;

Амплитуда импульса анодного тока: $i_{amax} = I_{a1} / \alpha_1 = 0,286 / 0,604 = 0,474$ А;

Постоянная составляющая тока анода: $I_{a0} = i_{amax} \times \alpha_0 = 0,474 \times 0,401 = 0,19$ А.

Таким образом, подобранные трансформаторы обеспечивают питание выходного каскада.

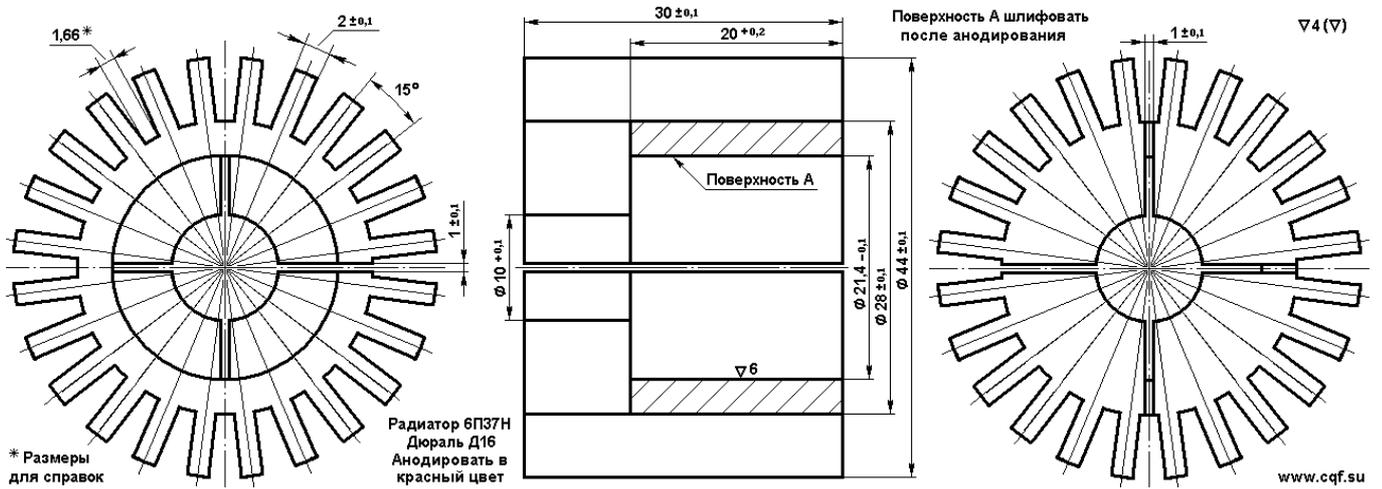
Мощность, потребляемая по анодной цепи: $P_0 = 446,4 \times 0,19 = 84,8$ Вт.

Мощность, рассеиваемая на дросселях: $P_{др} = (58,4 + 80,4) \times 0,19^2 = 5$ Вт.

Мощность, рассеиваемая на анодах ламп, составит: $P_a = P_0 - P_1 - P_{др} = 84,8 - 54,4 - 5 = 25,4$ Вт.

Поскольку ламп 2, мощность на аноде каждой: $P_{a1} = P_a / 2 = 25,4 / 2 = 12,7$. ($P_{amax} = 15$ Вт)

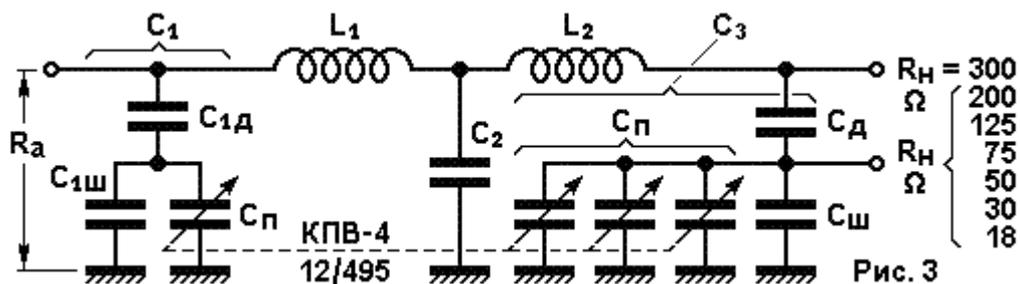
Передатчик радиовещательный, и будет непрерывно работать длительное время, поэтому снабдим аноды ламп радиаторами для снижения температуры баллона и увеличения их ресурса (Рис. 2).



Сопротивление анодной нагрузки в граничном режиме: $R_{aгр} = U_{a1} / I_{a1} = 380 / 0,286 = 1329 \Omega$.

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: $R_{aa} = R_{aгр} \times 1,025 = 1329 \times 1,025 = 1360 \Omega$.

Расчет двойного П-контура (Рис. 3). Сначала надо определиться с сопротивлением нагрузки R_H . Из практики известно [6], что сопротивления излучения проволочных антенн редко превышает 300Ω . Будем считать колебательную систему на $R_H = 300 \Omega$, а остальные значения получим с переключаемого емкостного делителя на выходе второго П-контура.



По методике расчета двойного П-контура [7], определяем реактивные сопротивления его элементов. Для этого необходимо задаться нагруженной добротностью колебательных контуров. Это компромисс между КПД и степенью фильтрации. Чем ниже нагруженная добротность (чем меньше доля собственных потерь в контуре по отношению к сопротивлению нагрузки), тем выше КПД контура. Поскольку двойной П-контур имеет гораздо большую фильтрацию, чем одиночный П-контур, часто используемый в аппаратуре связи (каскадное соединение двух фильтрующих контуров), то здесь можно большее внимание уделить КПД, выбрав значение нагруженной добротности раза в два меньше, чем для одиночного П-контура, например, в пределах 7 ... 10.

Поскольку мощность передатчика не велика, пусть $Q = 8$. Тогда:

Среднее геометрическое между входным и выходным сопротивлениями:

- $R_{cp} = \sqrt{(R_a \times R_H)} = \sqrt{(1360 \times 300)} = 638,7 \Omega$;

Реактивное сопротивление конденсатора C_1 :

- $X_1 = (R_a \times Q + R_{cp}) / (Q^2 - 1) = (1360 \times 8 + 638,7) / (8^2 - 1) = 182,8 \Omega$;

Реактивное сопротивление конденсатора C_3 :

- $X_3 = (R_H \times Q + R_{cp}) / (Q^2 - 1) = (300 \times 8 + 638,7) / 63 = 48,23 \Omega$;

Реактивное сопротивление конденсатора C_2 :

- $X_2 = X_1 \times X_3 / R_{cp} = 182,8 \times 48,23 / 638,7 = 13,8 \Omega$;

Реактивное сопротивление катушки L_1 :

- $X_{L1} = X_1 + X_2 = 182,8 + 13,8 = 196,6 \Omega$;

Реактивное сопротивление катушки L_2 :

- $X_{L2} = X_2 + X_3 = 13,8 + 48,23 = 62,03 \Omega$;

Средняя частота 200-метрового диапазона $f_{cp} = \sqrt{(f_H \times f_B)} = \sqrt{(1449 \times 1620)} = 1532 \text{ КГц}$.

