

## **Задание на курсовой проект «Связной приемопередатчик СВЧ»**

Необходимо составить структурную схему, рассчитать параметры, выбрать компоненты, изобразить принципиальную электрическую схему и эскиз конструкции радиопередатчика СВЧ со следующими основными характеристиками:

1. **Назначение:** передача двоичного цифрового сообщения с указанными значениями несущей частоты  $f_{\text{нес}} = 0.15 \dots 0.17$  ГГц, мощности в антенне в режиме молчания  $P_{\text{н}} = 15$  Вт, видом модуляции ФМ2 и длительностью информационного бита  $\tau = 1$  мкс.

2. **Параметры выходного сигнала и условия эксплуатации:**

- Кратковременная относительная нестабильность несущей частоты не хуже  $\pm 5 \cdot 10^{-5}$ ;
- Выходная частота задается синтезатором сетки частот с заданным шагом  $\Delta f_{\text{ш}} = 2$  МГц;
- Полоса частот цепи согласования выходного каскада  $\Delta f_{\text{цс}} > 6$  МГц;
- Для ФМ2 шаг манипуляции фазы  $\Delta \varphi = \pm \pi$ ;
- Нагрузка в виде коаксиального кабеля сопротивлением 50 Ом;
- Интервал рабочих температур (+15 ... + 40)°С;
- Электропитание производится от одного источника.

Выходной каскад усилителя мощности выполняется на заданном транзисторе КТ920В, в задающем генераторе и в промежуточных каскадах используется серийные интегральные микросхемы, представленные на мировом рынке.



## Глава 2. Расчет электрического режима выходного каскада усилителя мощности.

Составление структурной схемы начинается с усилителя мощности. Усилитель мощности, т.е. окончательный каскад, построен на транзисторе КТ920В. Проведу расчет усилителя мощности, а также приведу расчет выходной цепи согласования и расчет условия теплоотвода.

Исходные данные транзистора в типовом режиме:

Транзистор	$f_{тип}$ МГц	$U_{к0}$ В	$P_{вых}$ Вт	$K_p$	КПД %
КТ920В	175	12.6	20	4	75

Полигональная модель транзистора:

Транзистор	$h_{21э}$	$U'$ В	$S_{гр}$ См	$f_{гр}$ МГц	$C_k$ пФ	$C_{ка}$ пФ	$C_э$ пФ	$r_B$ Ом	$L_B$ нГ	$L_э$ нГ	$L_k$ нГ
КТ920В	25	0.6	2.8	500	50	16	250	0.5	2.4	1	2.4

### 2.1 Расчет усилителя мощности

Предварительно оценю ожидаемый коэффициент усиления по мощности

$$K_p \approx \left(\frac{f_{тип}}{f}\right)^2 K_p(f_{тип}) \approx \left(\frac{175}{160}\right)^2 \cdot 4 \approx 4.785$$

Сопротивление потерь коллектора в параллельном эквиваленте

$$r_k \approx \frac{1}{(2\pi f C_k)^2 r'_k} \approx \frac{1}{(2\pi \cdot 160 \cdot 10^6 \cdot 50 \cdot 10^{-12})^2 \cdot 0.5} = 791.6 \text{ Ом}$$

Коэффициент использования коллекторного напряжения в граничном режиме

$$\begin{aligned} \xi_{гр} &= \frac{0.5}{1 + \frac{2}{S_{гр} r_k}} \left[ 1 + \sqrt{1 - \frac{16 P_{вых} \left(1 + \frac{2}{S_{гр} r_k}\right)}{S_{гр} U_{к0}^2}} \right] = \frac{0.5}{1 + \frac{2}{2.8 \cdot 791.6}} \left[ 1 + \sqrt{1 - \frac{16 \cdot 15 \left(1 + \frac{2}{2.8 \cdot 791.6}\right)}{2.8 \cdot 12.6^2}} \right] = \\ &= 0.838 \end{aligned}$$

Напряжение и первая гармоника тока нагрузки, приведенные к ЭГ

$$U_k = \xi_{гр} U_{к0} = 0.838 \cdot 12.6 = 10.56 \text{ В}$$

$$I_{к1} = \frac{2 P_{вых}}{U_k} = \frac{2 \cdot 15}{10.56} = 2.84 \text{ А}$$

Полезная нагрузка и полное сопротивление, приведенные к ЭГ

$$R_k = \frac{U_k}{I_{к1}} = \frac{10.56}{2.84} = 3.72 \text{ Ом}$$

$$R'_k = \frac{R_k r_k}{R_k + r_k} = \frac{3.72 \cdot 791.6}{3.72 + 791.6} = 3.7 \text{ Ом}$$

