

Министерство образования Республики Беларусь

Учреждение образования  
**БЕЛОРУССКИЙ ГОСУДАРСТВЕННЫЙ УНИВЕРСИТЕТ  
ИНФОРМАТИКИ И РАДИОЭЛЕКТРОНИКИ**

Факультет компьютерного проектирования

Кафедра электронной техники и технологии

**ПОЯСНИТЕЛЬНАЯ ЗАПИСКА**

к курсовому проекту  
на тему

**УНИВЕРСАЛЬНЫЙ УСИЛИТЕЛЬ СИГНАЛА ЗВУКОВОЙ  
ЧАСТОТЫ**

Студент

Руководитель

В. А. Кузниченков

М. Ф. Федоринчек

Минск 2014

# 1 РАЗРАБОТКА СТРУКТУРНОЙ СХЕМЫ

## 1.1 Анализ технического задания

Выбор структурной схемы усилителя определяется рядом параметров и условиями эксплуатации. Количество каскадов определяется величиной входного и выходного сигналов, выбор источника питания, радиоэлементов и основ построения схемы производится с учетом предназначения устройства, требований к сложности, условий эксплуатации.

Исходные данные:

- $P_{\text{н}} = 8$  (Вт) – номинальная выходная мощность
- $R_{\text{н}} = 2$  (Ом) – сопротивление нагрузки
- $E_{\text{г}} = 45$  (мВ) – ЭДС источника сигнала
- $R_{\text{г}} = 10$  (кОм) – внутреннее сопротивление источника сигнала
- $K_{\text{г}} = 1$  (%) – допустимый коэффициент гармоник
- $f_{\text{н}} = 10$  (Гц) – нижняя предельная частота
- $f_{\text{в}} = 18$  (кГц) – верхняя предельная частота
- $M = 3$  (дБ) – неравномерность АЧХ в полосе
- $\Delta b_{\text{г}} = \pm 14$  (дБ) – пределы регулировки тембра
- $T_{\text{мах}}^{\circ} = 40$  ( $^{\circ}\text{C}$ ) – максимальное значение температуры окружающей среды
- Регулировка громкости – плавная
- Вид аппаратуры – автомобильная
- Группа сложности – 0

Структурная схема усилителя сигналов звуковой частоты:

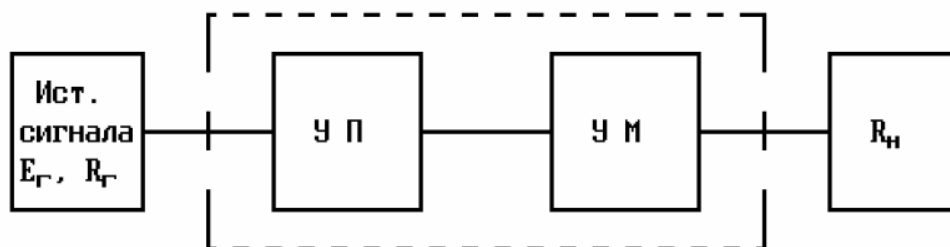


Рисунок 1.1 — Упрощенная структурная схема усилителя

Предварительный усилитель (УП) осуществляет усиление сигнала по напряжению до уровня, необходимого для работы усилителя мощности (УМ). Кроме того, в УП осуществляются оперативные регулировки уровня сигнала (громкости) и тембра (коррекция АЧХ).

Усилитель мощности обеспечивает основное усиление мощности до уровня, заданного в ТЗ.

## 1.2 Определение числа каскадов

### 1.2.1 Номинальный сквозной коэффициент передачи:

$$K_E = \frac{U_H}{E_T} = \frac{\sqrt{P_H R_H}}{E_T} \quad (1.1)$$

$$K_E = \frac{\sqrt{8 \cdot 2}}{0.045} = 88.889$$

### 1.2.2 Запас усиления для обеспечения заданных характеристик усилителя:

1) Запас на введение ООС, численно равный глубине обратной связи:

$$F \geq \frac{K_{Г\text{ок}}}{K_T} \quad (1.2)$$

$$F \geq \frac{0.15}{0.01} = 15.0$$

где  $K_{Г\text{ок}} = 15 \dots 20\%$  – коэффициент гармоник окончного двухтактного каскада без ООС.

2) Запас на регулировку тембра, определяемый коррекцией частотной характеристика:

$$m \geq 10^{|\Delta b_T|/20} \quad (1.3)$$

$$m \geq 10^{|\pm 14.0|/20} = 5.012$$

3) Технический запас, учитывающий разброс параметров компонентов:

$$K_3 = 1,5 \dots 2$$

### 1.2.3 Требуемый сквозной коэффициент усиления:

$$K_{\text{Е тр}} \geq K_{\text{Е}} \cdot F \cdot m \cdot K_3 \quad (1.4)$$

$$K_{\text{Е тр}} \geq 88,889 \cdot 14 \cdot 5,012 \cdot 2 \geq 13364,9$$

### 1.2.4 Определяем число каскадов усиления по напряжению

$$n \geq \frac{\lg(K_{\text{Е тр}})}{\lg(K_n)} \quad (1.5)$$

где  $K_n = 30 \dots 40$  – усредненный коэффициент усиления по напряжению для одного каскада.

$$n \geq \frac{\lg(13364,9)}{\lg(35)} \geq 2,67 \approx 3$$

### 1.2.5 Входное сопротивление каскада предварительного усилителя:

$$R_{\text{вх}} \geq (5 \dots 10) R_{\text{Г}} \quad (1.6)$$

$$R_{\text{вх}} \geq 7 \cdot 10 \cdot 10^3 = 70 \text{ кОм}$$

В связи с величиной  $R_{\text{вх}}$  на входе усилителя желательно включить дополнительный согласующих каскад по схеме с общим истоком.

На рис. 1.2 РУ – регулятор усиления; СК – согласующий каскад; КПУ – каскад предварительного усиления; РТ – регулятор тембра; ВК – входной каскад усилителя мощности (УМ); ПОК – предоконечный каскад УМ; ОК – окончательный каскад УМ; ООС – цепь обратной связи УМ; БП – блок питания; ФП – фильтр питания.