Соответственно, длина волны: $\lambda_{cp} = 300000 / 1532 = 195,8 \text{ м}$.

Теперь можно посчитать номиналы элементов:

$C_1 = 530,6 \times \lambda_{cp} / X_1 = 530,6 \times 195,8 / 182,8 = 568 \text{ пФ}$, При изменении частоты (поскольку индуктивности мы менять не будем) ее надо подстраивать в $(f_b / f_{cp})^2 = (1620 / 1532)^2 = 1,118$ раза или на 11,8% в каждую сторону. Таким образом, диапазон перестройки емкости C_1 составит: от $568 \times (1 - 0,118) = 500 \text{ пФ}$ до $568 \times 1,118 = 635 \text{ пФ}$.

$$C_2 = 530,6 \times \lambda_{cp} / X_2 = 530,6 \times 195,8 / 13,8 = 7528 \text{ пФ};$$

$$C_3 = 530,6 \times \lambda_{cp} / X_3 = 530,6 \times 195,8 / 48,23 = 2154 \text{ пФ};$$

$$L_1 = X_{L1} / (2 \times \pi \times f_{cp}) = 196,6 / (2 \times \pi \times 1,532) = 20,4 \text{ мкГ};$$

$$L_2 = X_{L2} / (2 \times \pi \times f_{cp}) = 62,03 / (2 \times \pi \times 1,532) = 6,4 \text{ мкГ}.$$

Диапазон перестройки емкости одной секции ($495 - 12 = 483 \text{ пФ}$) используемого в конструкции переменного конденсатора $C_{п} - \text{КПВ-2-12/495}$ больше, чем требуется для C_1 . Для растяжки настройки на весь диапазон поворота оси, уменьшим его диапазон перестройки, включив два растягивающих конденсатора: один параллельно $C_{1ш}$ и второй последовательно с ними $C_{1д}$. Таким образом, при минимальной емкости $C_{п} = 12 \text{ пФ}$ общая емкость должна составить 500 пФ, а при максимальной - 495 пФ, - соответственно, 635 пФ. Однако из обеих этих емкостей необходимо вычесть емкость монтажа, хотя бы 10 пФ. Из схемы параллельно-последовательного соединения конденсаторов составим систему уравнений:

$$(C_{1ш} + 12) \times C_{1д} / (C_{1ш} + C_{1д} + 12) = 490$$

$$(C_{1ш} + 495) \times C_{1д} / (C_{1ш} + C_{1д} + 495) = 625$$

После несложных алгебраических преобразований получим: $C_{1ш} = 821 \text{ пФ}$; $C_{1д} = 1191 \text{ пФ}$.

Для конструктивного расчета и выбора элементов, надо рассчитать реактивные мощности конденсаторов и токи, протекающие через катушки.

Через конденсатор C_1 протекает ток $I_{c1} = 0,707 \times U_{a1} / X_1 = 0,707 \times 380 / 182,8 = 1,47 \text{ А}$.

Реактивная мощность на C_1 составит: $N_{C1} = 0,707 \times U_{a1} \times I_{c1} = 0,707 \times 380 \times 1,47 = 395 \text{ ВАр}$.

При этом максимальная реактивная мощность будет проходить через $C_{1д}$, когда $C_{п} = 495 \text{ пФ}$.

395 ВАр поделится между $C_{1д} = 1191 \text{ пФ}$ и $(C_{п} + C_{1ш}) = 1316$ обратно пропорционально их емкостям. Таким образом, реактивная мощность конденсатора $C_{1д}$ должна составлять 207 ВАр.

Максимальная реактивная мощность будет проходить через $C_{1ш}$, когда $C_{п} = 12 \text{ пФ}$.

395 ВАр поделится между $C_{1д} = 1191 \text{ пФ}$ и $(C_{п} + C_{1ш}) = 833$ обратно пропорционально их емкостям. Таким образом, реактивная мощность конденсатора $C_{1ш}$ должна составлять 233 ВАр.

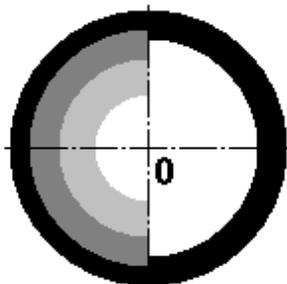
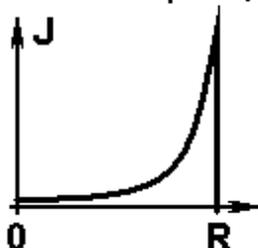
Емкости 821 и 1191 пФ можно набрать из параллельного соединения конденсаторов КТ-2 или КТК (реактивная мощность 50 ВАр) или КТ-3 (реактивная мощность в зависимости от номинала 300 – 600 ВАр). При подборе номиналов следует учитывать, что разброс допустим, не более 5% и увеличение $C_{1ш}$ приводит к уменьшению диапазона перестройки, а увеличение $C_{1д}$ – к его увеличению. Одновременное и пропорциональное уменьшение емкостей в небольших пределах приводит к уменьшению их общей емкости при постоянном диапазоне перестройки.

Расчет катушки L_1 . Входное сопротивление контура, со стороны R_a , при резонансе чисто активно. Это означает, что реактивная часть тока, протекающего через катушку L_1 в точности равна (и противоположна) току I_{c1} . А активная часть тока катушки L_1 равна эффективному значению составляющей первой гармоники анодного тока $I_{a1} = 0,286 \times 0,707 = 0,202 \text{ А}$. И полный ток, протекающий через катушку, составит: $I_{L1} = \sqrt{(I_{a1}^2 + I_{c1}^2)} = \sqrt{(0,202^2 + 1,47^2)} = 1,484 \text{ А}$.

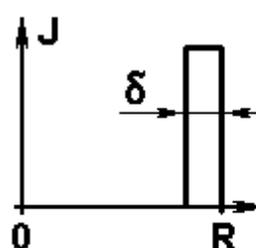
Таким образом, эффективное сечение провода катушки L_1 при рекомендованной для меди плотности тока $j = 3 \text{ А/мм}^2$ составит: $S_1 = I_{L1} / 3 = 1,484 / 3 = 0,5 \text{ мм}^2$.