### Амплитуда первой гармоники тока ЭГ

$$I_{r1} = I_{k1} \left( 1 + \frac{R_k}{r_k} \right) = 2.84 \left( 1 + \frac{3.72}{791.6} \right) = 2.85 \text{ A}$$

Найти крутизну по переходу, крутизну статической характеристики коллекторного тока, сопротивление рекомбинации, а также для определения коэффициента разложения для первой гармоники тока ЭГ найду значения коэффициентов А и В

$$S_{\Pi} = \frac{42.5 I_{r1}}{1 + 3.66 \cdot 10^{-3} t_{\Pi}} = \frac{42.5 \cdot 2.85}{1 + 3.66 \cdot 10^{-3} \cdot 120} = 84.28 \text{ См}$$

$$r = \frac{h_{21э}}{S_{\Pi}} = \frac{25}{84.28} = 0.3 \text{ Ом}$$

$$S = \frac{h_{21э}}{r_B + r + r'_э(1 + h_{21э})} = \frac{25}{0.5 + 0.3 + 0.15(1 + 25)} = 5.32 \text{ См}$$

$$A = 0.65 + 0.15 \frac{\omega_{гр} C_э}{S} = 0.65 + 0.15 \frac{2\pi \cdot 500 \cdot 10^6 \cdot 250 \cdot 10^{-12}}{5.32} = 0.67$$

$$B = 0.67 + \frac{\omega_{гр} C_э}{S} = 0.67 + \frac{2\pi \cdot 500 \cdot 10^6 \cdot 250 \cdot 10^{-12}}{5.32} = 0.82$$

### Коэффициент разложения

$$\gamma_1 = \frac{A}{B - (U_{B0} - U') \frac{\omega_{гр} C_э}{I_{r1}}} = \frac{0.67}{0.82 - (0 - 0.6) \cdot \frac{2\pi \cdot 500 \cdot 10^6 \cdot 250 \cdot 10^{-12}}{2.85}} = 0.684$$

С учетом полученного коэффициента разложения определяю коэффициент формы и  $\cos\theta$  (из таблицы)

$$g_1 = 1.43$$

$$\cos(\theta) = -0.292$$

### Амплитуда тока базы

$$\begin{aligned} I_{B1} &= \frac{\omega}{\omega_{гр}} \left[ I_{r1} \left( \frac{B}{A} + \omega_{гр} C_k R'_k \right) - \frac{U_{B0} - U'}{A} \omega_{гр} C_э \right] = \\ &= \frac{2\pi \cdot 160 \cdot 10^6}{2\pi \cdot 500 \cdot 10^6} \left[ 2.85 \left( \frac{0.82}{0.67} + 2\pi \cdot 500 \cdot 10^6 \cdot 50 \cdot 10^{-12} \cdot 3.7 \right) + \frac{0.6 \cdot 2\pi}{0.67} \cdot 500 \cdot 10^6 \cdot 250 \cdot 10^{-12} \right] = \\ &= 1.87 \text{ A} \end{aligned}$$

Модуль коэффициента усиления по току, приведенный к ЭГ

$$K_i = \frac{I_{k1}}{I_{B1}} = \frac{2.84}{1.87} = 1.52$$

### Пиковое обратное напряжение на эмиттере

$$U_{\text{ЭБ.пик}} = -\frac{I_{\Gamma 1}(1 + \cos(\theta))}{\omega C_{\text{Э}}} + U' = -\frac{2.85(1 - 0.292)}{2\pi \cdot 160 \cdot 10^6 \cdot 250 \cdot 10^{-12}} + 0.6 = -3.16 \text{ В}$$

### Составляющие входного сопротивления транзистора первой гармонике

$$r_{\text{вх1}} = \frac{r_{\text{Б}}(1 + \omega_{\text{ГР}} C_{\text{КК}} R'_{\text{К}} \gamma_1) + \omega_{\text{ГР}} L_{\text{Э}} \gamma_1 + r'_{\text{Э}}}{1 + \omega_{\text{ГР}} C_{\text{К}} R'_{\text{К}} \gamma_1} =$$
$$= \frac{0.5(1 + 2\pi \cdot 500 \cdot 10^6 \cdot 16 \cdot 10^{-12} \cdot 3.7 \cdot 0.684) + 2\pi \cdot 500 \cdot 10^6 \cdot 10^{-9} \cdot 0.684 + 0.15}{1 + 2\pi \cdot 500 \cdot 10^6 \cdot 50 \cdot 10^{-12} \cdot 3.7 \cdot 0.684} =$$
$$= 2.05 \text{ Ом}$$