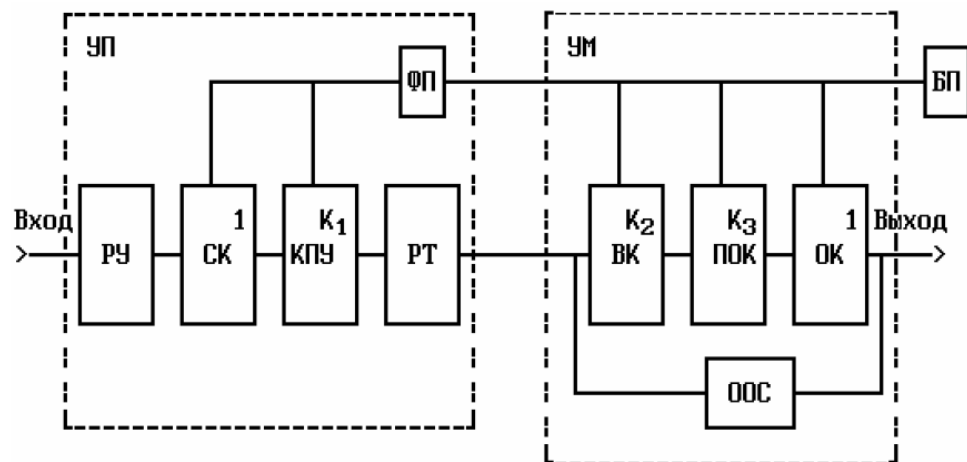


Рисунок 1.2 — Структурная схема усилителя сигналов звуковой частоты



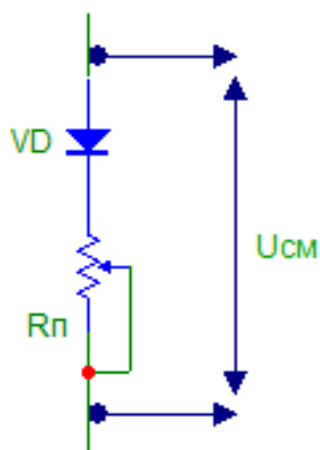


Рисунок 2.2 — Схема цепи термостабилизации на диоде

такт с радиатором, на котором установлены выходные транзисторы, иначе термостабилизации попросту не будет. Данная схема обеспечивает достаточную температурную стабильность в диапазоне температур  $0 \dots +40^{\circ}\text{C}$ .

## 2.3 Расчет оконечного каскада

### 2.3.1 Определяем амплитуду напряжения и тока на нагрузке

$$U_{\text{нм}} = \sqrt{2P_{\text{н}}R_{\text{н}}} \quad (2.1)$$

$$U_{\text{нм}} = \sqrt{2 \cdot 8 \cdot 2} = 5.66 \text{ В}$$

$$I_{\text{км}} = I_{\text{нм}} = \frac{U_{\text{нм}}}{R_{\text{н}}} \quad (2.2)$$

$$I_{\text{км}} = I_{\text{нм}} = \frac{5.66}{2} = 2.83 \text{ А}$$

### 2.3.2 Определяем напряжения источника питания:

$$E_0_{\text{расч}} > 2(U_{\text{нм}} + U_{\text{ост}}) \quad (2.3)$$

где  $U_{\text{ост}} = 1 \dots 3 \text{ В}$  – остаточное напряжение на полностью открытом транзисторе выходного.

$$E_{0 \text{ расч}} > 2(5.66 + 2) = 15.31 \text{ В}$$

Для обеспечения стабильности работы транзистора в неопределённом режиме работы, его основные параметры выбираются с запасом 10-30%.

$$E_0 \geq (1, 1 \dots 1, 2) \cdot E_{0 \text{ расч}} \quad (2.4)$$

$$E_0 > (1, 1 \cdot 15.31) = 16.85 \approx 17 \text{ В}$$

### 2.3.3 Максимальная мощность, рассеиваемая на коллекторах выходных транзисторов:

$$P_{\text{к } 4,5} = \frac{E_0^2}{4\pi^2 R_{\text{н}}} \quad (2.5)$$

$$P_{\text{к } 17.0} = \frac{2^2}{4 \cdot 2 \cdot \pi^2} = 3.66 \text{ Вт}$$

### 2.3.4 Желаемый коэффициент усиления по току $h_{21}$ для выходных транзисторов:

$$h_{21 \text{ } 4,5} \geq \frac{P_{\text{н}}}{P_{\text{п}}} \quad (2.6)$$

где  $P_{\text{п}} = 10 \dots 20 \text{ мВт}$  – выходная мощность предоконечного каскада, работающего в режиме А.

$$h_{21 \text{ } 8.0} \geq \frac{8}{0,02} = 400$$

Для получения в транзисторе такого  $h_{21}$  используют составные транзисторы или транзисторы Дарлингтона, у которых  $h_{21}$  итоговый равен произведению каждого из них.



**2.3.5 Выбираем транзисторы оконечного каскада (VT4, VT5, см рис. 2.1) по следующим параметрам :**

$$P_{\text{к доп}} \geq (1, 1 \dots 1, 2) P_{\text{к } 4,5} \quad (2.7)$$

$$P_{\text{к доп}} \geq 1, 1 \cdot 3.66 = 4.026 \text{ Вт}$$

$$I_{\text{к доп}} \geq (1, 1 \dots 1, 3) I_{\text{нм}} \quad (2.8)$$

$$I_{\text{к доп}} \geq 1, 1 \cdot 2.83 = 3.111 \text{ А}$$

$$U_{\text{кэ доп}} \geq (1, 1 \dots 1, 3) E_0 \quad (2.9)$$

$$U_{\text{кэ доп}} \geq 1, 1 \cdot 17 = 18.7 \text{ В}$$

$$h_{21} \geq h_{21 \text{ } 4,5} = h_{21 \text{ треб}} \quad (2.10)$$

$$h_{ext218.0} \geq \frac{8}{0,02} = 400$$

$$f_{h_{21}} \geq (2 \dots 5) f_{\text{в}} \quad (2.11)$$

$$f_{h_{21}} \geq 2 \cdot 18000 = 36 \text{ кГц}$$

Таблица 2.1 — Характеристики выбранных транзисторов в ОК

	тип	$I_{\text{км}}, \text{ А}$	$U_{\text{кэ}}, \text{ В}$	$P_{\text{к}}, \text{ Вт}$	$h_{21\text{min}}$	$h_{21\text{max}}$	$f_{\text{гр}}, \text{ МГц}$
КТ972Б	n-p-n	4	45	8	750	-	250
КТ973Б	p-n-p	4	45	8	750	-	250

### 2.3.6 Расчет параметров радиатора:

В условиях мощных транзисторов, работающих с мощностями на коллекторе  $P_k \geq 1,5$ , необходимо применение радиатора, обеспечивающий отвод тепла, выделяемого на коллекторном переходе, в окружающую среду.