Поскольку на частотах диапазона средних волн сильно выражен поверхностный эффект (Рис. 4), то реализовать эффективное сечение $0,5 \text{ мм}^2$, максимально близкое к сечению медного провода на постоянном токе, возможно лишь с применением литцендрата.

Плотность ВЧ тока в реальном проводе



Аппроксимация плотности ВЧ тока



Эквивалентная толщина скин-слоя

$$\delta = \frac{66,2}{\sqrt{f}} \quad \text{Для меди}$$

$\delta - \text{мкМ}$ $f - \text{МГц}$

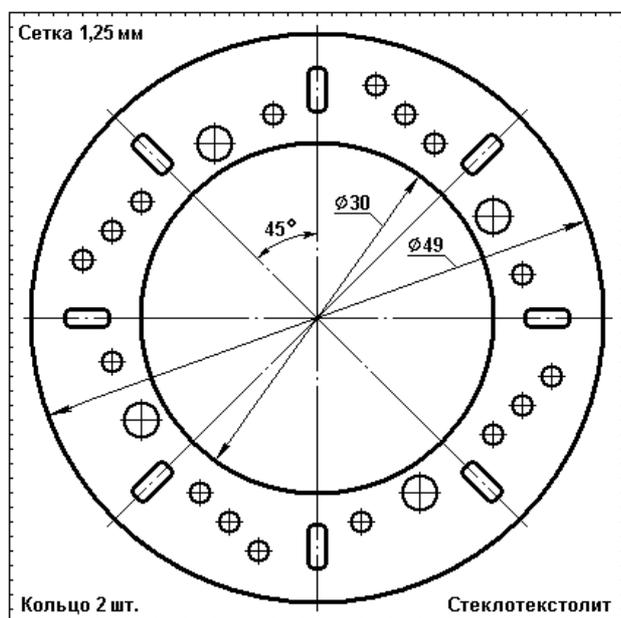
Эффективную толщину скин-слоя для медного проводника можно определить по формуле: $\delta = 66,2 / \sqrt{f}$, где частота f задается в МГц, а толщина скин-слоя δ получается в микронах [8].

Для нашего случая $\delta = 66,2 / \sqrt{1,532} = 53,5 \mu$ 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 28 x 0,1 мм, имеющий сечение по меди 0,22 мм², сложенный и перевитый втрое. В этом случае его сечение по меди составит 0,66 мм², а плотность тока - $1,484 / 0,66 = 2,25 \text{ А/мм}^2$, что еще более уменьшит потери в меди на нагревание провода. Этот запас потребуется для работы катушки на пиках модуляции. Толщина жгутика 3 x ЛЭШО 28 x 0,1 при намотке виток к витку составляет 1,8 мм.

Для каркаса КР45x52 (Рис. 5) [9] при диаметре намотки 45 мм и длине намотки 50 мм число витков составит: $n_1 = \sqrt{[(l/D + 0,44) \times L_1 / (0,01 \times D)]} = \sqrt{[(5/4,5 + 0,44) \times 20,4 / (0,01 \times 4,5)]} = 26,5$ витка. Шаг намотки: $h = l / n_1 = 50 / 26,5 = 1,9 \text{ мм}$. Катушка помещается свободно. При плотной намотке виток к витку шаг составит 1,8 мм, а длина намотки – 48 мм. Индуктивность составит 21 мкГ.

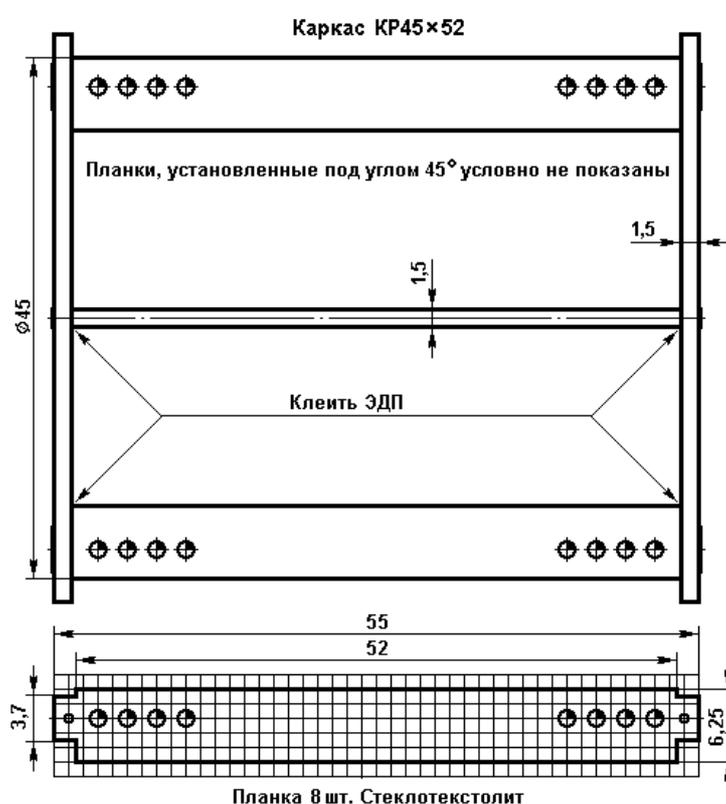
Длина провода: $n \pi D = 26 \pi 4,5 = 3,68 \text{ м}$, плюс длина 2 x 50 мм на заделку выводов. Итого 3,8 метра. Поскольку литцендрат ЛЭШО 28 x 0,1 сложен втрое, то его потребуется 11,4 метра.



Отверстия без металлизации:

- Прямоугольное 4,0 x 1,6 радиус 0,5
- Диаметр 3,0
- Диаметр 1,6
- Диаметр 1,8
- Диаметр 0,8

Разработал Сергей Комаров www.cqf.ru



Расчет катушки L_2 . Выходное эффективное напряжение на сопротивлении $R_n = 300 \Omega$ при мощности $P_n = 50 \text{ Вт}$ составит: $U_n^{300} = \sqrt{P_n \times R_n} = \sqrt{50 \times 300} = 122,5 \text{ В}$.

Ток через конденсатор C_3 составит: $I_{C_3} = U_n^{300} / X_3 = 122,5 / 48,23 = 2,54 \text{ А}$.

Тогда реактивная мощность: $N_{C_3} = U_n^{300} \times I_{C_3} = 122,5 \times 2,54 = 312 \text{ ВАр}$.

Ток нагрузки составит $I_n^{300} = U_n^{300} / R_n = 122,5 / 300 = 0,408 \text{ А}$.

