

## Расчёт выходного каскада на заданную мощность.

Дано:

- мощность в нагрузке  $P_n \geq 10 \text{ Вт}$  ;
- несущая частота  $f = 60 \text{ МГц}$  .

Принимаем КПД цепи согласования  $\eta_{\text{цс}} = 0,7$  и определяем необходимую колебательную мощность выходного каскада

$$P_1 = \frac{P_n}{\eta_{\text{цс}}} = \frac{10}{0,7} = 14,2 \text{ Вт} .$$

Выбираем для выходного каскада транзистор КТ920В, имеющий допустимую мощность рассеяния на коллекторе  $P_{\text{дон}} = 14 \text{ Вт}$  .

Параметры транзистора:

- граничная частота усиления по току  $f_t = 600 \text{ МГц}$  ;
- среднее во времени значение коэффициента усиления тока  $B = 20$  ;
- крутизна линии граничного режима  $S_{\text{сп}} = 4 \text{ А/В}$  ;
- напряжение отсечки  $U_{\text{отс}} = 1 \text{ В}$  ;
- ёмкость эмиттерного перехода  $C_{\text{э}} = 400 \text{ нФ}$  ;
- ёмкость коллекторного перехода  $C_{\text{к}} = 70 \text{ нФ}$  ;
- допустимое обратное напряжение на базе  $U_{\text{б.дон}} = -4 \text{ В}$  ;
- индуктивность базового выхода  $L_{\text{б}} = 2,4 \text{ нГн}$  ;
- индуктивность эмиттерного выхода  $L_{\text{э}} = 1 \text{ нГн}$  ;

Определяем значение частоты, на которой модуль коэффициента передачи тока  $\left| \dot{\beta} \right|$  уменьшается в  $\sqrt{2}$  раз по сравнению со статическим коэффициентом  $\beta_0$  (транзистор включён по схеме с общим эмиттером)

$$f_{\beta} = \frac{f_t}{B} = \frac{600}{20} = 30 \text{ МГц} .$$

Определяем возможную величину напряжения источника питания коллекторной цепи

$$E_n \leq \frac{1}{2} U_{\text{к.дон}} = \frac{1}{2} 36 = 18 \text{ В} ,$$

выбираем рекомендуемое значение  $E_n = 12 \text{ В}$  .

Выбираем угол отсечки коллекторного тока  $\theta = 90^\circ$  . Тогда коэффициенты Берга имеют значения

$$\alpha_1 \overset{\sim}{\theta} = \gamma_1 \overset{\sim}{\theta} = \gamma_1 \star - \theta \overset{\sim}{=} 0,5 ;$$
$$\alpha_0 \overset{\sim}{\theta} = \gamma_0 \overset{\sim}{\theta} = \gamma_0 \star - \theta \overset{\sim}{=} 0,318 .$$

Выбираем высоту импульса коллекторного тока

$i_{к.маx} = 0,8...0,9 \bar{i}_{к.дон} = 0,8...0,9 \bar{7} = 5,6...6,3A$ ,  
 принимаем  $i_{к.маx} = 6A$ .

Граничное значение коэффициента напряжённости режима

$$\xi_{эп} = 1 - \frac{i_{к.маx}}{S_{эп} E_n} = 1 - \frac{6}{4 \cdot 12} = 0,88.$$

Амплитуда 1-й гармоники коллекторного напряжения

$$U_{к1} = \xi_{эп} E_n = 0,88 \cdot 12 = 11,1B.$$

Амплитуда 1-й гармоники коллекторного тока

$$I_{к1} = \alpha_1 \bar{i}_{к.маx} = 0,5 \cdot 6 = 3A.$$

Постоянная составляющая коллекторного тока

$$I_{к0} = \alpha_0 \bar{I}_{к.маx} = 0,318 \cdot 6 = 1,9A.$$

Колебательная мощность (по 1-й гармонике)

$$P_1 = \frac{1}{2} U_{к1} I_{к1} = \frac{1}{2} 11,1 \cdot 3 = 16,7Bm.$$

Потребляемая мощность

$$P_0 = E_n I_{к0} = 12,6 \cdot 1,9 = 25Bm.$$

Мощность рассеивания на коллекторе

$$P_{рас} = P_0 - P_1 = 25 - 16,7 = 8,3Bm < P_{дон} 14Bm.$$

КПД выходного каскада (электронный КПД коллекторной цепи)

$$\eta_e = \frac{P_1}{P_0} = \frac{16,7}{25} = 0,67.$$

Амплитуда 1-й гармоники управляющего заряда

$$Q_{y1} = \frac{i_{к.маx}}{\omega_l (1 - \cos \theta)} = \frac{6}{2\pi \cdot 0,6 \cdot 10^9 (1 - 0)} = 1,6 \cdot 10^{-9} Кл$$

Наименьшее мгновенное значение напряжения на эмиттерном переходе

$$U_{э.мин} = U_{омс} - \frac{Q_{y1}}{C_y} (1 - \cos \theta - \theta) = 1 - \frac{1,6 \cdot 10^{-9}}{400 \cdot 10^{-12}} (1 - 0) = -3B;$$

$$|U_{э.мин}| = 3B < U_{б.дон} = 4B.$$

Постоянная составляющая напряжения на эмиттерном переходе

$$U_{э.0} = U_{омс} - \gamma_0 \theta - \frac{Q_{y1}}{C_y} = 1 - 0,318 \frac{1,6 \cdot 10^{-9}}{400 \cdot 10^{-12}} = -0,3B;$$

Амплитуда 1-й гармоники напряжения на эмиттерном переходе

$$U_{\sigma 1} = \gamma_0 \cdot \frac{Q_{y1}}{C_3} = 0,5 \frac{1,6 \cdot 10^{-9}}{400 \cdot 10^{-12}} = 2B ;$$

Необходимое сопротивление коллекторной нагрузки

$$R_k = \frac{U_{k1}}{I_{k1}} = \frac{11,1}{3} = 3,7 Ом$$

Расчетный параметр

$$\delta = 1 + \gamma_1 \cdot \omega_t C_k R_k = 1 + 0,5 \cdot 2\pi \cdot 0,6 \cdot 10^9 \cdot 70 \cdot 10^{-12} \cdot 3,7 = 1,5 .$$