$$R_{t\text{ кс}} = \frac{t_{\text{Пм}} - t_{\text{См}}}{P_k} - R_{t\text{ пк}} \quad (2.12)$$

$$S = \frac{1400}{R_{t\text{ кс}}} \quad (2.13)$$

$$\text{КТ972Б: } R_{t\text{ кс}} = \frac{135 - 40}{3.66} - 15,6 = 10.35 \text{ (C/Вт)}. S = 135 \text{ (см}^2\text{)} \quad (2.14)$$

$$\text{КТ97Б: } R_{t\text{ кс}} = \frac{150 - 40}{3.66} - 15,6 = 14.45 \text{ (C/Вт)}. S = 97 \text{ (см}^2\text{)} \quad (2.15)$$

### 2.3.7 Рабочие параметры транзистора:

$$I_0 = \frac{I_{\text{нм}}}{\pi} = \frac{2.83}{3.14} = 0.9 \text{ А} \quad (2.16)$$

$$P_0 = I_0 \cdot E_0 = 0.9 \cdot 17 = 15.3 \text{ Вт} \quad (2.17)$$

$$\eta = \frac{P_{\text{н}}}{P_0} = \frac{8}{15.31} = 52.27 \% \quad (2.18)$$

### 2.3.8 Входное сопротивление:

При протекании в эмиттерной цепи большого тока ( $I_0 = 0,9 \text{ А}$ ) входное сопротивление самого транзистора оказывается достаточно малым:

$$h_{11} = \frac{(1 + h_{21}) \cdot \psi_T}{I_0} = 11.13 \text{ Ом.} \quad (2.19)$$

Основной вклад во входное сопротивление вносит ООС:

$$R_{\text{вх}} = h_{11} + (1 + h_{21})R_{\text{н}} \quad (2.20)$$

При этом сопротивлениями  $R_9$  и  $R_{10}$  можно пренебречь ввиду их малости.

$$R_{\text{вх}} = (1 + h_{21})R_{\text{н}} = (1 + 400) \cdot 2 = 813.13 \text{ Ом.}$$

### 2.3.9 Выбор резисторов R9 и R10:

Резисторы R9 и R10 обеспечивают местную обратную связь, за счет которой происходит выравнивание параметров транзистора оконечного каскада, увеличение полосы пропускания.

$$R_9 = R_{10} = (0.05 \dots 0.1) R_{\text{н}} \quad (2.21)$$

$$R_9 = R_{10} = 0.1 \cdot 2 = 0.200$$

При этом номинальные значения сопротивлений резисторов выбираются из справочника.

### 2.3.10 Расчет ёмкости конденсатора $C_{pn}$ :

$$C_{pn} = \frac{1}{2\pi f_{\text{н}} R_{\text{н}} \sqrt{M^2 - 1}} \quad (2.22)$$

$$C_{pn} = \frac{1}{2\pi \cdot 10 \cdot 2\sqrt{3^2 - 1}} = 7.893 \text{ мФ}$$

### 2.3.11 Итоговые данные транзисторов оконечного каскада:

Таблица 2.2 — Параметры выбора транзистора

	тип	$P_{\text{к}}$ доп, Вт	$I_{\text{к}}$ доп, А	$U_{\text{к}}$ доп, В	$h_{21}$	$f_{h_{21}}$ , кГц
VT4	n-p-n	3.66	3.11	19	400	36.00
VT5	p-n-p	3.66	3.11	19	400	36.00

Таблица 2.3 — Режимы работы транзисторов

	тип	$P_{\text{к}}$ доп, Вт	$I_{\text{к}}$ доп, А	$U_{\text{к}}$ доп, В	$h_{21}$	$f_{h_{21}}$ , кГц
VT4	n-p-n	3.66	3.11	19	400	36.00
VT5	p-n-p	3.66	3.11	19	400	36.00

В цепи окончного каскада для устранения нелинейных искажений в выходном сигнале, на базы транзисторов VT4 и VT5 подается небольшое смещение. В результате чего транзистор приоткрывается, и выходная характеристика делается более линейной.

Напряжение смещения определим:

$$U_{CM} = U_{БЭ4} + U_{БЭ5} = 1.2 \quad (2.23)$$

При изменении напряжения смещения базы при увеличении температуры, происходит изменение тока базы, который приведет к изменению тока коллектора, связанного с током базы через  $h_{21}$ . В результате рабочая точка дестабилизируется. Для стабилизации в цепь базы транзисторов VT4 и VT5 включает термозависимые элементы, которые с изменением смещения напряжения базы изменяют свою проводимость и тем самым происходит стабилизация рабочей точки.

## 2.4 Расчет предоконечного каскада

Предоконечный каскад, как и входной, являются усилителями напряжения до уровня, необходимого в непосредственном усилителе мощности, выполненном на окончном каскаде, а также для согласования входного сигнала с входом окончного каскада. Поэтому в предоконечном каскаде не ставится задача усиления мощности и он работает в режиме А, с КПД порядка 25%. В этом режиме ток в выходной цепи протекает в период всего действия сигнала. Режим А дает возможность получения максимальной амплитуды выходного сигнала с минимальными искажениями. Воздействие на низкоомную нагрузку  $R_H$  сигнала большой амплитуды приводит к значительному увеличению КПД усилителя и его мощности. За счет включения в коллекторную цепь предоконечного каскада, выполненного по схеме с общим эмиттером, динамической нагрузки получаем большой коэффициент усиления по напряжению.

Каскад охвачен местной положительной ОС, что дает возможность увеличения коэффициента усиления  $K$ , но уменьшения полосы пропускания.

Таким образом, основные особенности каскада предварительного усиления в том, что за счет работы в режиме А, он обеспечивает минимальные искажения, при достаточно усилении амплитуды сигнала. Включение в вы-

ходную цепь динамического сопротивления позволяет увеличить коэффициент усиления  $K$  в десятки раз.

#### 2.4.1 Ток покоя транзистора VT3:

$$I_{O\text{ КЗ}} = (2 \dots 3) \cdot I_{B\text{ м4}} = (2 \dots 3) \cdot I_{\text{НМ}}/h_{21\text{ экв}} \quad (2.24)$$

$$I_{O\text{ КЗ}} = \frac{2.5 \cdot 2.83}{400} = 0.02$$

#### 2.4.2 Выбор резистора R7:

$$R_7 = (30 \dots 50) \cdot R = 40 \cdot 2 = 80 \text{ Ом} \quad (2.25)$$

Резистор  $R_7$  включается в цепь для того, чтобы не закорачивать источник питания конденсатором  $C_3$ , обеспечивающим включение в выходную цепь транзистора динамической нагрузки  $R_6$ . Основное усиление напряжения происходит за счет динамической нагрузки  $R_6$ , потому резистор  $R_7$  выбирается малой величины.