И ток через катушку L_2 : $I_{L_2} = \sqrt{I_{C_3}^2 + I_n^{300}^2} = \sqrt{2,54^2 + 0,408^2} = 2,57 \text{ А}$.

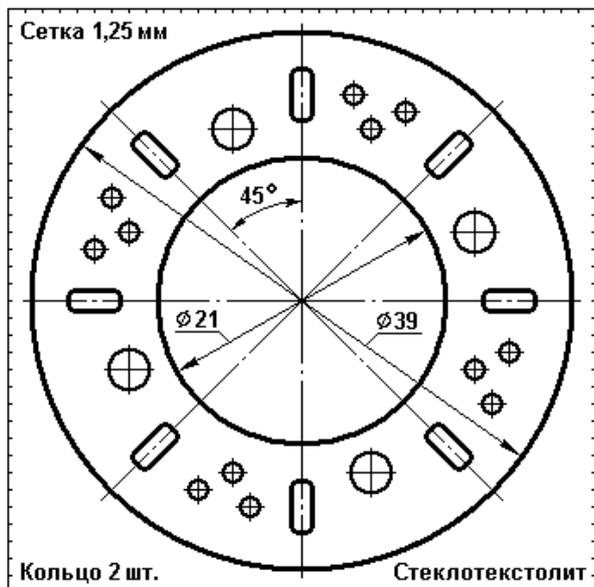
При плотности тока 3 А/мм² сечение провода составит: $S_2 = I_{L_2} / j = 2,57 / 3 = 0,86 \text{ мм}^2$.

Выбираем литцендрат ЛЭШО 49 x 0,1 мм, имеющий сечение 0,385 мм², сложенный и перевитый втрое, с общим сечением 1,155 мм². Тогда плотность тока составит: 2,3 А/мм².

Толщина жгутика 3 x ЛЭШО 49 x 0,1 при намотке виток к витку составляет 2,37 мм.

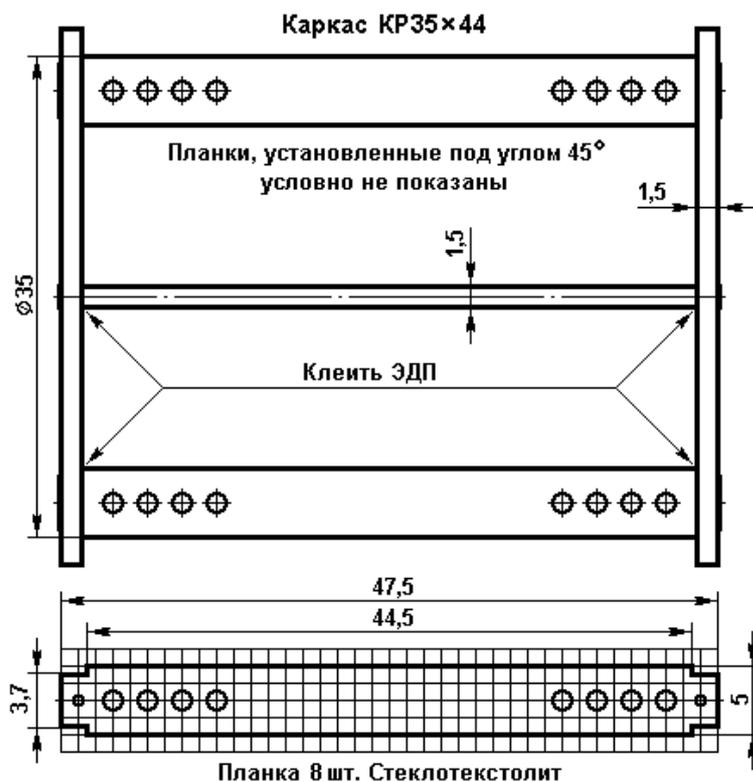
Для каркаса КР35x48 (Рис. 6) при диаметре намотки 35 мм и длине намотки 40 мм число витков составит: $n_1 = \sqrt{[(l/D + 0,44) \times L_1 / (0,01 \times D)]} = \sqrt{[(4/3,5 + 0,44) \times 6,4 / (0,01 \times 3,5)]} = 17$. Шаг намотки: $h = l / n_1 = 40 / 17 = 2,35 \text{ мм}$. Провод мягкий, витки поместятся плотно. Так и оставим.

Длина провода: $n \pi D = 17 \pi 3,5 = 1,87 \text{ м}$, плюс длина 2 x 50 мм на заделку выводов. Итого 1,97 метра. Поскольку литцендрат ЛЭШО 49 x 0,1 сложен втрое, то его потребуется 6 метров.



- Отверстия без металлизации:
- Прямоугольное 4,0 x 1,6 радиус 0,5
 - Диаметр 3,0
 - Диаметр 1,6
 - Диаметр 0,8

Разработал Сергей Комаров www.cqf.su



Конденсатор внутриемкостной связи между контурами. Падение напряжения на C_2 , вызванное контурным током первого контура и запаздывающее на 90 градусов относительно него, является возбуждающей ЭДС для второго контура, и поскольку он настроен в резонанс (источник ЭДС работает на активное сопротивление), ток второго контура находится в фазе с возбуждающей ЭДС. Таким образом, через конденсатор C_2 протекают два контурных тока I_{L1} и I_{L2} , сдвинутые относительно друг друга на 270 градусов: $I_{C2} = \sqrt{(I_{L2}^2 - I_{L1}^2)} = \sqrt{(2,57^2 - 1,484^2)} = 2,1$ А.

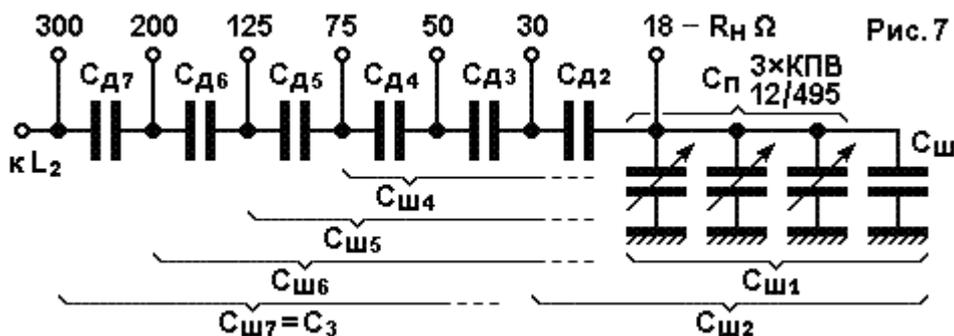
Падение напряжения на C_2 составит: $U_{C2} = I_{C2} \times X_2 = 2,1 \times 13,8 = 29$ В.