Амплитуда 1-й гармоники базового тока

$$I_{\sigma 1} = \omega Q_{y1} \delta = 2\pi \cdot 60 \cdot 10^6 \cdot 1,6 \cdot 10^{-9} \cdot 1,5 = 0,9A ;$$

Сопротивление корректирующего резистора

$$R_3 = \frac{1}{\omega_\beta C_3} = \frac{1}{2\pi \cdot 30 \cdot 10^6 \cdot 400 \cdot 10^{-12}} = 13 Ом.$$

Часть входной мощности, обусловленной потерями на корректирующем резисторе

$$P'_{ex} = \frac{1}{2} \cdot \frac{\gamma_1 \cdot \frac{Q_{y1}^2}{C_3^2}}{R_3} = \frac{1}{2} \cdot \frac{0,5 \cdot \frac{1,6 \cdot 10^{-9}^2}{400 \cdot 10^{-12}^2}}{13} = 0,3 Вт.$$

Активная часть входного сопротивления

$$R_{ex} = \frac{1}{\delta} \cdot \gamma_1 \cdot \omega_t L_3 = \frac{1}{1,5} \cdot 0,5 \cdot 2\pi \cdot 0,6 \cdot 10^9 \cdot 10^{-9} = 1,3 Ом.$$

Часть входной мощности, обусловленной потерями на входном сопротивлении

$$P''_{ex} = \frac{1}{2} I_{\sigma 1}^2 \cdot R_{ex} = \frac{1}{2} \cdot 0,9^2 \cdot 1,3 = 0,5 Вт.$$

Суммарная входная мощность каскада

$$P_{ex} = P'_{ex} + P''_{ex} = 0,3 + 0,5 = 0,8 Вт.$$

Коэффициент усиления по мощности

$$K_p = \frac{P_1 + P''_{ex}}{P_{ex}} = \frac{16,7 + 0,5}{0,8} = 21,5.$$

Входная индуктивность

$$L_{ex} = L_6 + \frac{L_3}{\delta} = 2,4 + \frac{1}{1,5} = 3,6 нГн.$$

Входная емкость

$$C_{ex} = \delta \frac{C_3}{\gamma_1 \cdot \theta} = \frac{1,5 \cdot 400 \cdot 10^{-12}}{0,5} = 1200 \text{ пФ.}$$

Сопротивление, шунтирующее входную цепь

$$R_{пар} = \gamma_1 \cdot \theta \cdot R_3 = 0,5 \cdot 13 = 6,5 \text{ Ом}$$

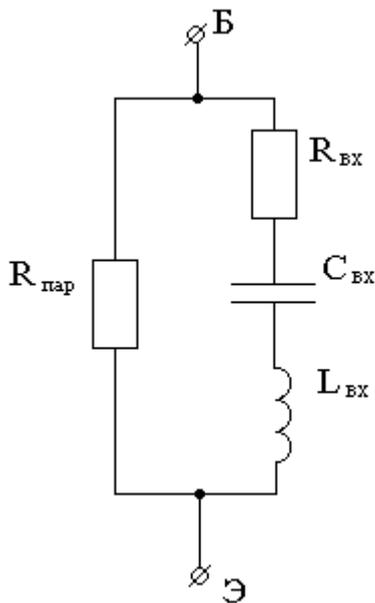


Рис 1. Эквивалентная схема входной цепи мощного биполярного транзистора.

## Расчет цепи смещения выходного транзистора.

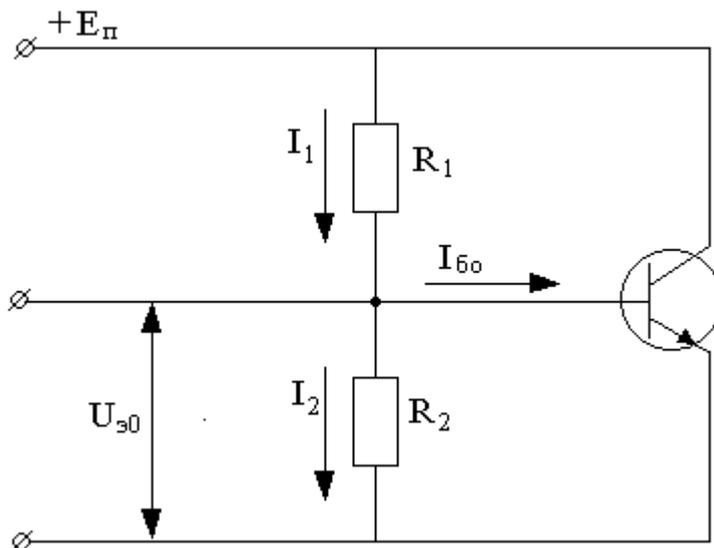


Рис2. Схемасмещения от источника питания.

Применяя схему (рис 2), можно установить требуемый режим по постоянному току при выполнении условий

$$E_n = \frac{R_2}{R_1 + R_2} = U_{omc} \quad \text{и} \quad \frac{R_1 R_2}{R_1 + R_2} = R_{cm} = R_3;$$

отсюда 
$$\frac{R_2}{R_1 + R_2} = \frac{U_{omc}}{E_n}; \quad R_1 \frac{U_{omc}}{E_n} = R_3;$$

$$R_1 = R_3 \frac{E_n}{U_{omc}} = 13 \frac{12,6}{1} \cong 165 \text{ Ом};$$

$$\frac{R_1 + R_2}{R_2} = \frac{E_n}{U_{omc}}; \quad \frac{R_1}{R_2} = \frac{E_n}{U_{omc}} - 1;$$

$$R_2 = \frac{R_1}{\frac{E_n}{U_{omc}} - 1} = \frac{165}{\frac{12,6}{1} - 1} = 14 \text{ Ом}.$$

Выбираем  $R_1 = 160 \text{ Ом}; R_2 = 14 \text{ Ом}$ . При этом на базе действует фиксированное смещение, равное  $U_{omc}$  (за счет делителя напряжения

$R_1 R_2$ ), и автосмещение  $U_{авт} = -\frac{\gamma_0 \star -\theta \tilde{Q}_{y1}}{C_3}$  за счет постоянной

составляющей базового тока  $I_{б0} = \frac{I_{k0}}{B} = \frac{1,9}{20} \cong 0,1 \text{ А}$ .