#### 2.4.3 Выбор резистора R6:

$$R_6 = (E_0 - U_{BЭ5} - I_{O\text{ КЗ}} \cdot R_7)/I_{O\text{ КЗ}} = (17 - 0.6 - 0.023 \cdot 80)/0.02 = 728 \text{ Ом} \quad (2.26)$$

При прохождении сигнала динамическое сопротивление  $R_6$  будет определяться:

$$R_{6\text{Д}} = \frac{R_6}{1 - K_{\text{ОК}}} = 10 \cdot 728 = 7280 \text{ Ом} \quad (2.27)$$

Коэффициент усиления оконечного каскада  $K_{\text{ОК}}$ , т.к. он является повторителем напряжения, близок к 1 и составляет более 0.9:  $K_{\text{ОК}} = 0.9$ .

С обеих сторон резистора  $R_6$  потенциалы близки за счет того, что цепь термостабилизации не вносит особо падения напряжения и транзисторы  $VT_4$  и  $VT_5$  являются повторителями напряжения. Ввиду этого на обоих концах установятся близкие потенциалы, т.е. разность потенциалов будет очень мала и ток практически не будет протекать. Что эквивалентно

включению большого сопротивления. За счет этого происходит увеличения коэффициента усиления.

#### 2.4.4 Определение емкости C3:

Эта емкость устраняет протекание переменного тока по цепи R6 – R7 – земля и увеличивает коэффициент усиления каскада. Обеспечивает связь транзистора VT3 с нагрузкой R6 через оконечный каскад.

$$C_3 \geq \frac{5 \dots 10}{2\pi f_H(R_7 + R_H)} \geq \frac{5}{2\pi 10(80 + 2)} \geq 970 \text{ мкФ} \quad (2.28)$$

#### 2.4.5 Параметры выбора транзистора VT3:

$$P_{\text{к доп}} = (1.2 \dots 1.5)P_{\text{к 3}} = (1.2 \dots 1.5) \cdot \frac{E_0 I_{0 \text{ к3}}}{2} = 1.3 \cdot \frac{170.02}{2} = 0.221 \text{ Вт} \quad (2.29)$$

$$I_{\text{к 3м}} = I_{0 \text{ к3}} + \frac{I_{\text{нм}}}{h_{21}} = 0.013 + \frac{2.83}{400} = 0.020 \text{ А} \quad (2.30)$$

$$I_{\text{к доп}} = (1.2 \dots 1.5)I_{\text{к 3м}} = 1.3 \cdot 0.020 = 0.026 \text{ А} \quad (2.31)$$

$$U_{\text{кэ доп}} = (1.2 \dots 1.5)E_0 = 1.3 \cdot 17 = 22.100 \text{ В} \quad (2.32)$$

$$f_{h_{21}} = (2 \dots 3)f_B = 2.5 \cdot 18000 = 45 \text{ кГц} \quad (2.33)$$

Параметр h21 выбирается из максимально возможных по заданным параметрам.

Таблица 2.4 — Характеристики выбранного транзистора в ПОК

	тип	$P_{\text{к доп}}$ , Вт	$I_{\text{к доп}}$ , А	$U_{\text{к доп}}$ , В	$h_{21}$	$f_{h_{21}}$ , кГц
VT4	n-p-n	3.66	3.11	19	400	36.00
VT5	p-n-p	3.66	3.11	19	400	36.00

#### 2.4.6 Расчет цепи смещения:

Схема цепи смещения на транзисторах представлена на рисунке 2.4.  
Находим ток делителя:

$$I_d = (0.1 \dots 0.3) I_{0кз} = 0.2 \cdot 0.02 = 0.04 \text{ А} \quad (2.34)$$

Выбор  $V_{Tt}$  практически определяется допустимым током

$$I_{к доп} = (1.1 \dots 1.3) I_{к3max} = 1.2 \cdot 0.024 = 0.029 \text{ А} \quad (2.35)$$

Определяем  $R_{бт}$  ( $U_{бт} \approx 0,5 - 0,6 \text{ В}$ )

$$R_{бт} = U_{бт} / I_d = 0.5 / 0.029 = 17 \text{ Ом} \quad (2.36)$$

Сопротивление подстроечного резистора

$$R_{П} = 2(U_{см} - nU_d) / I_{0кз} = 2(1.2 - 0.5) / 0.04 = 35 \text{ Ом} \quad (2.37)$$

#### 2.4.7 Входное сопротивление предоконечного каскада:

Рассчитаем  $R_{ВХЗ}$  и  $r_{эз}$

$$R_{ВХЗ} = h_{11 \text{ VT3}} = (1 + h_{21 \text{ VT3}}) \psi_T / I_{0 \text{ эз}} = (1 + 80) \cdot 25 / 40 = 51 \text{ Ом} \quad (2.38)$$

$$r_{эз} = \psi_T / I_{0 \text{ эз}} = 25 / 40 = 0.625 \text{ Ом} \quad (2.39)$$

Что соответствует значению входного сопротивления в схеме с общим эмиттером, которое имеет небольшое значение и определяется сопротивлением прямо смещенного эмиттерного перехода, имеющем незначительную величину, в пересчете на малый входной ток базы.

#### 2.4.8 Коэффициент усиления каскада по напряжению:

Предоконечный каскад имеет большое усиление по напряжению за счет того, что в коллекторной цепи включена динамическая нагрузка.

$$K = \frac{R_{кнз}}{r_{эз}} = \frac{R_{ВХ4}(R_{6д} + r_7)}{r_{эз}} = \frac{h_{21} R}{r_{эз}} \quad (2.40)$$

$$K = (400 \cdot 2) / 0.625 = 1280$$

Входное сопротивление окончных каскадов состоит из малого входного сопротивления транзистора по схеме с общим эмиттером и сопротивлением, учитывающим влияние местной ООС, тем самым увеличивая входное сопротивление. Влияние  $R_9$  и  $R_{10}$ , ввиду их малости, можно не учитывать.