Соответственно, реактивная мощность: $N_{C2} = U_{C2} \times I_{C2} = 29 \times 2,1 = 61$ ВАр.

Емкость $C_2 = 7528$ пФ можно набрать из четырех конденсаторов КСО-5 или К31У-3Е-5Г (реактивная мощность 20 ВАр). Возьмем два конденсатора 1800 пФ $\pm 5\%$ и два 2000 пФ $\pm 5\%$ и соединим их параллельно. Неточность составит $(2 \times 1800 + 2 \times 2000) - 7528 = 72$ пФ или 0,96%.

Емкостной делитель напряжения. В эквивалентной схеме второго контура П-типа (Рис. 3) емкостной делитель напряжения это выходная емкость $C_3 = 2154$ пФ. Реактивное сопротивление $X_3 = 48,23 \Omega$ на средней частоте 1532 кГц; Реактивная мощность: $N_{C2} = 312$ ВАр.

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_p (Рис. 5).



При переключении нагрузочных сопротивлений делителя реактивный емкостной ток $I_{C3} = 2,54$ А и активный ток нагрузки (как будто на 300-омном эквиваленте $I_n = 0,408$ А) не должны изменяться. Полный ток делителя имеет емкостную и активную составляющие и равен току через катушку L_2 : $I_{L2} = 2,57$ А.

При работе на нагрузку 200Ω и меньше, этот ток протекает через «верхний» конденсатор делителя C_d (Рис. 3), затем делится на активный ток I_n переключаемого сопротивления нагрузки и ток $I_{сш}$ шунтирующей емкости $C_{ш}$ «нижнего» конденсатора делителя. Поскольку, модуль тока I_d представляет собой «гипотенузу», а токи I_n и $I_{сш}$ – «катеты» прямоугольного треугольника на векторной диаграмме, то зная ток нагрузки I_n (через выходную мощность и сопротивления нагрузки) можно определить напряжения и далее значения емкостей делителя.

Составим таблицу расчетных значений при выходной мощности $P_1 = 50$ Вт и $I_d = 2,57$ А. Нулевой строчкой запишем минимально возможное сопротивление нагрузки, на котором можно получить выходную мощность 50 Вт при ее последовательном включении непосредственно в контур к выводу 18Ω , отсоединив шунтирующий конденсатор $C_{ш}$.

Таблица 1. Расчет емкостного делителя напряжения (Рис 7).

№	R_n, Ω	$U_n, В$	$I_n, А$	$I_{сш}, А$	$X_{сш}, \Omega$	$X_{сд}, \Omega$	$C_d, пФ$	$N, \text{ВАр}$	Номинал	КСО
0	7,5	19,38	2,58	-	-	-	-	-	-	
1	18	30	1,667	1,960	15,31	-	$C_{ш1} = 6786$	102	1000 x 6 + Сп	5
2	30	38,73	1,291	2,225	17,41	2,1	49470	14	0,01 x 5	5
3	50	50	1,0	2,370	21,10	3,69	28154	25	0,01 x 2+8,2т	5
4	75	61,24	0,817	2,439	25,11	4,01	25907	27	8,2т x 3+1,3т	5
5	125	79,06	0,632	2,494	31,70	6,59	15764	44	5,1+5,1+5,6т	5
6	200	100	0,5	2,523	39,64	7,94	13084	53	3,3т x 4	5
7	300	122,5	0,408	2,540	48,23	8,59	12094	57	3т x 4	5

Где: R_n – заданный ряд сопротивлений антенны; $U_n = \sqrt{(P_1 \times R_n)}$; $I_n = U_n / R_n$;
 $I_{сш} = \sqrt{(I_d^2 - I_n^2)}$; $X_{сш} = U_n / I_{сш}$; $X_{сд} = X_{сш}^n - X_{сш}^{n-1}$; $C_d = 530,6 \times \lambda_{ср} / X_{сд}$;
 $N = I_d^2 \times X_{сд}$. Номинал – выбранный номинал конденсатора. КСО-5 – тип конденсатора.

Здесь наблюдается интересный эффект. Если конденсатор $C_{ш}$ не отключать, а подключить к нижнему выводу емкостного делителя нагрузочное сопротивление меньше 18Ω , 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_n должно вызывать уменьшение мощности при постоянном токе, однако, уменьшение R_n вызывает также уменьшения потерь в контуре, возрастание 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. Поскольку с увеличением контурного тока растут потери в катушке. Таким образом, емкостной делитель, рассчитанный на минимальное сопротивление нагрузки 18Ω , может обеспечить трансформацию сопротивлений вплоть до 8Ω .

Такой режим можно использовать при работе на случайные антенны (при проведении эфирных экспериментов, 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 300Ω . Этот же эффект позволяет не выдерживать с высокой точностью номиналы конденсаторов C_d .

Чтобы не насилловать переключатель большими токами антенны, нижний антенный вывод емкостного делителя рационально вывести на отдельную клемму, предназначенную для подключения низкоомных антенн (Рис. 9).

Конденсаторы $C_{ш} + C_{п}$. Их емкость влияет на работу всего делителя. Эти конденсаторы совместно с первым конденсатором П-контра настраивает его в резонанс. Поэтому $C_{п}$ надо перестраивать относительно средней частоты синхронно с первой секцией, перестраивающей первый конденсатор П-контра, то есть на $\pm 1,8\%$. При номинале 6786 пФ двойная перестройка составит: $\Delta C = 6786 \times 2 \times 0,118 = 1602$ пФ. Это может быть реализовано с помощью второй, третьей и четвертой секций КПВ-4-12/495 пФ, соединенных параллельно. Максимальная перестройка трех секций составит $3(495 - 12) = 1449$ пФ, что меньше, чем требуемые 1602 пФ. То есть, на верхней частоте будут лишние 77 пФ, а на нижней 77 пФ будет не хватать. Это составляет $\pm 1,1\%$ от номинала емкости или по частоте настройки $\pm 0,56\%$. Поскольку добротность каждого

контура 8, и полоса составляет $\pm 6,25\%$, то считаем, что этим недопокрытием можно пренебречь. Но в этом случае при наличии реактивности во входном сопротивлении антенны на нижних и верхних частотах диапазона контур не сможет ее компенсировать. Не хорошо.

Существуют, по крайней мере, три выхода из этого затруднительного положения:

- Пересчитать двойной П-контур, задавшись нагруженной добротностью контуров 7,3. При такой добротности емкость $C_{ш1}$ окажется в точности такой, чтобы требуемое перекрытие совпало с имеющимся у трех секций переменного конденсатора. После чего пересчитать обе катушки и емкостной делитель напряжения. Здесь я этого не сделал, чтобы показать итерационный характер расчета при проектировании. Иногда приходится пересчитывать по 2 – 3 раза.