При этом параметры делителя обеспечивают и коррекцию частотной зависимости  $K_u$  при закрытом эмиттерном переходе.

Для стабилизации фиксированного смещения при изменении  $U_{omc}$  в диапазоне температур вместо  $R_2$  можно применить диод, изготовленный из того же материала, что и транзистор. При открытом диоде напряжение на нем сохраняется равным  $U_{omc}$  в широком диапазоне изменения внешних условий.

## Расчет выходной согласующей цепи.

В соответствии с заданным сопротивлением нагрузки  $R_n = 50 \text{ Ом}$ .  
Из расчета  $R_k = 3,7 \text{ Ом}$ ; из параметров транзистора  $C_k = 70 \text{ нФ}$ .

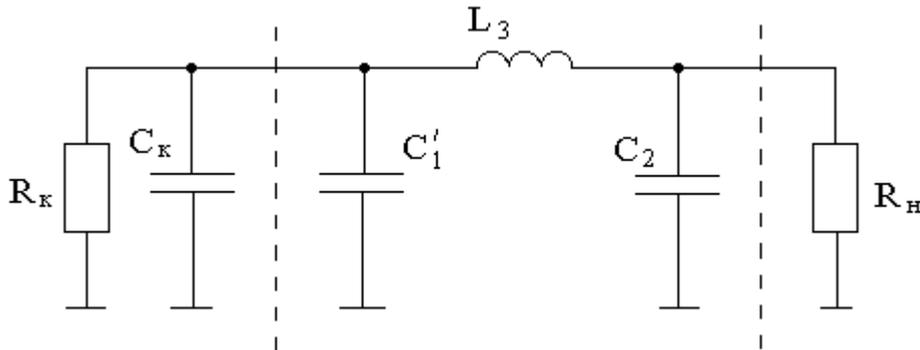


Рис 3. Выходная согласующая цепь мощного усилителя.

Применим для согласования выходного сопротивления генератора с нагрузкой П-образную инвертирующую цепь (рис 3.).

Характеристическое сопротивление согласующей цепи (ЦС)

$$\rho = \sqrt{R_k R_n} = \sqrt{3,7 \cdot 50} = 13,6 \text{ Ом}.$$

Емкости ЦС

$$C_1 = C_2 = \frac{1}{\omega \rho} = \frac{1}{2\pi \cdot 60 \cdot 10^6 \cdot 13,6} = 200 \text{ нФ}$$

С учетом выходной емкости транзистора

$$C_1' = C_1 - C_k = 200 - 70 = 130 \text{ нФ}.$$

Индуктивность ЦС

$$L = \frac{\rho}{\omega} = \frac{13,6}{2\pi \cdot 60 \cdot 10^6} = 36 \text{ нГн}.$$

Коэффициент фильтрации по 2-й гармонике

$$F_2 = \frac{1}{n^2 \left[ \left( \frac{R_k}{R_n} \right)^2 - 2 \frac{R_k}{R_n} + 1 \right]} = \frac{1}{2^2 \left[ \left( \frac{3,7}{50} \right)^2 - 2 \frac{3,7}{50} + 1 \right]} = 0,054$$

$$F_2 \text{ дБ} = 20 \lg F_2 = 20 \lg 0,054 = -25 \text{ дБ}.$$

Для улучшения фильтрации применим усложненный вариант согласующей цепи

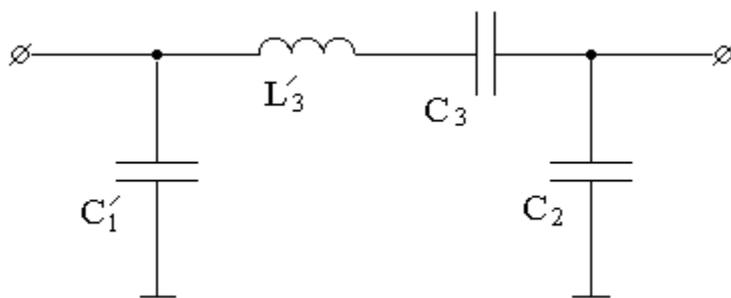


Рис 4. Выходная ЦС с улучшенной фильтрацией.

$$x_3 = x_{3l} + x_{3c} = \rho = 13,6 \text{ Ом.}$$

Задаемся значением коэффициента  $h$

$$h = -\frac{x_{3c}}{x_3} = \zeta; \text{ отсюда } x_{3c} = \zeta \cdot x_3 = 5 \cdot 13,6 = 70 \text{ Ом.}$$

Определяем емкость  $C_3$

$$C_3 = \frac{1}{\omega \cdot x_{3c}} = \frac{1}{2\pi \cdot 60 \cdot 10^6 \cdot 70} = 38 \text{ нФ.}$$

Определяем индуктивность  $L_3$

$$x_3 = \omega \cdot L_3 - \frac{1}{\omega \cdot C_3}; \text{ отсюда } \omega \cdot L_3 = x_3 + \frac{1}{\omega \cdot C_3} = x_3 + x_{3c} = 13,6 + 70 = 83,6 \text{ Ом}$$

$$L_3 = \frac{\omega \cdot L_3}{\omega} = \frac{83,6}{2\pi \cdot 60 \cdot 10^6} = 0,22 \text{ мкГн.}$$

Коэффициент фильтрации по 2-й гармонике

$$F_2 = \frac{1}{n^2 \left\{ \left[ \left( \frac{R_k}{R_n} + 1 \right)^2 - 1 \right] + \frac{R_k}{R_n} \left[ \left( \frac{R_k}{R_n} + 1 \right)^2 - 1 \right] \right\}} =$$

$$= \frac{1}{2^2 \left\{ \left[ \left( \frac{3,7}{50} + 1 \right)^2 - 1 \right] + \frac{3,7}{50} \left[ \left( \frac{3,7}{50} + 1 \right)^2 - 1 \right] \right\}} = \frac{1}{1252};$$

$$F_2 \text{ дБ} = 20 \lg F_2 = 20 \lg \left( \frac{1}{1252} \right) = -62 \text{ дБ.}$$

## Расчет согласующей цепи между выходом предварительного и входной цепью выходного каскада.

Пересчитаем параллельное сопротивление  $R_{нар}$  в сопротивление  $R_{посл}$ , включенное последовательно в контур  $L_{ex}, C_{ex}, R_{ex}$ .

- мощность, расходуемая в параллельном сопротивлении  $p = \frac{1}{2} \frac{U_{\text{э1}}^2}{R_{\text{пар}}}$ ;
- мощность, расходуемая в последовательном сопротивлении  $p = \frac{1}{2} I_{\text{э1}}^2 \cdot R_{\text{посл}}$ ;

Так как эти мощности равны, то:

$$R_{\text{посл}} = \frac{U_{\text{э1}}^2}{I_{\text{э1}}^2} \frac{1}{R_{\text{пар}}} = \frac{2^2}{0,9^2} \cdot \frac{1}{6,5} = 0,76 \text{ Ом.}$$

$$R'_{\text{эс}} = R_{\text{эс}} + R_{\text{посл}} = 1,3 + 0,76 \cong 2,06 \text{ Ом.}$$

$$C_{\text{эс}} = 1200 \text{ пФ.}$$

$$L_{\text{эс}} = 3,6 \text{ нГн.}$$

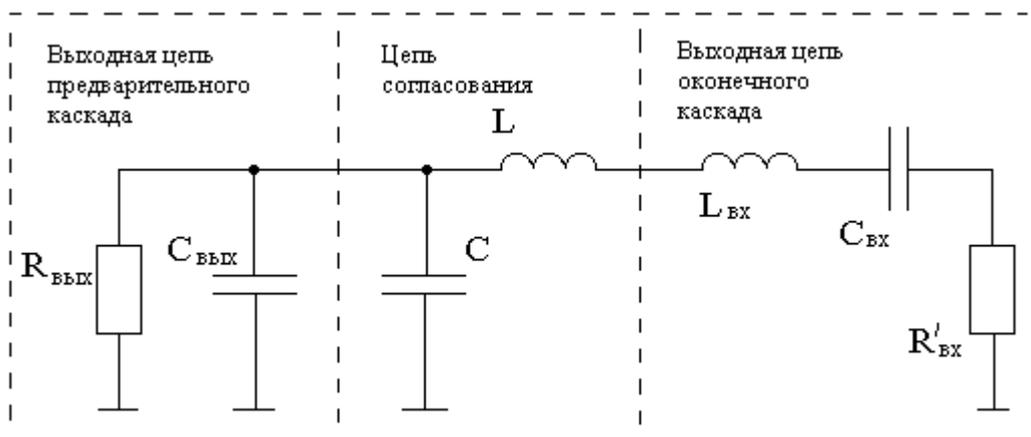
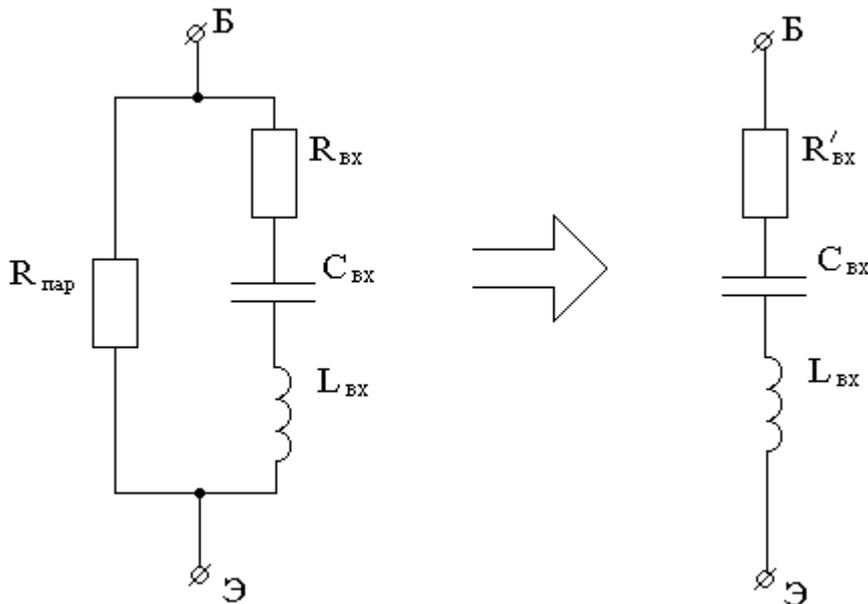


Рис 5. Входная согласующая цепь мощного каскада.

Требуется на заданной частоте преобразовать входное сопротивление мощного транзистора  $Z'_{ex} = R'_{ex} + j\omega \cdot L_{ex} + 1/j\omega \cdot C_{ex}$ , где  $R'_{ex} = R_{ex} + R_{насл}$ , в сопротивление, равному требуемому сопротивлению нагрузки предварительного каскада  $R_{вых} \cong R_k = 40 \text{ Ом}$ , обеспечить гармоническую форму тока на входе транзистора. В качестве входной согласующей цепи применим Г-образный четырехполюсник, включенный как показано на рис.

Определяем добротность согласующей цепи

$$Q = \sqrt{\frac{R_{вых}}{R'_{ex}}} - 1 = \sqrt{\frac{40}{2}} - 1 = 4,36$$

Индуктивность согласующей цепи находим из соотношения

$$X = \omega \cdot L_{ex} = \frac{1}{\omega \cdot C_{ex}} = R'_{ex} \cdot Q; \quad \omega \cdot L_{ex} = R'_{ex} \cdot Q + \frac{1}{\omega \cdot C_{ex}};$$

$$L = \frac{R'_{ex} \cdot Q + \frac{1}{\omega \cdot C_{ex}}}{\omega} - L_{ex} = \frac{2 \cdot 4,36 + \frac{1}{2\pi \cdot 60 \cdot 10^6 \cdot 1200 \cdot 10^{-12}}}{2\pi \cdot 60 \cdot 10^6} - 3,6 \cdot 10^{-9} = 25,4 \text{ нГн}$$

Емкость согласующей цепи находим из соотношения

$$X' = -\frac{1}{\omega \cdot C'} = -\frac{R_{вых}}{Q}; \quad C' = \frac{Q}{R_{вых} \cdot \omega} = \frac{4,36}{40 \cdot 2\pi \cdot 60 \cdot 10^6} = 289 \text{ нФ};$$

$$C' = C_{вых} + C; \quad C = C' - C_{вых} = 289 - 10 = 279 \text{ нФ}; \quad \text{выбираем } C = 270 \text{ нФ}.$$

## Расчет предварительного каскада усиления мощности.

Дано: входная мощность оконечного каскада  $P_{ex.ум} = 0,8 \text{ Вт}$ .