$$x_{\text{вх1}} = \omega L_{\text{Б}} + \frac{\omega L_{\text{Э}} - \frac{1 - \gamma_1}{\omega C_{\text{Э}}} - r'_{\text{Э}} \frac{\omega_{\text{ГР}} \gamma_1}{\omega}}{1 + \omega_{\text{ГР}} C_{\text{К}} R'_{\text{К}} \gamma_1} =$$
$$= 2.413 + \frac{2\pi \cdot 160 \cdot 10^6 \cdot 10^{-9} - \frac{1 - 0.684}{2\pi \cdot 160 \cdot 10^6 \cdot 250 \cdot 10^{-12}} - 0.15 \frac{2\pi \cdot 500 \cdot 10^6 \cdot 0.684}{2\pi \cdot 160 \cdot 10^6}}{1 + 2\pi \cdot 500 \cdot 10^6 \cdot 50 \cdot 10^{-12} \cdot 3.7 \cdot 0.684} =$$
$$= 2 \text{ Ом}$$

### Коэффициент усиления по мощности

$$K_{\text{п}} = K_i^2 \frac{R_{\text{К}}}{r_{\text{вх1}}} = (1.52)^2 \frac{3.72}{2.05} = 4.2$$

### Постоянная составляющая коллекторного тока, мощность, потребляемая от источника питания, К.П.Д. коллектора

$$I_{\text{К}} = \frac{I_{\Gamma 1}}{g_1(\theta)} = \frac{2.85}{1.43} = 2 \text{ А}$$

$$P_0 = I_{\text{К}} U_{\text{К0}} = 2 \cdot 12.6 = 25.2 \text{ Вт}$$

$$\eta_{\text{К}} = \frac{P_{\text{ВЫХ}}}{P_0} = \frac{15}{25.2} = 0.596 \text{ или } 59.6\%$$

### Входная мощность и рассеиваемая мощность

$$P_{\text{В}} = \frac{P_{\text{ВЫХ}}}{K_{\text{п}}} = \frac{15}{4.2} = 3.6 \text{ Вт}$$

$$P_{\text{рас}} = P_0 - P_{\text{ВЫХ}} + P_{\text{В}} = 25.2 - 15 + 3.57 = 13.72 \text{ Вт}$$

**Составляющие сопротивления нагрузки, приведенные к внешнему выводу коллектора**

$$R_H = \frac{[\omega C_K(1 - \omega^2 C_K L_K)R_K^2 - \omega L_K]^2 + R_K^2}{[1 + (\omega C_K R_K)^2]R_K} =$$

$$= \frac{[0.05(1 - (2\pi \cdot 160 \cdot 10^6)^2 \cdot 50 \cdot 10^{-12} \cdot 2.4 \cdot 10^{-9}) \cdot 3.72^2 - 2.413]^2 + 3.72^2}{[1 + (2\pi \cdot 160 \cdot 10^6 \cdot 50 \cdot 10^{-12} \cdot 3.72)^2]3.72} =$$

$$= 4.44 \text{ Ом}$$

$$X_H = \frac{R_H R_K}{\omega C_K(1 - \omega^2 C_K L_K)R_K^2 - \omega L_K} = \frac{4.44 \cdot 3.72}{0.05(1 - 1.01 \cdot 10^{18} \cdot 50 \cdot 10^{-12} \cdot 2.4 \cdot 10^{-9}) \cdot 3.72^2 - 2.413} =$$

$$= -9.154 \text{ Ом}$$

$$C_H = -\frac{1}{2\pi f X_H} = 1.09 \cdot 10^{-10} \text{ Ф}$$

## 2.2 Расчет выходной цепи согласования на сосредоточенных элементах

Цепь согласования на сосредоточенных элементах применяется в диапазоне рабочих частот  $f < 300$  МГц. Для моего диапазона частот выполняется это условие. Выходная цепь согласования представляет собой П-образный контур, в индуктивную ветвь которого для улучшения фильтрации включена дополнительная LC-цепь, настроенная на рабочую частоту.

