

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:

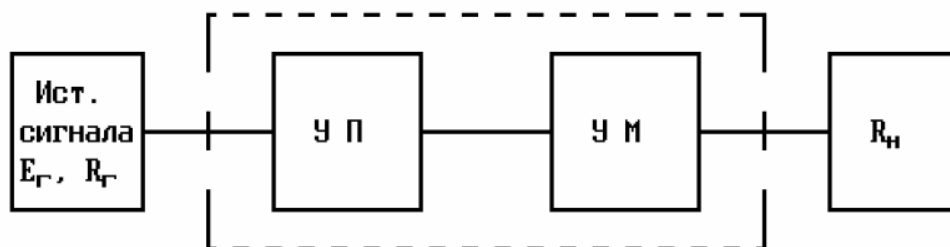


Рисунок 1.1 — Упрощенная структурная схема усилителя

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:

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

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

1.2.2 Запас усиления для обеспечения заданных характеристик усилителя:

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

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

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

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

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

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

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

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 согласующий 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.

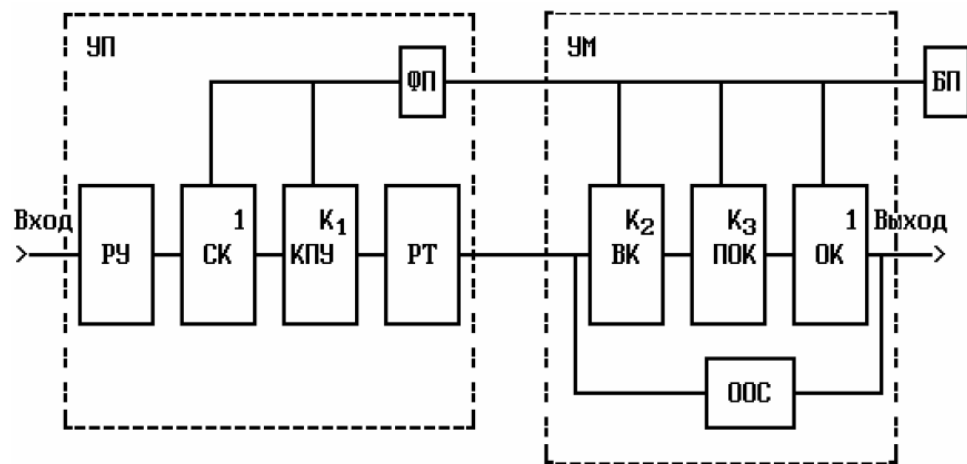


Рисунок 1.2 — Структурная схема усилителя сигналов звуковой частоты

2 Разработка принципиальной схемы усилителя мощности

2.1 Разработка и расчёт принципиальной схемы усилителя мощности

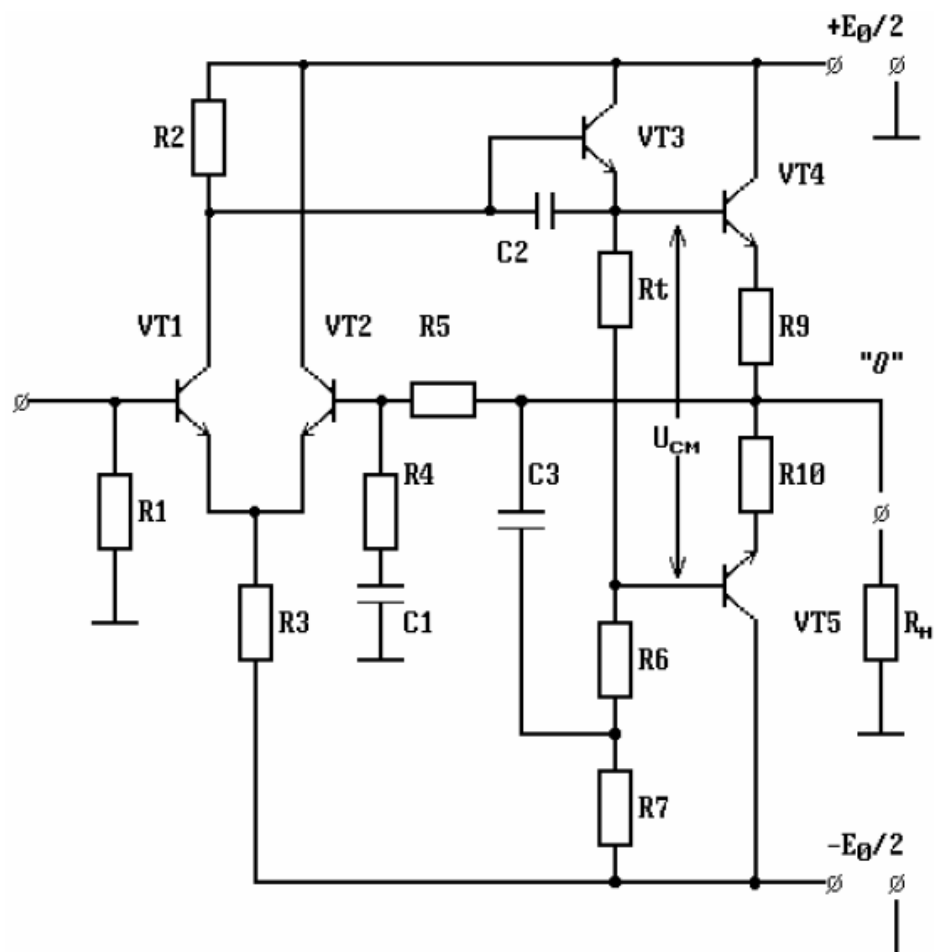


Рисунок 2.1 — Электрическая принципиальная схема усилителя

2.2 Выбор цепи термостабилизации

Цепь предназначена для создания начального смещения на базах транзисторов выходного каскада. В процессе нагрева их параметры существенно изменяются, что влечет за собой изменение режимов и нарушение работы всей схемы. Цепь термостабилизации в зависимости от температурного режима изменяет напряжение смещения так, чтобы компенсировать изменение параметров транзисторов.

Используем схему цепи термостабилизации, представленную на рисунке 2.2.

Диапазон рабочих температур $-20 \dots + 50 \text{ }^{\circ}\text{C}$.

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:

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

$$P_{к\ 17,0} = \frac{2^2}{4 \cdot 2 \cdot \pi^2} = 3.66 \text{ Вт}$$

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

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

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

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

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 окончного каскада (VT4,VT5, см рис. 2.1) по следующим параметрам :

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

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

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

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

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

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

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

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

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

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

Таблица 2.1 — Характеристики выбранных транзисторов в ОК

	тип	I_{KM}, A	$U_{KЭ}, B$	$P_K, B\Gamma$	h_{21min}	h_{21max}	$f_{гр}, M\Gamma\text{ц}$
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.

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

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

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

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

2.3.7 Рабочие параметры транзистора:

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

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

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

2.3.8 Входное сопротивление:

При протекании в эмиттерной цепи большого тока ($I_0 = 0,9 \text{ A}$) 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 R_9 и R_{10} :

Резисторы R_9 и R_{10} 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} :

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

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

Таблица 2.2 — 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 2.3 — Режимы работы транзисторов

	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

2.3.11 Итоговые данные транзисторов оконечного каскада:

В цепи оконечного каскада для устранения нелинейных искажений в выходном сигнале, на базы транзисторов VT4 и VT5 подается небольшое смещение. В результате чего транзистор приоткроется, 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 оконечном 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 выходную цепь динамического сопротивления позволяет увеличить коэффициент усиления K в десятки раз.