Принимаем к.п.д. цепи согласования  $\eta_{uc} = 0,7$  и определяем колебательную мощность каскада

$$P_1 \geq \frac{P_{ex.ум}}{\eta_{uc}} = \frac{0,8}{0,7} \cong 1,2 \text{ Вт}.$$

Выбираем для предварительного каскада транзистор КТ920А, имеющий допустимую мощность рассеяния на коллекторе  $P_{дон} = 5 \text{ Вт}$ ; параметры транзистора:

- граничная частота усиления по току  $f_i = 600 \text{ МГц}$ ;
- среднее во времени значение коэффициента усиления тока  $B=20$ ;

- крутизна линии граничного режима  $S_{cp} = 0,2 \frac{A}{B}$ ;
- напряжение отсечки  $U_{отс} = 1B$ ;
- емкость эмиттерного перехода  $C_э = 200нФ$ ;
- емкость коллекторного перехода  $C_к = 10нФ$ ;
- допустимое обратное напряжение на базе  $U_{б.дон} = -4B$ ;
- допустимое напряжение на коллекторе  $U_{к.дон} = 36B$ ;
- допустимая высота импульса коллекторного тока  $i_{к.дон} = 1A$ ;
- индуктивность базового вывода  $L_б = 2,4нГн$ ;
- индуктивность эмиттерного вывода  $L_э = 1нГн$ ;

Определяем значение частоты, на которой модуль коэффициента передачи тока  $|\beta|$  уменьшается в  $\sqrt{2}$  раз по сравнению со статическим коэффициентом  $\beta_0$  (в схеме с ОЭ):

$$f_\beta = \frac{f_1}{B} = \frac{600}{20} = 30 \text{ МГц}.$$

Определяем возможную величину напряжения источника питания коллекторной цепи

$$E_n \leq \frac{1}{2} U_{к.дон} = \frac{1}{2} \cdot 36 = 18B.$$

Выбираем угол отсечки коллекторного тока  $\theta = 90^\circ$ ; тогда

$$\alpha_1 \theta = \gamma_1 \theta \quad \theta = \gamma_1 \quad \pi - \theta = 0,5;$$

$$\alpha_0 \theta = \gamma_0 \theta \quad \theta = \gamma_0 \quad \pi - \theta = 0,318;$$

Выбираем высоту импульса коллекторного тока

$$i_{к.макс} \leq (0,8...0,9) \cdot i_{к.дон} = (0,8...0,9) \cdot 1 = 0,8...0,9A;$$

Выбираем  $i_{к.макс} = 0,5A$ .

Граничное значение коэффициента напряженности режима

$$\xi_{cp} = 1 - \frac{i_{к.макс}}{S_{cp} \cdot E_n} = 1 - \frac{0,5}{0,2 \cdot 12,6} = 0,8.$$

Амплитуда 1-й гармоники коллекторного напряжения

$$U_{к1} = \xi_{cp} \cdot E_n = 0,8 \cdot 12,0 = 9,6B.$$

Амплитуда 1-й гармоники коллекторного тока

$$I_{к1} = \alpha_1 \theta \cdot i_{к.макс} = 0,5 \cdot 0,5 = 0,25A.$$

Постоянная составляющая коллекторного тока

$$I_{к0} = \alpha_0 \theta \cdot i_{к.макс} = 0,318 \cdot 0,5 = 0,16A.$$

Колесательная мощность (по 1-й гармонике)

$$P_1 = \frac{1}{2} I_{k1} \cdot U_{k1} = \frac{1}{2} \cdot 0,25 \cdot 9,6 = 1,2 \text{ Вт.}$$

Потребляемая мощность

$$P_0 = I_{k0} \cdot E_n = 0,16 \cdot 12,6 = 2 \text{ Вт.}$$

Мощность, рассеиваемая на коллекторе

$$P_{pac} = P_0 - P_1 = 2 - 1,2 = 0,8 \text{ Вт.}$$

К.п.д. каскада (коллекторной цепи)

$$\eta_e = \frac{P_1}{P_0} = \frac{1,2}{2} \cong 0,6.$$

Амплитуда 1-й гармоники управляющего заряда

$$Q_{y1} = \frac{i_{k,max}}{\omega_i \cos \theta} = \frac{0,5}{2\pi \cdot 0,6 \cdot 10^9 \cdot 0} = 0,13 \cdot 10^{-9} \text{ Кл.}$$

Наименьшее мгновенное значение напряжения на эмиттерном переходе

$$U_{э, min} = U_{omc} - \frac{Q_{y1}}{C_y} (1 - \cos \alpha - \theta) = 1 - \frac{0,13 \cdot 10^{-9}}{200 \cdot 10^{-12}} (1 - 0) = 0,35 \text{ В.}$$

$$|U_{э, min}| = 0,35 \text{ В} < U_{э, доп} = 4 \text{ В.}$$

Постоянная составляющая напряжения на эмиттерном переходе

$$U_{э, 0} = U_{omc} - \gamma_0 \alpha - \theta \frac{Q_{y1}}{C_y} = 1 - 0,318 \frac{0,13 \cdot 10^{-9}}{200 \cdot 10^{-12}} = 0,8 \text{ В.}$$

Сопротивление коллекторной нагрузки

$$R_k = \frac{U_{k1}}{I_{k1}} = \frac{10}{0,25} = 40 \text{ Ом.}$$

Расчетный параметр

$$\delta = 1 + \gamma_1 \theta \omega_i C_k R_k = 1 + 0,5 \cdot 2\pi \cdot 0,6 \cdot 10^9 \cdot 10 \cdot 10^{-12} \cdot 40 = 1,75$$

Амплитуда 1-й гармоники напряжения на эмиттерном переходе

$$U_{э, 1} = \gamma_1 \alpha - \theta \frac{Q_{y1}}{C_y} = 0,5 \frac{0,13 \cdot 10^{-9}}{200 \cdot 10^{-12}} = 0,325 \text{ В.}$$

Амплитуда 1-й гармоники базового тока

$$I_{б1} = \omega \cdot Q_{y1} \cdot \delta = 2\pi \cdot 60 \cdot 10^6 \cdot 0,13 \cdot 10^{-9} \cdot 1,75 = 0,086 \text{ А.}$$