- Применить переменный конденсатор с большим перекрытием, например, 4 x 16/550 пФ. Такие конденсаторы - большая редкость и в продаже их не бывает, однако, существуют фирмы, которые их могут сделать на заказ. Да, и у старых радиолюбителей они могут оказаться в наличии.

- Разбить 4-х секционный конденсатор на два 2-х секционных (с отдельными ручками) и добавить параллельно постоянный конденсатор, который подключается с помощью тумблера на нижних частотах при нехватке емкости. Его номинал должен быть больше, чем недостающая емкость, но не больше, чем перекрытие двух секций вместе взятых: от 154 до 990 пФ. Тогда будет возможна работа двойного П-контра на неточно согласованные антенны. Разумеется, в этом случае емкость конденсатора $C_{ш}$ должна быть меньше.

Третий вариант наиболее оптимальный, его и будем использовать. Пусть подключаемый конденсатор будет иметь номинал 680 пФ.

Средняя емкость трех секций стандартного КПВ-4 составляет $495 \times 3 / 2 = 743$ пФ, и номинал добавочного конденсатора должен быть $6786 - 743 - 680/2 = 5703$ пФ. Его можно набрать из шести параллельно соединенных конденсаторов. Четыре КСО-5-Г-500-1000 пФ $\pm 5\%$ и два КСО-5-Г-500-820 пФ $\pm 5\%$ с общей мощностью 120 ВАр, плюс подборный конденсатор КТ-2-М47-62 пФ $\pm 5\%$ с мощностью 50 ВАр. Подключаемый конденсатор должен иметь мощность в 10 раз меньшую, чем конденсатор $C_{ш}$ ($6786 / 680 = 10$), то есть, не менее 10 ВАр. Выберем КСО-5-Г-500-680 пФ $\pm 5\%$.

При использовании четырехсекционного переменного конденсатора сопряжение зависимости перестройки емкостей C_1 и C_3 по диапазону (Рис. 3) определяется одинаковой схемой включения растягивающих конденсаторов C_d и $C_{ш}$, но поскольку оно будет лишь немного влиять на изменение трансформации сопротивлений, то, как показали расчеты для П-контра с емкостным делителем на выходе, в высокой точности оно не нуждается.

В случае же, когда используются два отдельных двухсекционных конденсатора КПВ-2-12/495 пФ с отдельными ручками регулировки и подключаемым конденсатором, вопрос сопряжения не актуален.

Анодный дроссель $D_{р1}$ в данной схеме (Рис. 1) служит для подачи питания на аноды ламп. Физика его работы и методика проектирования подробно разобрана в [10].

Взяв превышение $k = 3,5$ для мощности 50 Вт [10, Табл.1], $X_{др} = k R_a = 3,5 \times 1320 = 4620 \Omega$.

А его индуктивность средней частоте: $L_{др} = X_{др} / (2 \pi f_{ср}) = 4620 / (2 \pi 1,532) = 480$ мкГ.

Постоянный ток дросселя равен постоянной составляющей анодного тока $I_{a0} = 0,19$ А.

Переменная составляющая тока дросселя: $I_{1др} = U_{a1} / X_{др} = 380 / 4620 = 0,082$ А. Общий ток дросселя составит: $I_{др} = \sqrt{(I_{1др}^2 + I_{a0}^2)} = \sqrt{(0,082^2 + 0,19^2)} = 0,207$ А.

В силу малости переменной составляющей тока $I_{1др}$, нет смысла тратить на литцендрат.

Мотаем ПЭЛШО. Диаметр: $d = 0,02 \sqrt{I_{др}} = 0,02 \times \sqrt{0,207} = 0,288$ мм. Стандартный $d = 0,3$ мм.

Для намотки дросселя используем каркас ВЧД10x40 [11]. Мотаем «Универсалью» пять одинаковых секций шириной 5 мм с расстоянием между секциями 3 мм. Путем подбора на программном калькуляторе [12] определяем число витков в каждой секции $n_1 = 75$. (Рис. 8).

При использовании каркаса ВЧД13x50 с такими же секциями – $n_1 = 63$ витка.

Скачать программу Inductors можно по адресу: <http://www.cqf.su/technics/Setup.msi>

Дроссель, включенный в анодную цепь лампы, своей индуктивностью как бы «отъедает» емкость из этой точки и привносит собственную. Собственная емкость такого дросселя около 10 пФ (8,5...11,5), а «отъеденная» им емкость: $C = 530,6 \times \lambda_{ср} / X_{др} = 530,6 \times 195,8 / 4620 = 22,5$ пФ. За вычетом собственной емкости, дроссель отъедает 12,5 пФ. Поскольку анодная емкость двух тетродов 6ПЗ7Н-В составляет $2 \times 5,5 = 11$ пФ, то анодный дроссель как раз ее и компенсирует. Поэтому при расчете емкости первого конденсатора П-контра, я не учитывал емкости анодов.

Расчет индуктивности катушек "Универсаль"

Настройки Методика расчета О программе Выход

Калькулятор для расчета индуктивности многосекционных катушек и дросселей с намоткой "Универсаль"

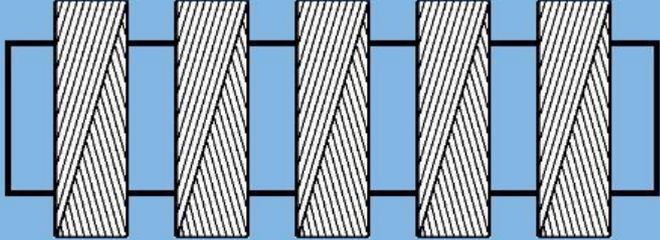
Число секций: Число витков в секциях: Одинаковое Разное

Диаметр каркаса: мм Провод:

Ширина секций: мм Тип:

Расстояние между секциями: мм Диаметр по меди:

Пример Обнулить Результат: 477,492 мкГ Рассчитать



Блокировочный и разделительный конденсаторы в анодной цепи (Рис. 1). Образуют вместе с дросселем фильтр нижних частот к источнику питания и переходную цепочку для ВЧ сигнала к колебательной системе [13]. При этом они не должны шунтировать верхние модулирующие частоты при АЭМ.