#### 2.4.9 Итоговые данные предоконечного каскада:

Таблица 2.5 — Параметры выбора транзистора

	тип	$P_K$ доп, Вт	$I_K$ доп, А	$U_K$ доп, В	$h_{21}$	$f_{h_{21}}$ , кГц
VT4	n-p-n	3.66	3.11	19	400	36.00
VT5	p-n-p	3.66	3.11	19	400	36.00

Таблица 2.6 — Режимы работы транзистора

	тип	$P_K$ доп, Вт	$I_K$ доп, А	$U_K$ доп, В	$h_{21}$	$f_{h_{21}}$ , кГц
VT4	n-p-n	3.66	3.11	19	400	36.00
VT5	p-n-p	3.66	3.11	19	400	36.00

#### 2.5 Расчет входного каскада

Входной каскад выполнен на дифференциальном каскаде. Дифференциальный каскад характеризуется тем, что усиление по напряжению при симметричном съеме сигнала равен коэффициенту усиления в схеме с общим эмиттером. Как и предоконечный каскад, входной является усилителем по напряжению. Однако из-за ограниченного сопротивления в коллекторной цепи коэффициент усиления по напряжению дифференциального сигнала не будет достигать больших значений. При этом синфазный сигнал подавляется значительно, что является уменьшением синфазных помех. За счет отсутствия местной обратной связи в дифференциальном каскаде достигается большое увеличение по напряжению. Что непосредственно влияет на петлю ООС в усилителе мощности, увеличивая коэффициент усиления в петле ООС. Транзисторы VT1 и VT2 работают в режиме А, который обеспечивает усиление по напряжению, но не дает большого КПД.

VT1 и VT2 – дифференциальный каскад. R1 – сопротивление базового делителя. Ограничивает входное сопротивление каскада. R3 – сопротивление эмиттерной цепи. R2 – сопротивление коллекторной цепи. Задаёт



нагрузку каскада. R5, R4 и C1 – цепь обратной связи. По постоянному току 100%, по переменному определяется сопротивлением резистора R4.

### 2.5.1 Ток покоя коллектора VT1 и VT2:

$$I_{0\text{ K1}} = (5 \dots 10) I_{\text{Б м3}} / h_{21\text{ 3}} = 7 \cdot 0.024 / 80 = 2.1 \text{ мА} \quad (2.41)$$

### 2.5.2 Параметры выбора транзисторов:

$$I_{\text{K1}} = (1.1 \dots 1.3) I_{0\text{ K1}} = 1.1 \cdot 0.002 = 2.3 \text{ мА} \quad (2.42)$$

$$f_{h21} = (5 \dots 10) f_{\text{в}} = 8 \cdot 18000 = 144 \text{ кГц} \quad (2.43)$$

тут типо таблица ,но я их не умею делать априори

### 2.5.3 Выбор сопротивления $R_2$ :

$$R_2 = U_{\text{БЭ3}} / (I_{0\text{ K1}} - I_{0\text{ Б3}}) = (0.6 \dots 0.7) / (0.0021 - 0.002/50) = 338 \text{ Ом} \quad (2.44)$$

### 2.5.4 Выбор сопротивления $R_3$ :

$$R_3 = \frac{E_0 - U_{\text{БЭ}}}{2 \cdot I_{0\text{ Э1}}} = \frac{E_0 - U_{\text{БЭ1}}}{2 \cdot (I_{0\text{ K1}} + I_{0\text{ K1}} / h_{21})} \quad (2.45)$$

$$R_3 = \frac{17 - 0.7}{2 \cdot (0.0021 + 0.0021/50)} = 3.80 \text{ кОм}$$

### 2.5.5 Цепь обратной связи :

По обратной связи сигнал с выхода усилителя (точка соединения RH) подается на переход БЭ первого транзистора. При этом следует учитывать, что внутреннее сопротивление дифференциального каскада равно  $2h_{11}$ . Передача сигнала по ООС будет производиться по цепи обратной связи R5, R4 и C1.

$$\beta = \left[ \frac{R_{\text{ЭКВ}}}{R_5 + R_{\text{ЭКВ}}} \right] \cdot \left[ \frac{r_{\text{БЭ1}}}{R} \right] = 306 / (5000 + 306) \cdot (600 / 3356) = 0.0103 \quad (2.46)$$

$$R = 2 \cdot h_{11} + R_{ЭГ} = 2 \cdot h_{11} + R_1 \cdot 2 \cdot h_{11} + \frac{R_1 \cdot R_{\Gamma}}{(R_1 + R_{\Gamma})} = 2 \cdot h_{11} + R_{ЭГ} \quad (2.47)$$

$$R = 2 \cdot 11 + 3333 = 3356 \text{ Ом}$$

Сопротивление  $R_{ЭГ}$  является сопротивлением между базой транзистора VT1-VT2 и землей по переменному току. При расчете  $R_{ЭГ}$  необходимо руководствоваться следующими соображениями:

$$R_{ЭГ} = \frac{R_1 \cdot R_{\Gamma}}{R_1 + R_{\Gamma}} = 5000 \cdot 10000 / (5000 + 10000) = 3333 \text{ Ом} \quad (2.48)$$

При этом  $R_{\Gamma}$  – выходное сопротивление каскада предварительного усиления, выполненного по схеме эмиттерного повторителя. Входное сопротивление этого усилителя имеет большую величину, выходное относительно малую порядка сотен Ом и зависит от сопротивления выходного регулятора тембра, который имеет большое входное сопротивление, порядка тысяч Ом. Для того чтобы сопротивление  $R_1$ , включенное параллельно  $R_{\Gamma}$ , существенно не влияло на сопротивление генератора, примем его равным порядка кила Ом:

$$R_1 = 5 \text{ кОм и } R_{\Gamma} = 3000 \text{ Ом} \quad (2.49)$$

$$h_{11} = \frac{(1 + h_{21}) \cdot \psi_{\Gamma}}{I_{0 \text{ Э1}}} = (1 + 50) \cdot 0.025 / 0.002 = 607 \text{ Ом} \quad (2.50)$$

$$R_{ЭКВ} = R_4 \cdot R / (R_4 + R) = 336 \cdot 3356 / (336 + 3356) = 306 \text{ Ом} \quad (2.51)$$

Для сохранения идентичности режимов VT1 и VT2 сопротивление  $R_1$  выбирается равным  $R_5$ .  $R_5$  выбираем из ряда:

$$R_5 = (20 \dots 100) \cdot R_{\text{Н}} = 100 \cdot 2 = 200 \text{ Ом} \quad (2.52)$$

$$R_5 = 5000 \text{ Ом} \quad (2.53)$$

$$R_4 = \frac{(F - 1) \cdot R \cdot R_5}{h_{21} \cdot R_{\text{KH1}} \cdot K_{\text{ПОК}} - (F - 1) \cdot (R + R_5)} \quad (2.54)$$

$$R_4 = 24 \cdot 3356 \cdot 5000 / (50 \cdot 44 \cdot 631 - 24 \cdot 8356) = 336 \text{ Ом}$$

$$R_{\text{KH1}} = \frac{R_2 \cdot R_{\text{BX3}}}{R_2 + R_{\text{BX3}}} = 338 \cdot 51 / (338 + 51) = 44 \text{ Ом} \quad (2.55)$$