2.4.1 Ток покоя транзистора VT3:

$$I_{O\ K3} = (2 \dots 3) \cdot I_{B\ m4} = (2 \dots 3) \cdot I_{HM} / h_{21\ экв} \quad (2.24)$$

$$I_{O\ K3} = \frac{2.5 \cdot 53.25}{254} = 55.55$$

2.4.2 Выбор резистора R7:

$$R_7 = (30 \dots 50) \cdot R = 40 \cdot 4 = 100 \text{ Ом} \quad (2.25)$$

Резистор R7 включается в цепь для того, чтобы не закорачивать источник питания конденсатором C3, обеспечивающим включение в выходную цепь транзистора динамической нагрузки R6. Основное усиление напряжения происходит за счет динамической нагрузки R6, потому резистор R7 выбирается малой величины.

2.4.3 Выбор резистора R6:

$$R_6 = (E_0 \sim U_{БЭ5} \sim I_{O\text{ КЗ}} \cdot R_7) / I_{O\text{ КЗ}} = (15 \sim 0.6 \sim 0.023 \cdot 100) / 0.02 = 100 \text{ Ом} \quad (2.26)$$

При прохождении сигнала динамическое сопротивление R6 будет определяться:

$$R_{6Д} = \frac{R_6}{1 - K_{OK}} = 10 \cdot 542.212 = 100 \text{ Ом} \quad (2.27)$$

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

С обеих сторон резистора R6 потенциалы близки за счет того, что цепь термостабилизации не вносит особо падения напряжения и транзисторы VT4 и VT5 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.

$$C_3 \geq \frac{5 \dots 10}{2\pi f_H(R_7 + R_H)} \geq \frac{5}{2\pi 18(52 + 52)} \geq 654 \text{ мкФ} \quad (2.28)$$

2.4.5 Параметры выбора транзистора VT3:

$$P_{к\text{ доп}} = (1.2 \dots 1.5)P_{к3} = (1.2 \dots 1.5) \cdot \frac{E_0 I_{O\text{ КЗ}}}{2} = 1.3 \cdot \frac{160.02}{2} = 0.025 \text{ Вт} \quad (2.29)$$

$$I_{к3м} = I_{O\text{ КЗ}} + \frac{I_{HM}}{h_{21}} = 0.013 + \frac{2.54}{600} = 0.024 \text{ А} \quad (2.30)$$

$$I_{\text{к доп}} = (1.2 \dots 1.5) I_{\text{к 3м}} = 1.3 \cdot 52.265 = 0.024 \text{ А} \quad (2.31)$$

$$U_{\text{кз доп}} = (1.2 \dots 1.5) E_0 = 1.3 \cdot 52 = 0.024 \text{ В} \quad (2.32)$$

$$f_{h_{21}} = (2 \dots 3) f_{\text{в}} = 2.5 \cdot 52555 = 85455 \text{ кГц} \quad (2.33)$$

Параметр h_{21} 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:

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

Выбор VTt практически определяется допустимым током

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

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

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

Сопротивление подстроечного резистора

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

2.4.7 Входное сопротивление предоконечного каскада:

Рассчитаем $R_{ВХ3}$ и $r_{э3}$

$$R_{ВХ3} = h_{11 VT3} = (1 + h_{21 VT3})\psi_T/I_{0 Э3} = (1 + 80) \cdot 25/40 = 51 \text{ Ом} \quad (2.38)$$

$$r_{э3} = \psi_T/I_{0 Э3} = 25/40 = 0.625 \text{ Ом} \quad (2.39)$$

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.

$$K = R_{КН3}/r_{э3} = (R_{ВХ4}(R_{6Д} + r_{э4}))/r_{э3} = (h_{21}R)/r_{э3} = (600 \cdot 2)/0.625 = 1920 \quad (2.40)$$

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:

$$I_{0\text{ К1}} = (5 \dots 10) I_{\text{Б м3}} / h_{21\text{ 3}} = 7 \cdot 0.024 / 80 = 2.1 \text{ мА} \quad (2.41)$$

2.5.2 Параметры выбора транзисторов: