

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:

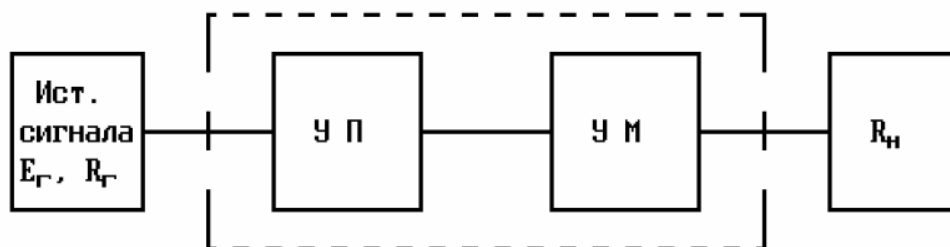


Рисунок 1.1 — Упрощенная структурная схема усилителя

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 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 – оконечный каскад УМ; ООС – цепь обратной связи УМ; БП – блок питания; ФП – фильтр питания.

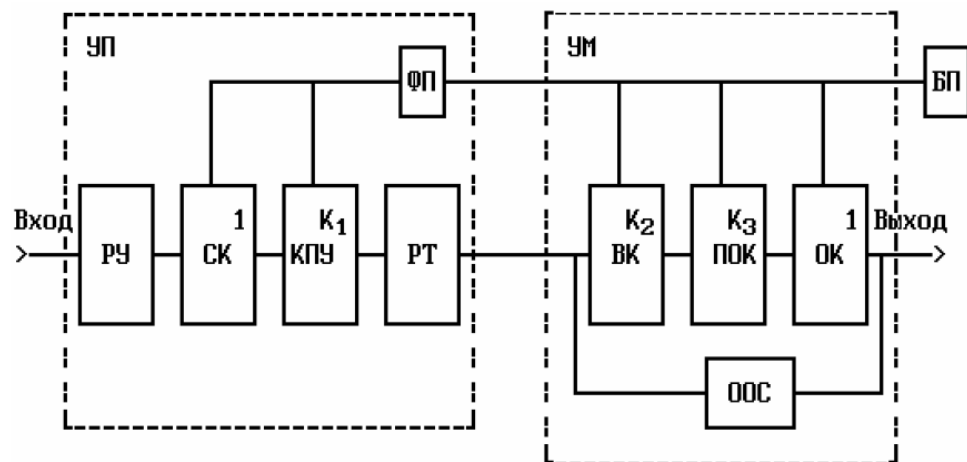


Рисунок 1.2 — Структурная схема усилителя сигналов звуковой частоты

## 2 Разработка принципиальной схемы усилителя мощности

### 2.1 Разработка и расчёт принципиальной схемы усилителя мощности

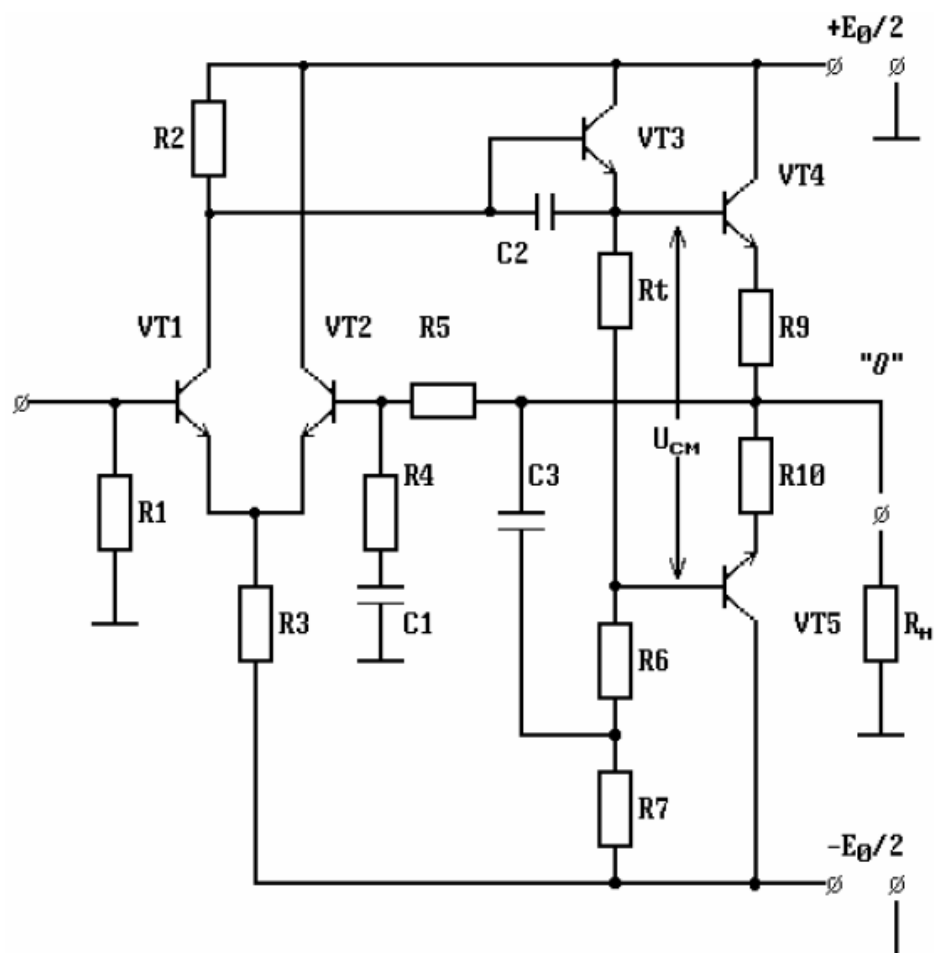


Рисунок 2.1 — Электрическая принципиальная схема усилителя

### 2.2 Расчет оконечного каскада

#### 2.2.1 Определяем амплитуду напряжения и тока на нагрузке

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

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

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

$$I_{\text{км}} = I_{\text{нм}} = \frac{5,65}{2} = 2,82 \text{ А}$$

### 2.2.2 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.

$$E_0 \text{ расч} > 2(5,65 + 2) = 15,31 \text{ В}$$

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

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

$$E_0 > (1,1 \cdot 15,31) = 16,84 \approx 17 \text{ В}$$

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

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

$$P_{\text{к } 4,5} = \frac{17^2}{4 \cdot 2 \cdot \pi^2} = 3,66 \text{ Вт}$$