Эквивалентное сопротивление нагрузки модулятора при $m = 100\%$:

$$R_{a0} = 0,707 E_{a_{нec}} / I_{a0} = 0,707 \times 420 / 0,19 = 1563 \Omega.$$

Сразу проверим, а верно ли мы выбрали модуляционный дроссель Д267.

$$\text{Требуемая } L = R_{a0} / (2 \pi F_n) = 1563 / (2 \pi 50) = 4,975 \text{ генри.}$$

У дросселя Д267 индуктивность 4,8 генри при токе подмагничивания 0,28 ампера.

У нас ток меньше – 0,19 А. Так, что, будем считать, что все в порядке.

Допустимая емкость суммы конденсаторов при внесении ими снижения глубины модуляции на верхней частоте до 90% (на 0,9 дБ): $C_{б8} = 1 / (4,6 \pi F R_{a0})$, где $F = 8000$ Гц.

$$C_{б8} = 1 / (4,6 \pi F R_{a0}) = 1 / (4,6 \pi 8000 \times 1563) = 5534 \text{ пФ.}$$

Достаточное реактивное сопротивление разделительного конденсатора и минимально-достаточное, блокировочного конденсатора: $X_{Cp} = R_a / 20 = 1360 / 20 = 68 \Omega$.

$C_p = 530,6 \times \lambda_{cp} / X_{Cp} = 530,6 \times 195,8 / 68 = 1528$ пФ; выберем меньший номинал 1200 пФ в пользу блокировочного конденсатора.

Максимальная емкость блокировочного конденсатора:

$$C_b = C_{б8} - C_p = 5534 - 1200 = 4334 \text{ пФ; номинал } 4300 \text{ пФ.}$$

Поскольку при модуляции напряжение на блокировочном конденсаторе может достигать двойного значения питающего $E_{a_{нec}}$, то с учетом запаса 0,8 его рабочее напряжение составит:

$$U_{Cб} = 2,5 E_{a_{нec}} = 2,5 \times 420 = 1050 \text{ В.}$$

Выбираем конденсатор КСО8-Г-2000 В-4300 пФ $\pm 5\%$.

К разделительному конденсатору при модуляции также прикладывается двойное напряжение источника питания, но помимо этого, он должен выдерживать импульсные и статические потенциалы, наводимые на антенну. Ограничить эти потенциалы может разрядник на выходе передатчика. Однако, он не должен пробиваться от выходного ВЧ напряжения передатчика при работе на самую высокоомную нагрузку на пике 100%-ной модуляции. При работе на нагрузку в 300 Ω это напряжение составит: $U_p = \sqrt{(8 P_{нec} R_n)} = \sqrt{(8 P_{нec} 300)} = 50 \sqrt{P_{нec}} = 50 \sqrt{50} = 354 \text{ В.}$ Однако, это напряжение надо будет скорректировать после расчета разрядника.

Расчет зазора в разряднике Ир₁. 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 Ир₁. В простейшем случае он представляет собой два скрещенных толстых проводника с хорошо зафиксированным зазором. В домашних условиях можно использовать автомобильную свечу зажигания с установленным расчетным зазором или, для надежной защиты транзисторных передатчиков, – сложную многоискровую конструкцию [14].

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). Однако, это касается только отечественных (советских) конденсаторов КСО, разработку которых вели честные и грамотные инженеры. Делали их, как для себя! На века!

С современными радиодеталями подобное, увы, не проходит. Нынешние «эффективные менеджеры» их делают не «для себя», а ради денег, «на продажу»: в идеале, чтобы деталь вышла бы из строя на следующий день после окончания срока гарантии, и чтобы пользователь быстрее пришел бы покупать новую. Вот потому я и не люблю буржуйскую элементную базу. Выглядит красиво, параметры – чудесные, а по надёжности и долговечности – дрянь.

При электрической прочности воздуха 3000 В/мм, определяем ширину зазора в разряднике: $s_{\min} = 500 / 3000 = 0,167$ мм; $s_{\max} = 1000 / 3000 = 0,333$ мм. Это 2 – 3 листа писчей бумаги. Для верности лучше взять два, и зазор 0,2 мм, тогда напряжение на разряднике составит 600 вольт.

Теперь можно закончить расчет разделительного конденсатора в анодной цепи. Его рабочее напряжение: $U_{Cr} = 2,5 E_{a_{\text{нec}}} + U_p = 2,5 \times 411 + 600 = 1627$ В. Выбираем конденсатор КСО-8-2500 В-Г-1500 пФ ±10%.

Резистор утечки статического заряда R₁ Для стекания статических зарядов с коротких антенн в землю (при малых протяженностях антенн наводки невелики и разрядник не нужен), следует зашунтировать выход А₃ резистором большого сопротивления (но не более 1 мегаома) и мощностью не менее 2 Вт, на котором не теряется сколько-нибудь значительная мощность передатчика. Его номинал можно выбирать достаточно свободно, лишь бы потери мощности передатчика на нем не превышали бы 0,5 Вт, и при случайном замыкания антенны на электросеть 220 вольт (бывает, всякие провода валяются на крыше), резистор не перегорал бы. Поэтому, сопротивление R₁ должно быть не менее 47 кΩ.

Окончательная схема ВКС вместе с выходным каскадом будет иметь вид (Рис. 9):

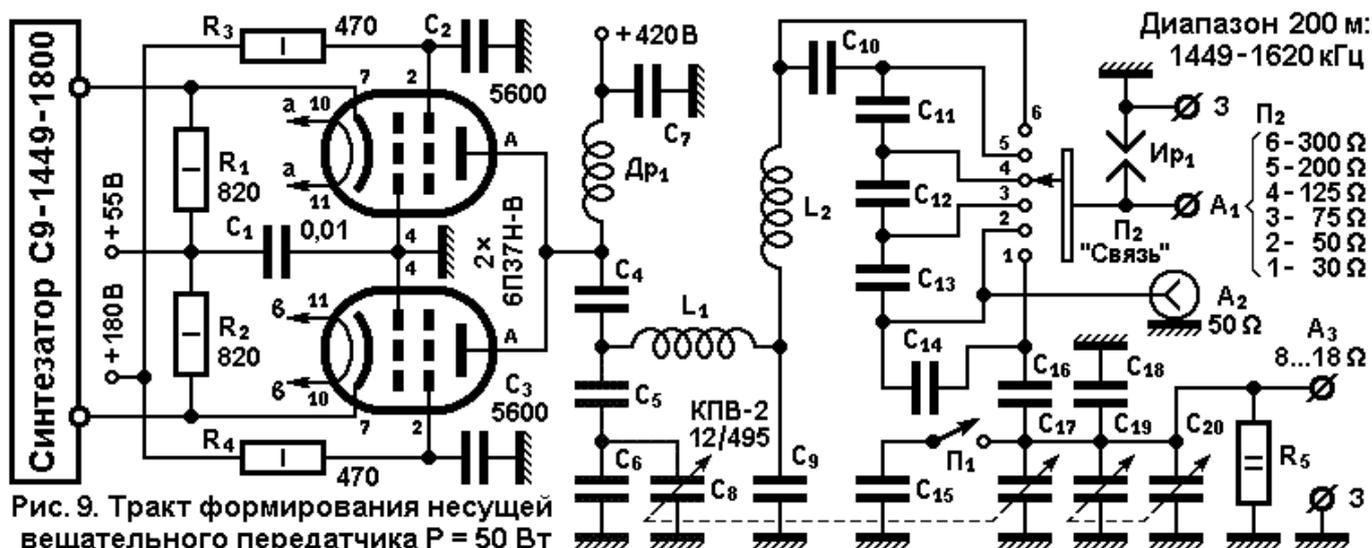


Таблица 2. Намоточные изделия к схеме (Рис. 9).