Отношение R4 к R5 характеризует ООС по переменному току. За счет сопротивления R4 по переменному току обратная связь не 100%, но за счет малости R4 имеет величину порядка 95%. Значение F выбирается из предварительного расчета:  $F = 25$  Коэффициент петлевого усиления:

$$K_{\Pi} = \beta \cdot K_{BK} \cdot K_{\text{ПОК}} \cdot K_{\text{ОК}} = 0.0103 \cdot 3.7 \cdot 631 \cdot 1 = 24 \quad (2.56)$$

$$K_{BK} = S_1 \cdot R_{KH1} = \frac{R_{KH1}}{r_{\Theta}} = 44 \cdot 0.0021 / 0.0025 = 3.7 \quad (2.57)$$

$$K_{\text{ОК}} = 1 \quad (2.58)$$

Входное сопротивление усилителя:

$$R_{\text{ВХВК}} = \frac{R_1 \cdot (2h_{11} + R_4) \cdot F}{R_1 + (2 \cdot h_{11} + R_4) \cdot F} \quad (2.59)$$

$$R_{\text{ВХВК}} = 5000 \cdot (2 \cdot 607 + 336) \cdot 25 / (5000 + (2 \cdot 607 + 336) \cdot 25) = 4429 \text{ Ом}$$

Конденсатор C2 служит для устранения возможности самовозбуждения на высоких частотах:

$$C_2 = \frac{R_2 + R_{\text{ВХЗ}}}{2 \cdot \pi f_{\text{В}} K_{\text{ПОК}} \cdot R_2 \cdot R_3} = (338 + 51) / (2 \cdot 3.142 \cdot 18000 \cdot 631 \cdot 4 \cdot 338) = 8.3 \text{ пФ} \quad (2.60)$$

### 2.5.6 Выбор емкости C1:

Эта емкость устраняет 100% обратную связь по переменному току.

$$C_1 = \frac{1}{2 \cdot \pi \cdot f_{\text{Н}} \cdot R_4 \cdot \sqrt{M^2 - 1}} = 1 / [2 \cdot 3.14 \cdot 10 \cdot 336 \cdot \sqrt{3.00^2 - 1}] = 16.7 \text{ мкФ} \quad (2.61)$$

### 2.5.7 Коэффициент требуемого усиления по напряжению рассчитанного усилителя мощности:

$$K_{\text{УМ}} = \frac{1}{\beta} = 1 / 0.0103 = 97.1 \quad (2.62)$$

Также усиление по напряжению каскада усиления мощности можно определить через глубину обратной связи:

$$K_{\text{ум}} = \frac{K_{\text{Е}}}{1 + K_{\text{П}}} = \frac{K_{\text{ВК}} \cdot K_{\text{ПОК}} \cdot K_{\text{ОК}}}{1 + K_{\text{Е}}} = 3.7 \cdot 631 \cdot 1 / (1 + 24) = 93 \quad (2.63)$$

#### **2.5.8 Требуемое входное напряжение при номинальной выходной мощности:**

$$U_{\text{ВХВК}} = \frac{U_{\text{Н}}}{K_{\text{ум}}} = 5.657 / 97.07 = 0.06 \text{ В} \quad (2.64)$$

Сопротивление дифференциального каскада ограничивается сопротивлениями базового делителя R1 и сопротивление источника сигнала, каковым для него является КПУ 2, выполненный по схеме с ОК, выходное сопротивление которого имеет небольшую величину.

#### **2.5.9 Итоговые данные предоконечного каскада:**

## 3 РАСЧЁТ УЗЛОВ ПРЕДВАРИТЕЛЬНОГО УСИЛЕНИЯ

### 3.1 Расчет мостового регулятора тембра

Регулятор тембра служит для коррекций частотной характеристики всей схемы, а также приданию звуку желаемой окраски.

Цепочка R1, R2, R3 и C1, C2 – регулятор низких частот.

Цепочка R5, C3, C4 – регулятор высоких частот. Входной каскад усилителя мощности имеет малое входное сопротивление, ограниченное R1. Особенностью пассивного регулятора тембра является то, что эти регуляторы требуют низкого выходного сопротивления предшествующего им каскада и высокого входного сопротивления последующего. По этой причине входной каскад УМ и регулятор тембра РТ отделяют каскадом предварительного усиления, выполненного по схеме с общим коллектором, входное сопротивление которого имеет большую величину, а выходное – малую. Это обеспечивает их совместимость и не потерю сигнала. Нагрузкой для регулятора тембра является входное сопротивление каскада предварительного усиления.

#### 3.1.1 Коэффициент коррекции:

$$m \geq 10^{|\Delta b_r|/20} \quad (3.1)$$
$$m \geq 10^{|\pm 14.0|/20} = 5.012$$

#### 3.1.2 Частота раздела определяется:

$$f_0 = \sqrt{f_n \cdot f_v} = \sqrt{10 \cdot 18000} = 424 \text{ Гц} \quad (3.2)$$

#### 3.1.3 Условие перекрытия зон регулирования:

Одним из существенных условий нормального функционирования регулятора тембра является расположение частоты нижнего и верхнего среза на расстоянии, обеспечивающим их перекрытие. Т.е. чтобы избежать взаимного влияния низкочастотного и высокочастотного регуляторов.

$$2mf_H \leq f_0 \leq \frac{f_B}{2m} \quad (3.3)$$

$$100 \leq f_0 \leq 1796 \quad (3.4)$$

Т.о. видно, что не происходит взаимного влияния низкочастотного и высокочастотного регулятора.