Сопротивление корректирующего резистора

$$R_3 = \frac{1}{\omega_\beta \cdot C_3} = \frac{1}{2\pi \cdot 30 \cdot 10^6 \cdot 200 \cdot 10^{-12}} = 26 \text{ Ом.}$$

Мощность потерь на корректирующем резисторе

$$P'_{\text{ex}} = \frac{1}{2} \cdot \frac{\gamma_1 \cdot \sin \theta}{R_3} \cdot \frac{Q^2_{y1}}{C_3^2} = \frac{1}{2} \cdot \frac{0,5}{26} \cdot \frac{0,13 \cdot 10^{-9}}{200 \cdot 10^{-12}} = 4 \text{ мВт.}$$

Активная часть входного сопротивления

$$R_{\text{ex}} = \frac{1}{\delta} \cdot \gamma_1 \cdot \sin \theta \cdot \omega_t \cdot L_3 = \frac{1}{1,75} \cdot 0,5 \cdot 2\pi \cdot 0,6 \cdot 10^9 \cdot 10^{-9} = 1,1 \text{ Ом.}$$

Часть входной мощности, обусловленной потерями на  $R_{\text{ex}}$

$$P''_{\text{ex}} = \frac{1}{2} \cdot I_{\delta 1}^2 \cdot R_{\text{ex}} = \frac{1}{2} \cdot 0,086^2 \cdot 1,1 \cong 4 \text{ мВт.}$$

Суммарная входная мощность каскада

$$P_{\text{ex}} = P'_{\text{ex}} + P''_{\text{ex}} = 4 + 4 = 8 \text{ мВт.}$$

Коэффициент усиления по мощности

$$K_p = \frac{P_1 + P''_{\text{ex}}}{P_{\text{ex}}} = \frac{1,2 + 0,004}{0,008} = 150$$

Входная индуктивность

$$L_{\text{ex}} = L_\delta + \frac{L_3}{\delta} = 2,4 + \frac{1}{1,75} = 3 \text{ нГн.}$$

Входная емкость

$$C_{\text{ex}} = \delta \cdot \frac{C_3}{\gamma_1 \cdot \sin \theta} = \frac{1,75 \cdot 200 \cdot 10^{-12}}{0,5} = 700 \text{ пФ.}$$

Сопротивление, шунтирующее входную цепь

$$R_{\text{пар}} = \gamma_1 \cdot \sin \theta \cdot R_3 = 0,5 \cdot 26 = 13 \text{ Ом.}$$

## Расчет автогенератора.

Выбираем транзистор малой мощности типа КТ316Б; его параметры:

- Граничная частота усиления по току  $f_t = 0,8 \text{ ГГц}$ ;
- Среднее во времени значение коэффициента усиления тока  $\beta = 20$ ;
- крутизна линии граничного режима  $S_{gp} = 20 \text{ мА/В}$ ;

- напряжение отсечки  $U_{отс} = 0,6B$ ;
- емкость коллекторного перехода  $C_{\kappa} = 3n\Phi$ ;
- емкость эмиттерного перехода  $C_{\gamma} = 2,5n\Phi$ ;
- постоянная времени цепи обратной связи  $\tau_{oc} = 150нс$ ;
- допустимое обратное напряжение на базе  $U_{б.дон} = 4B$ ;
- допустимое напряжение на коллекторе  $U_{\kappa.дон} = 10B$ ;
- допустимый коллекторный ток  $i_{\kappa.дон} = 3мА$ ;
- допустимая мощность рассеяния на коллекторе  $P_{дон} = 150мВт$ .

Активная часть емкости коллекторного перехода  
 $C_{\kappa а} = 0,5C_{\kappa} = 0,5 \cdot 3 = 1,5n\Phi$ .

Сопротивление базы

$$r_b = \frac{\tau_{oc}}{C_{\kappa а}} = \frac{150 \cdot 10^{-12}}{1,5 \cdot 10^{-12}} = 100 Ом.$$

Граничные частоты

$$f_{\beta} = \frac{f_t}{B} = \frac{800}{20} = 40 МГц; \quad f_{\alpha} = f_t + f_{\beta} = 800 + 40 = 840 МГц.$$

## Расчет элементов эмиттерной коррекции.

Сопротивление корректирующей цепочки.

$$R_{кор} = 3 \cdot 5 \cdot \frac{r_b}{B} \sqrt{1 + \left(\frac{f}{f_{\beta}}\right)^2} = (3 \cdot 5) \frac{100}{20} \sqrt{1 + \left(\frac{60}{40}\right)^2} = (3 \cdot 5) 9 = 27 \cdot 36 \cdot 45 \Rightarrow 36 Ом.$$

Дополнительное сопротивление базовой коррекции

$$R_3 = \frac{1}{\omega_t \cdot C_{\gamma}} = \frac{1}{2\pi \cdot 0,8 \cdot 10^9 \cdot 2,5 \cdot 10^{-12}} = 80 Ом.$$

Емкость корректирующей цепочки

$$C_{кор} = \frac{1}{\omega_{\alpha} \cdot R_{кор}} = \frac{1}{2\pi \cdot 0,84 \cdot 10^9 \cdot 36} = 5,1n\Phi.$$

Сопротивление упрощенной эмиттерной коррекции

$$R'_{кор} = \frac{R_{кор} \cdot R_3}{R_{кор} + R_3} = \frac{36 \cdot 80}{36 + 80} = 24,8 Ом; \quad \text{выбираем } R'_{кор} = 24 Ом.$$

Крутизна переходной характеристики транзистора с коррекцией

$$S^k = \frac{1}{R'_{kop}} = \frac{1}{24} = 42 \frac{mA}{B}.$$

## Расчет режима транзистора в автогенераторе.

Выбираем высоту импульса коллекторного тока

$$i_{k,max} \leq 0.8i_{k,дон} = 0.8 \cdot 30 = 24 mA$$

Выбираем постоянное напряжение на коллекторе

$$U_{ко} = (0.3...0.5)U_{к,дон} = (0.3...0.5)10 = 3...5B; \text{ выбираем } U_{ко} = 4 B.$$

Выбираем угол отсечки  $\theta = 60^\circ$ , тогда

$$\alpha_0 = 0,218; \alpha_1 = 0,319; \gamma_0 = 0,109; \cos\theta = 0,5.$$

Выбираем коэффициент обратной связи  $K_{oc} = 1$ .

Амплитуда 1-й гармоники коллекторного тока

$$I_{к1} = \alpha_1 I_{к,max} = 0,391 \cdot 24 = 9,4 mA$$

Постоянная составляющая коллекторного тока

$$I_{к0} = \alpha_0 I_{к,max} = 0,218 \cdot 24 = 5,2 mA$$

Переменное напряжение на базе (амплитуда 1-й гармоники)

$$U_{б1}^k = \frac{i_{к,max}}{S^k (1 - \cos \theta)} = \frac{24}{42(1 - 0,5)} = 1,1B$$

Амплитуда 1-й гармоники напряжения на коллекторе

$$U_{к1} = \frac{U_{б1}^k}{K_{oc}} = \frac{1,1}{1} = 1,1B$$

Сопротивление коллекторной нагрузки

$$R_k = \frac{U_{к1}}{I_{к1}} = \frac{1,1}{9,4 \cdot 10^{-3}} = 117 Ом$$

Мощность 1-й гармоники

$$P_1 = \frac{1}{2} U_{к1} I_{к1} = \frac{1}{2} 1,1 \cdot 9,4 \cdot 10^{-3} = 5,2 мВт$$

Потребляемая мощность

$$P_0 = U_{ко} I_{к0} = 4 \cdot 5,2 \cdot 10^{-3} = 20,8 мВт$$

Мощность, рассеиваемая на коллекторе

$$P_{pac} = P_0 - P_1 = 20,8 - 5,2 = 15,6 \text{ мВт} < P_{доп}$$

КПД коллекторной цепи

$$\eta_e = \frac{P_1}{P_0} = \frac{5,2}{20,8} = 0,25$$

Напряжение смещение

$$E_{см} = U_{\delta 1}^k \cos \theta = 0,6 - 1,1 \cdot 0,5 = 0,05 \text{ В}$$

$$\text{Проверка: } |E_{см} - U_{\delta 1}^k| = |0,05 - 1,1| = 1,05 < U_{\delta.доп}$$

Коэффициенты напряженности режима

$$\xi = \frac{U_{к1}}{U_{к0}} = \frac{1,1}{4} = 0,275; \quad \xi_{zp} = 1 - \frac{i_{к.макс}}{S_{zp} \cdot U_{к0}} = 1 - \frac{24}{20 \cdot 4} = 0,7; \quad \xi < 0,5 \xi_{гр}$$

## Расчет колебательной системы автогенератора.

Выбираем индуктивность контура и её добротность

$$L = 1 \text{ мкГн}; \quad Q = 120$$

Характеристическое сопротивление контура

$$\rho = \omega \cdot L = 2\pi \cdot 60 \cdot 10^6 \cdot 1 \cdot 10^{-6} = 377 \text{ Ом}$$

Суммарная емкость контура

$$C_{\Sigma} = \frac{1}{\omega \cdot \rho} = \frac{1}{2\pi \cdot 60 \cdot 10^6 \cdot 377} = 7 \text{ нФ.}$$

Эквивалентное резонансное сопротивление контура

$$R_p = \rho \cdot Q = 377 \cdot 120 = 43 \text{ кОм}$$

Коэффициент включения контура в коллекторную цепь

$$p = \sqrt{\frac{R_k}{R_p}} = \sqrt{\frac{117}{43 \cdot 10^3}} = 0,052$$

Емкость контура со стороны коллекторной цепи

$$C_2' = \frac{C_{\Sigma}}{p} = \frac{7}{0,052} = 135 \text{ нФ.}$$

Емкость контура со стороны базовой цепи

$$C_1 = \frac{C_2'}{K_{oc}} = \frac{135}{1} = 135 \text{ нФ.} \quad \text{выбираем } C_1 = 130 \text{ пФ.}$$

Емкость контура в коллекторно-базовой цепи (последовательно с индуктивностью).

$$C_3 = \left( \frac{1}{C_\Sigma} + \frac{1}{C_1} + \frac{1}{C_2'} \right)^{-1} = \left( \frac{1}{7} + \frac{1}{130} + \frac{1}{135} \right)^{-1} = 7,8 \text{ нФ}; \text{ выбираем } C_3 = 7,5 \text{ пФ}.$$

Этот конденсатор берем типа КПК для подстройки контура. Чтобы сопротивление нагрузки  $R'_H$ , пересчитанное к выходным электродам транзистора, не снижало заметно добротность контура, принимаем

$$R'_H = 3 \cdot R_K = 3 \cdot 117 \cong 300 \text{ Ом}.$$

Добротность последовательной цепочки  $C_{св} R_H$

$$Q = \sqrt{\frac{R'_H}{R_H} - 1} = \sqrt{\frac{300}{50} - 1} = 2,24; \quad Q^2 = 5$$

Емкость связи генератора с нагрузкой

$$C_{св} = \frac{1}{\omega \cdot R_H Q} = \frac{1}{2\pi \cdot 60 \cdot 10^6 \cdot 50 \cdot 2,24} = 24 \text{ нФ}$$

Емкость, пересчитанная параллельно емкости  $C_2$

$$C'_{св} = \frac{C_{св}}{1 + \frac{1}{Q^2}} = \frac{241}{1 + \frac{1}{5}} = 20 \text{ нФ}.$$

Емкость контура в коллекторной цепи

$$C^2 = C_2' - C'_{св} = 135 - 20 = 115 \text{ нФ};$$

Выбираем  $C_2 = 120 \text{ пФ}$ .