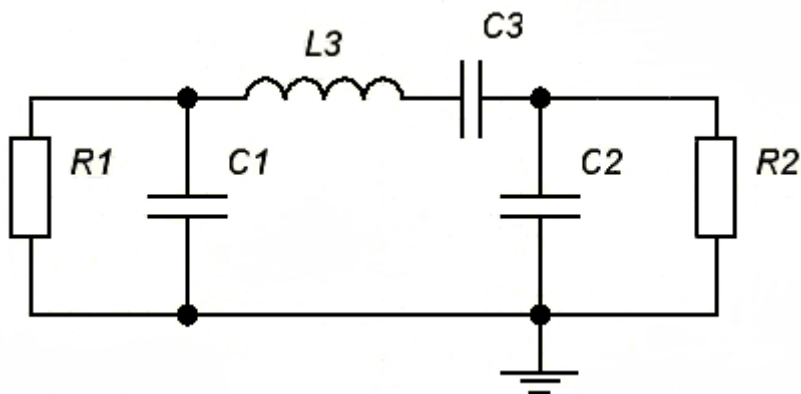


Рис. 2.1 Выходная цепь согласования П-образный контур

Расчет цепи согласования ведется по формулам из пособия [1].

Для того чтобы рассчитать элементы цепи необходимо выполнения условия реализуемости.

$$\text{Условие реализуемости: } q^2 > \frac{R_1}{R_2} - 1$$

Сопротивление  $R_1 = 50 \text{ Ом}$

Сопротивление  $R_2 = R_K = 3.72 \text{ Ом}$

Условие реализуемости для сопротивлений выполняется т.е.  $q > 3.67$

Для расчета выходной цепи согласования возьму  $q = 4$

Расчетные формулы для нахождения элементов выходной цепи согласования

$$q = -\frac{R_1}{X_1} \Rightarrow X_1 = -\frac{R_1}{q} = \frac{50}{4} = -12.5$$

$$X_1 = -\frac{1}{\omega C_1} \Rightarrow C_1 = -\frac{1}{\omega X_1} = \frac{1}{2\pi \cdot 160 \cdot 10^6 \cdot 12.5} = 80 \text{ пФ}$$

$$X_2 = -\frac{R_2}{\sqrt{\frac{R_2}{R_1}(1+q^2)-1}} = -\frac{3.72}{\sqrt{\frac{3.72}{50}(1+4^2)-1}} = -7.23$$

$$C'_2 = -\frac{1}{\omega X_2} = \frac{1}{2\pi \cdot 160 \cdot 10^6 \cdot 7.23} = 138 \text{ пФ}$$

$$C_2 = C_H + C'_2 = 138 \cdot 10^{-12} + 1.09 \cdot 10^{-10} = 247 \text{ пФ}$$

Для нахождения элементов  $L_3$  и  $C_3$  заменяю их эквивалентной индуктивностью

$$X_3 = \frac{R_1}{1+q^2} \left( q - \frac{R_2}{X_2} \right) = \frac{50}{1+4^2} \left( 4 + \frac{3.72}{7.23} \right) = 13.28$$

$$X_3 = \omega L_{3.ЭКВ}$$

$$L_{3.ЭКВ} = \frac{X_3}{2\pi f} = \frac{13.28}{2\pi \cdot 160 \cdot 10^6} = 13.2 \text{ нГн}$$

Пусть  $L_3$  в 10 больше  $L_{3.ЭКВ}$

$$L_3 = 10L_{3.ЭКВ} = 10 \cdot 13.2 \cdot 10^{-9} = 132 \text{ нГн}$$

$$X_3 = \omega L_3 - \frac{1}{\omega C_3} \Rightarrow C_3 = \frac{1}{\omega^2(L_3 - L_{3.ЭКВ})} = \frac{1}{(2\pi \cdot 160 \cdot 10^6)^2(132 \cdot 10^{-9} - 13.2 \cdot 10^{-9})} = 8.3 \text{ пФ}$$

Результат полученных значений элементов сведен в таблицу.

Таблица 2.1 Результаты значений элементов выходной цепи согласования

$C1$ , пФ	$C2$ , пФ	$C3$ , пФ	$L3$ , нГн
80	247	8.3	132

### 2.3 Расчет блокировочных элементов в усилителе мощности

Блокировочные элементы рассчитываются исходя из следующих соотношений:

**Первое условие:**

$$X_{L_{бл}} \gg R_k$$

$$X_{L_{бл}} \gg r_{вх1}$$

$$X_{L_{бл}} = (50 - 100)R_k$$

**Второе условие:**

$$X_{C_{бл}} \ll X_{L_{бл}}$$

$$X_{C_{бл}} = \frac{X_{L_{бл}}}{(100 - 200)}$$

**В коллекторной цепи транзисторного УМ:**

$$L_{бл} = \frac{75R_k}{2\pi f} = \frac{75 \cdot 3.72}{2\pi \cdot 160 \cdot 10^6} = 277 \text{ нГн}$$

$$C_{бл} = \frac{150}{(2\pi f)^2 \cdot L_{бл}} = \frac{150}{(2\pi \cdot 160 \cdot 10^6)^2 \cdot 277 \cdot 10^{-9}} = 535 \text{ пФ}$$