Поз.	Номинал	Параметры намотки, каркас, тип провода	Кол.	Примечание
Намоточные изделия				
L1	20,4 мкГ	27 витков, свить 3хЛЭШО 28 x 0,1 каркас КР45x52	1	Виток к витку
L2	6,4 мкГ	17 витков, свить 3хЛЭШО 49 x 0,1 каркас КР35x48	1	Виток к витку
Др1	480 мкГ	5 x 75 витков, ПЭЛШО 0,3; ширина секций по 5 мм, на расстоянии друг от друга 3 мм, каркас ВЧД10x40	1	Намотка «Универсаль»

Таблица 3. Спецификация к схеме (Рис. 9).

Поз.	Номинал	Наименование, тип	N, ВАр	Кол.	Примечание
R1	47 кΩ	Резистор МЛТ-2-47 кΩ ±5%	-	1	
		Конденсаторы			
C1	0,01 мкФ	КСО-5-250 В-В-0,01 пФ ±10%	-	1	
C2	5600 пФ	КСО-5-500 В-В-5600 пФ ±10%	-	1	
C3	5600 пФ	КСО-5-500 В-В-5600 пФ ±10%	-	1	
C4	1500 пФ	КСО-8-2500 В-Г-1300 пФ ±5%	-	1	
C5	1190 пФ	КТ-2-500 В-М75-200 пФ ±5%	207	6	Параллельно
C6	820 пФ	КТ-2-500 В-М75-130 пФ ±5% КТ-2-500 В-М75-150 пФ ±5%	233	4 2	Параллельно
C7	4300 пФ	КСО-8-Г-2000-4300 пФ ±5%	-	1	
C8, C17, C19, C20	2x12/495 пФ	КПВ-2-12/495 пФ	-	2	
C9	7528 пФ	КСО-5-500 В-Г-2000 пФ ±5% КСО-5-500 В-Г-1800 пФ ±5%	61	2 2	Параллельно
C10	12094 пФ	КСО-5-500 В-Г-3000 пФ ±5%	57	4	Параллельно
C11	13084 пФ	КСО-5-500 В-Г-3300 пФ ±5%	53	4	Параллельно
C12	15764 пФ	КСО-5-500 В-Г-5100 пФ ±5% КСО-5-500 В-Г-5600 пФ ±5%	44	2 1	Параллельно
C13	25907 пФ	КСО-5-250 В-Г-8200 пФ ±5% КСО-5-500 В-Г-1300 пФ ±5%	27	3 1	Параллельно
C14	28150 пФ	КСО-5-250 В-Г-0,01 мкФ ±10% КСО-5-250 В-Г-8200 пФ ±5%	25	2 1	Параллельно
C15	680 пФ	КСО-5-250 В-Г-680 пФ ±5%	10	1	
C16	49470 пФ	КСО-5-250 В-Г-0,01 мкФ ±10%	14	5	Параллельно
C18	5703 пФ	КСО-5-500 В-Г-820 пФ ±5% КСО-5-250 В-Г-750 пФ ±5%	102	6 1	Параллельно

Поскольку наша промышленность перестала выпускать даже конденсаторы К31У-3Е-5Г и к огромному сожалению, так и не освоила выпуск К31У-3Е-8Г, К31У-3Е-11Г, К31У-3Е-12Г и К31У-3Е-13Г, то инженерам и радиолюбителям придется искать по кладовкам еще не уничтоженных мощных КВ-СВ передающих радиодеталей (спасибо РТРС, что сохранили) и запасливых снабженцев НИИ и радиозаводов (не сдавших советские радиодетали на цветметаллы) старые и добрые КСО-5, КСО-6, КСО-7, 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. При большей реактивной мощности у них в номенклатуре отсутствуют большие значения емкостей (в разумных габаритах), да и точность номиналов ±10% и ±20% гораздо хуже, чем ±5% и даже ±2%, как у старых и добрых КСО.

Эх, возобновить бы еще производство конденсаторов КТ-3 - незаменимая вещь для ВКС передатчиков малой мощности.

Литература:

1. С. Комаров. Средневолновый радиовещательный синтезатор частоты, Радио, 2012 г. № 9, стр. 19-23 и № 10, стр. 21-23.
2. С. Комаров, А. Морозова. Исследование усилителя мощности радиочастотных колебаний с многофазным возбуждением, «Г-Сотм – 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. Справочник по радиотехнике под общей редакцией инж. Б. А. Смиренина. М. Госэнергоиздат, 1950.
7. Проектирование радиопередающих устройств, под ред. д.т.н. В. В. Шахгильдяна, М. «Радио и связь», 1984.
8. Г. Г. Гинкин. Справочник по радиотехнике, Государственное энергетическое издательство, Москва-Ленинград, 1948.
9. С. Комаров. Самодельные ребристые каркасы для катушек передатчика. - Радио, 2015, № 5, с. 33.
10. С. Комаров. Анодный дроссель выходного каскада маломощного радиовещательного АМ передатчика. – Радиолюбитель, 2016, № 8, стр. 26-28.

11. **С. Комаров.** Каркасы ВЧД и ВЧДР для намотки анодных дросселей СВ и КВ диапазонов. – Радиолобитель, 2016, № 10, стр. 49-54.
12. **Д. Харб.** Расчет индуктивности многосекционных катушек и дросселей. – Радиолобитель, 2016, № 7, стр. 31.
13. **С. Комаров.** О блокировочном и разделительном конденсаторах в анодной цепи радиопередатчика с АЭМ. – Радиолобитель, 2016, № 11, стр.
14. **С. Комаров.** Защитный разрядник на выходе маломощного средневолнового радиовещательного АМ передатчика.