## Расчет цепи питания.

Блокировочное сопротивление

$$R_{\text{бл}} = 5R_K = 5 \cdot 117 = 585 \text{ Ом}; \text{ выбираем } R_{\text{бл}} = 620 \text{ Ом}.$$

Блокировочная емкость

$$C_{\text{бл}} = \frac{1}{\omega \cdot X_{e.\text{бл}}} = \frac{1}{2\pi \cdot 60 \cdot 10^6 \cdot 0,1} = 27 \text{ нФ}; \text{ выбираем } X_{c.\text{бл}} = 0,1 \text{ Ом}$$

Напряжение источника питания

$$E_n = U_{\kappa 0} + I_{\kappa 0} R_{\text{бл}} = 4 + 5,2 \cdot 10^{-3} \cdot 620 = 7,2 \text{ В}$$

## Расчет цепи смещения.

Составляющие комбинированной схемы смещения

$$U_{\delta} = \frac{R_2}{R_1 + R_2} E_n; \quad R_{уст} = \frac{R_1 R_2}{R_1 + R_2};$$
$$U_{см} = \frac{R_2}{R_1 + R_2} E_n - I_{30} R_{см} - I_{\delta 0} \frac{R_1 R_2}{R_1 + R_2}$$

Напряжение источника фиксированного смещения (от делителя напряжения источника питания)

$$U_{\delta} = E_{см} + \frac{3I_{к0}}{S^k} \left[ 1 + \frac{\cos \theta}{\gamma_0} \right] = 0,05 + \frac{3 \cdot 5,2 \cdot 10^{-3}}{42 \cdot 10^{-3}} \left[ 1 + \frac{0,5}{0,109} \right] = 1,76 B$$

Сопротивление источника фиксированного смещения

$$R_{уст} = \frac{3 \cdot B}{4 \cdot S^k} \left[ 1 + \frac{\cos \theta}{\gamma_0} \right] = \frac{3 \cdot 20}{4 \cdot 0,042} \left[ 1 + \frac{0,5}{0,109} \right] = 2 кОм$$

Проверка

$$\left( \frac{C_{\Sigma}}{C_1} \right)^2 R_p = \left( \frac{7}{130} \right)^2 43 \cdot 10^3 = 124 Ом \ll R_{уст} = 2 кОм.$$

Сопротивление автосмещения в эмиттерной цепи

$$R_{см} = \frac{3R_{уст}}{B} = \frac{3 \cdot 2 \cdot 10^3}{20} = 300 Ом.$$

Параметры делителя напряжения

$$R_1 = R_{уст} \frac{E_n}{U_{\delta}} = 2 \cdot 10^3 \frac{7,2}{1,76} = 8,2 кОм; \text{ выбираем } R_1 = 8,2 \text{ кОм.}$$

$$R_2 = R_1 \frac{U_{\delta}}{E_n - U_{\delta}} = 8,2 \frac{1,76}{7,2 - 1,76} = 2,65 кОм; \text{ выбираем } R_2 = 8,2 \text{ кОм.}$$

Блокировочная емкость в цепи автосмещения

$$C_{\delta 12} \geq \frac{10}{\omega \cdot R_{см}} = \frac{10}{2\pi \cdot 60 \cdot 10^6 \cdot 300} = 88 нФ; \text{ выбираем } C_{\delta 12} = 100 \text{ пФ.}$$

## Выбор варикапа и расчет его режима.

Выбираем варикап КВ 114А; его параметры:

- пределы изменения емкости  $C_{\min} \dots C_{\max} = 54,4 \dots 81,6 \text{ пФ}$ ;
- добротность  $Q = 300$  при  $f = 50 \text{ МГц}$

- допустимое обратное напряжение  $U_{\text{доп}}=150 \text{ В}$ ;
- степень нелинейности вольт-фарадной характеристики  $\nu=\frac{1}{2}$ .

Задаемся параметрами модуляции:

- относительная девиация частоты  $\frac{\Delta\omega}{\omega} = 0,5 \cdot 10^{-3}$ .
- полоса модуляции частот  $300 \dots 3400 \text{ Гц}$ ;
- коэффициент гармоник  $K_{\Gamma} = 5\%$ .

Средняя емкость варикапа и напряжение смещения

$$C_{\text{ср}} = \frac{C_{\text{min}} + C_{\text{max}}}{2} = \frac{54,5 + 81,6}{2} = 68 \text{ нФ. при } U_{\text{во}} = 4 \text{ В.}$$

Относительное изменение емкости варикапа

$$\frac{\Delta C_{\text{ср}}}{C_{\text{ср}}} = \frac{4\nu}{\nu+1} K_{\Gamma} = \frac{4 \cdot 0,5}{0,5+1} \cdot 0,05 = 0,067.$$

Коэффициент вклада варикапа в суммарную емкость контура

$$K_{\text{с}} = \frac{2\Delta\omega / \omega}{\Delta C_{\text{ср}} / C_{\text{ср}}} = \frac{2 \cdot 0,5 \cdot 10^{-3}}{0,067} = 0,015.$$

Нормированная амплитуда низкочастотных колебаний на варикапе

$$U'_{\Omega} = \frac{U_{\Omega}}{\varphi_k + U_{\text{во}}} = \frac{4}{\nu+1} K_{\Gamma} = \frac{4}{0,5+1} \cdot 0,05 = 0,13.$$

Коэффициент включения варикапа в контур

$$p_{\text{с}} = \sqrt{K_{\text{с}} \frac{C_{\Sigma}}{C_{\text{ср}}}} = \sqrt{0,015 \frac{7}{68}} = 0,039.$$

Амплитуда низкочастотного напряжения на варикапе

$$U_{\Omega} = U'_{\Omega} \varphi_k + U_{\text{во}} = 0,13 \cdot 0,7 + 4 = 0,6 \text{ В.}$$

Амплитуда 1-й гармоники высокочастотного напряжения на варикапе

$$U_{\text{с1}} = p_{\text{с}} \frac{U_{\text{к1}}}{p} = 0,039 \frac{1,1}{0,052} = 0,83 \text{ В.}$$

Емкость связи

$$C_{\text{ос}} = \frac{U_{\text{с1}}}{U_{\text{с1}} - U_{\text{во}}} C_{\text{ср}} = \frac{0,83}{1,1 - 0,83} = 209 \text{ нФ,}$$

Выбираем  $C_{\text{св}}$

Расчет цепи смещения варикапа (питание от источника  $E_{\text{п}}$  автогенератора)

$$U_{\text{во}} = E_n \frac{R_2}{R_1 + R_2} = 4B;$$

Выбираем  $R_1 = 5,6 \text{ кОм}$ ; тогда

$$R_2 = \frac{U_{\text{во}}}{E_n - U_{\text{во}}} R_1 = \frac{4}{7,2 - 4} 5,6 = 7 \text{ кОм}; \text{ выбираем } R_2 = 6,8 \text{ кОм}.$$