### 3.1.4 Сопротивления подстроечных резисторов R = R2 = R5:

$$R = 0.5 \cdot R_{ВХ\text{ СЛ}} = 0.5 \cdot R_{ВХ\text{ КПУ } 2} = 0.5 \cdot 4429 = 1175.2 \text{ кОм} \quad (3.5)$$

### 3.1.5 Номиналы регистров регулирования НЧ:

$$R_1 = \frac{R}{m} = 1175192/5 = 1050581 \text{ Ом} \quad (3.6)$$

$$R_3 = \frac{R_1}{m} = 1050581/5 = 2776 \text{ Ом} \quad (3.7)$$

### 3.1.6 6. Сопротивление буферного резистора R4.

Буферный резистор обеспечивает развязку низкочастотного и высокочастотного регуляторов.

$$R_4 = (0.05 \dots 0.1) \cdot R = (0.05 \dots 0.1) \cdot 1175192 \cdot 10^3 = 221 \text{ Ом} \quad (3.8)$$

### 3.1.7 Задание номинальных значений емкостей.

Емкости в схеме регулятора тембра обеспечивают его работу как фильтра.

$$C_1 = \frac{1}{2\pi \cdot f_H \cdot m \cdot R} = \frac{1}{2 \cdot \pi \cdot 10 \cdot 5 \cdot 1175192 \cdot 10^3} = 1434.06 \text{ нФ} \quad (3.9)$$

$$C_2 = m \cdot C_1 = 5 \cdot 1434.06 = 7187 \text{ нФ} \quad (3.10)$$

Емкости C3 и C4 формируют ВЧ-регулятор.

$$C_3 = \frac{m^2}{(4 \cdot \pi \cdot f_B \cdot m \cdot R)} = 5^2 / (4 \cdot \pi \cdot 18000 \cdot 1175192) = 50.15 \text{ нФ} \quad (3.11)$$

$$C_4 = m \cdot C_3 = 5 \cdot 50.15 = 251 \text{ нФ} \quad (3.12)$$

### 3.1.8 Задание входного и выходного сопротивления регулятора тембра.

$$R_{\text{ВХ Т}} = R_1 + R_3 = 1050581 + 2776 = 277309 \text{ Ом} \quad (3.13)$$

$$R_{\text{ВЫХ Т}} = R_4 + \frac{R_1 \cdot R_3}{R_1 + R_3} = 221 + 1050581 \cdot 2776 / (1050581 + 2776) = 295 \text{ Ом} \quad (3.14)$$

### 3.1.9 Определение требования к выходному сопротивлению предыдущего каскада

$$R_{\text{ВЫХ ПРЕД}} = 0.2 \cdot R_{\text{ВХ Т}} = 0.2 \cdot 295 = 59 \text{ Ом} \quad (3.15)$$

Выходное сопротивление предшествующего каскада для регулятора тембра представляет собой эквивалентное сопротивление генератора сигнала. Для согласования каскада и передачи сигнала с минимальными потерями оно выбирается в 5...10 раз меньше входного сопротивления регулятора тембра.

### 3.1.10 Определение положения движков R2 и R5, соответствующие линейной частотной характеристике:

$$R'' = \frac{R \cdot m}{m^2 - 1} = 1175192 \cdot 5 / (5 - 1) = 460 \text{ Ом} \quad (3.16)$$

$$R' = R - R'' = 1175192 - 460 = 1.75 \text{ кОм} \quad (3.17)$$

### 3.1.11 Номинальный коэффициент передачи тембра на средних частотах имеет вид:

$$K = \frac{R_3}{R_1 + R_3} = 2776 / (1050581 + 2776) = 0.2 \quad (3.18)$$

Регулировка тембра на НЧ осуществляется за счет резисторов R3 и R1. Они определяют основное изменение напряжения генератора до уровня непосредственно усилителя мощности. Предел регулировки тембра и характеризует изменение АЧХ тембра, т.е. усиление по напряжению.

### 3.1.12 Номинальное входное напряжение РТ:

$$U_{\text{ВХ Т}} = \frac{U_{\text{ВХ СЛЕД}}}{K} = 2775.892/1050580.5 = 0.17 \text{ В} \quad (3.19)$$

## 3.2 Расчет каскада предварительного усиления

Каскад предварительного усиления обеспечивает усиление входного сигнала до необходимого уровня для действия усилителя мощности. Также он выполняет функцию промежуточного звена между регулятором усиления и регулятором тембра.

В нашем случае  $U_{\text{н}}$  и  $R_{\text{н}}$  являются входными параметрами регулятора тембра. При двуполярном питании оконечного каскада в качестве источника  $E_{\text{о}}$  может использоваться любая из половинок.

### 3.2.1 Амплитуда напряжения и тока нагрузки:

$$U_{\text{нм}} = U_{\text{н}} \cdot \sqrt{2} = 0.058 \cdot \sqrt{2} = 0.082 \text{ В} \quad (3.20)$$

$$I_{\text{нм}} = U_{\text{нм}}/R_{\text{н}} = 0.082/4429 = 18.6 \text{ мкА}. \quad (3.21)$$

### 3.2.2 Ток покоя:

При дальнейшем расчете параметров выбора транзистора необходимо учесть тот факт, что нагрузка подключена в коллекторную цепь. Но по той причине, что ток коллектора будет равен току эмиттера, пренебрегая базовым, в обозначении сразу указан ток коллектора.

$$I_{\text{ок}} \geq (5 \dots 10) \cdot I_{\text{нм}} = 10 \cdot 18.61 = 186 \text{ мкА}. \quad (3.22)$$

Который не удовлетворяет условию тока, необходимому для раскачки УМ:  $I_{\text{ок}} = 0.5 \dots 2 \text{ мА}$ . Выбираем ток покоя  $I_{\text{ок}} = 0.5 \text{ мА}$ .



### 3.2.3 Напряжение коллектор-эмиттер транзистора:

$$U_{кэ} \geq U_{Hm} + U_{кэmin} = 0.058 + 2 = 2.058 \text{ В.} \quad (3.23)$$

При этом  $U_{кэmin} = 1 \dots 2 \text{ В}$ . Амплитуда сигнала мала, поэтому выбираем  $U_{кэ} = 4 \text{ В}$ .