**В цепи смещения транзисторного УМ:**

$$L_{бл} = \frac{75r_{вх1}}{2\pi f} = \frac{75 \cdot 2.05}{2\pi \cdot 160 \cdot 10^6} = 153 \text{ нГн}$$

$$C_{бл} = \frac{150}{(2\pi f)^2 \cdot L_{бл}} = \frac{150}{(2\pi \cdot 160 \cdot 10^6)^2 \cdot 153 \cdot 10^{-9}} = 971 \text{ пФ}$$

Результат полученных значений элементов сведен в таблицу.

Таблица 2.2 Результаты значений блокировочных элементов транзисторного УМ

Коллекторная цепь транзисторного УМ		Цепь смещения транзисторного УМ	
$L_{бл}, \text{ нГн}$	277	$L_{бл}, \text{ нГн}$	153
$C_{бл}, \text{ пФ}$	535	$C_{бл}, \text{ пФ}$	971

## 2.4 Расчет условия теплоотвода

Нагрев прибора определяется полностью величиной  $P_{\text{рас}}$ . В наиболее тяжелом тепловом режиме находится транзистор КТ920В т.к. мощность рассеивания составляет 13.72 Вт.

Температура радиатора не должна превышать максимальной рабочей температуры т.е.

$$t_{\text{раб.мах}} = t_{\text{п.мах}} - R_{\text{пс}} P_{\text{рас}} = 160 - 4 \cdot 13.72 = 105.12^\circ\text{C}$$

Рабочую температуру радиатора выберу с запасом  $t_{\text{раб.рад}} = 100^\circ\text{C}$

Тепловое сопротивление радиатора с учетом выбранной рабочей температуры радиатора получится:

$$R_{\text{рад}} = \frac{t_{\text{раб.рад}} - t_{\text{ср}}}{P_{\Sigma\text{рас}}} = \frac{t_{\text{раб.рад}} - t_{\text{ср}}}{P_0 - P_{\text{вых}}} = \frac{100 - 27.5}{25.15 - 15} = 7.14 \frac{^\circ\text{C}}{\text{Вт}}$$

Объем при заданном тепловом сопротивлении радиатора определяется как:

$$V = \left( \frac{80}{R_{\text{рад}}} \right)^{\frac{3}{2}} = \left( \frac{80}{7.14} \right)^{\frac{3}{2}} = 37.5 \text{ см}^3$$

Объем радиатора:  $V = A \cdot B \cdot H$

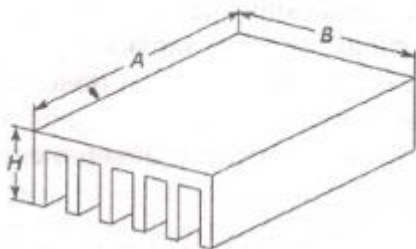


Рис. 2.2 Радиатор

где, А - Длина ребра

В- Ширина радиатора

Н- Высота радиатора

Один из вариантов построения радиатора будет таким:

$$H=1.5 \text{ см}$$

$$A=3 \text{ см}$$

$$B=8.33 \text{ см}$$

## **2.5. Принципиальная схема выходного каскада усилителя мощности**

Выходной каскад усилителя мощности на транзисторе КТ920В с выходной цепью согласования и рассчитанными блокировочными элементами в цепях питания изображен на рис. 2.3.

### Глава 3. Расчет и выбор компонентов для промежуточных каскадов

Проектирование связного приемопередатчика СВЧ начинался с расчета усилителя мощности на транзисторе КТ920В для которого были рассчитаны 3 необходимые величины, коэффициент усиления по мощности, мощность на выходе и мощность на входе. Теперь необходимо подобрать такую элементную базу, которая будет согласована как по полосе рабочих частот, так и по мощности.

#### 3.1. Предвыходной каскад

Мощность на входе усилителя равна 3.6 Вт или 35.5 дБм. Усилитель, который на выходе может дать такую мощность и согласовать ее по входу с усилителем мощности был выбран усилительный модуль известной фирмы «RF Micro Devices, Inc», который имеет следующие основные параметры: выходная мощность  $P_{\text{вых.1дБ}} = 32$  дБм, коэффициент усиления 34.5 дБ, предельная по искажениям выходная мощность  $P_{\text{вых.1P3}} =$