### 3.2.4 Напряжение источника питания:

$$E_{0П} \geq (2 \dots 3)U_{кэ} = 3 \cdot 2 = 6 \text{ В;} \quad (3.24)$$

$$E_0 = (1.2 \dots 1.3)E_{0П} = 1.2 \cdot 6 = 7.4 \text{ В.} \quad (3.25)$$

### 3.2.5 Сопротивление в цепи эмиттера:

$$R_э = R_4 + R_5 = \frac{U_э}{I_{0э}} = 0.3 \cdot \frac{E_{0П}}{I_{0к}} = 0.3 \cdot 6.1748 / 0.0002 = 9.95 \text{ кОм.} \quad (3.26)$$

### 3.2.6 Определяем сопротивление R3:

$$R_3 = \frac{E_{0П} - U_{кэ} - U_э}{I_{0к}} = \frac{6 - 2 - 3.6}{0.0002} = 2775.9 \text{ кОм.} \quad (3.27)$$

### 3.2.7 Амплитуда тока:

$$I_{Km} = \frac{U_{Hm}}{R_3} = \frac{0.058}{2775.9} = 0.021 \text{ мА} \quad (3.28)$$

### 3.2.8 Мощность, рассеиваемая на коллекторном переходе:

$$P_K = U_{кэ} \cdot I_{0к} = 4 \cdot 0.5 \cdot 10^{-3} = 2 \text{ мВт.} \quad (3.29)$$

### 3.2.9 Критерии выбора транзистора:

$$P_{K \text{ доп}} \geq (1.1 \dots 1.3)P_K = 1.3 \cdot 2 \cdot 10^{-3} = 2.6 \text{ мВт}; \quad (3.30)$$

$$U_{KЭ} \geq E_0 = 12 \text{ В}; \quad (3.31)$$

$$I_{K \text{ доп}} \geq (1.1 \dots 1.3)(I_{0K} + I_{Km}) = 1.3 \cdot (0.5 \cdot 10^{-3} + 0.013 \cdot 10^{-3}) = 0.66 \text{ мА}; \quad (3.32)$$

$$f_{h_{21}} \geq (20 \dots 30)f_B = 30 \cdot 14000 = 420 \text{ кГц} \quad (3.33)$$

Таблица 3.1 — Характеристики выбранного транзистора

	тип	$P_K$ доп, Вт	$I_K$ доп, А	$U_K$ доп, В	$h_{21}$	$f_{h_{21}}$ , кГц
VT4	n-p-n	3.66	3.11	19	400	36.00
VT5	p-n-p	3.66	3.11	19	400	36.00

Расчетный параметр  $h_{21}$ :

$$h_{21} = \sqrt{h_{21min} \cdot h_{21max}} = \sqrt{40 \cdot 200} = 89 \quad (3.34)$$

### 3.2.10 Расчет базовой цепи:

ток делителя:

$$I_D = (5 \dots 10) \cdot I_{Bm} = \frac{(5 \dots 10) \cdot I_{Km}}{h_{21}} = 10 \cdot 7 \cdot 8 \cdot 10^{-6} / 89 = 0.87 \text{ мкА} \quad (3.35)$$

определение сопротивлений базового делителя:

$$R_1 = \frac{E_0 - U_{Э} - U_{БЭ}}{I_{ОБ} + I_D} = \frac{E_0 - U_{Э} - U_{БЭ}}{\frac{I_{0K}}{h_{21}} + I_D} \quad (3.36)$$

$$R_1 = (12.3 - 3.6 - 0.7) / (0.5 \cdot 10^{-3} / 89 + 0.87 \cdot 10^{-6}) = 1.2 \text{ МОм}$$

$$R_2 = \frac{U_{БЭ} + U_{Э}}{I_D} = (0.7 + 3.6) / 0.87 \cdot 10^{-6} = 5 \text{ МОм} \quad (3.37)$$

**3.2.11 Коэффициент усиления эмиттерного повторителя стремится к 1:**

$$K = \frac{1 + h_{21} \cdot R_{ЭН}}{(1 + h_{21}) \cdot R_{ЭН} + h_{11}} = \frac{R_{ЭН}}{R_{ЭН} + r_{Э}} = 2800 / (2800 + 50) = 0.0980 \approx 1 \quad (3.38)$$

$$r_{Э} = \frac{\psi}{I_0} = 25 / 0.5 = 50 \quad (3.39)$$

**3.2.12 Номинальное входное напряжение:**

$$U_{BX} = \frac{U_H}{K} = 16 \cdot 10^{-3} / 0.98 = 16.3 \text{ мВ} \quad (3.40)$$

**3.2.13 Входное сопротивление каскада:**

$$R_{BX} = \frac{1}{\frac{1}{R_{BX \text{ Т}}} + \frac{1}{R_1} + \frac{1}{R_2}} = 1 / (1 / 256 \cdot 10^3 + 1 / 1.2 \cdot 10^6 + 1 / 5 \cdot 10^6) = 0.2 \text{ МОм} \quad (3.41)$$

$$R_{BX \text{ Т}} = h_{11} + (1 + h_{21}) \cdot R_{ЭН} = h_{21} \cdot h_{Э} + (1 + h_{21}) \cdot R_{ЭН} = h_{11} + (1 + h_{21}) \cdot R_{ЭН} \quad (3.42)$$

$$R_{BX \text{ Т}} = 89 \cdot 50 + 90 \cdot 2800 = 256 \text{ кОм}$$

**3.2.14 Итоговые данные второго каскада предварительного усиления:**

Таблица 3.2 — Параметры выбора транзисторов

	тип	$P_K$ доп, мВт	$I_K$ доп, мА	$U_K$ доп, В	$h_{21}$	$f_{h_{21}}$ , кГц
VT4	n-p-n	0.50	0.27	7.41	60	540.00
VT5	p-n-p	0.38	0.21	7.41	80	540.00

Таблица 3.3 — Режимы работы транзисторов

	$I_{0К}$ мА	$I_{0б}$ мА	$U_{0Б}$ В	$U_{0К}$ В	$I_{КМ}$ мА	$I_{БМ}$ мА	$U_{КМ}$ , В В	$P_K$ мВт	К
КТ127А-1	1	0.03	0.7	5	50	1.66	25	15	0.99
КТ215Д-1	0.04	$5 \cdot 10^{-4}$	0.7	1	50	0.63	30	50	27.2

### 3.3 Расчет регулятора усиления

Регулятор усиления обычно ставится после первого или второго каскада предварительного усиления. В качестве регулятора могут быть использованы нагрузочные сопротивления каскадов, например сопротивление в цепи эмиттера эмиттерного повторителя.

$$R_{\text{ВЫХ.ПРЕД}} = 5\text{кОм} \text{ и } R_{\text{ВХ.СЛЕД}} = 88.5\text{кОм}$$

$$R_y = \sqrt{R_{\text{ВЫХ.пред}} \cdot R_{\text{ВХ.след}}} = \sqrt{R_{\Gamma} \cdot R_{\text{кпу}}} = \sqrt{8850 \cdot 5000} = 21 \text{ кОм} \quad (3.43)$$

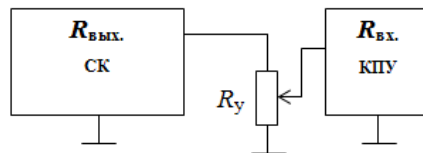


Рисунок 3.1 — Схема регулятора усиления