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

$$h_{21\ 4,5} \geq \frac{8}{0,02} = 400$$

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

### 2.2.5 Выбираем транзисторы окончного каскада (VT4,VT5, см рис. 2.1) по следующим параметрам :

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

$$P_{\text{к доп}} \geq 1,1 \cdot 3,66 = 4,026 \text{ Вт}$$

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

$$I_{\text{к доп}} \geq 1,1 \cdot 2,82 = 3,102 \text{ А}$$

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

$$U_{\text{кэ доп}} \geq 1,1 \cdot 17 = 18,7 \text{ В}$$

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

$$h_{21} \geq h_{21\ 4,5} = 400$$

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

$$f_{h_{21}} \geq 2 \cdot 18 \cdot 10^3 = 36 \text{ кГц}$$



Таблица 2.1 — Характеристики выбранных транзисторов в ОК

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

### 2.2.6 Расчет параметров радиатора:

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

$$R_{\text{т кс}} = \frac{t_{\text{Пм}} - t_{\text{См}}}{P_{\text{к}}} - R_{\text{т пк}} \quad (2.12)$$

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

$$\text{КТ972Б: } R_{\text{т кс}} = \frac{135 - 40}{3,66} - 15,6 = 10,3 \text{ (C/Вт)}. S = 135 \text{ (см}^2\text{)} \quad (2.14)$$

$$\text{КТ97Б: } R_{\text{т кс}} = \frac{150 - 40}{3,66} - 15,6 = 14,4 \text{ (C/Вт)}. S = 97 \text{ (см}^2\text{)} \quad (2.15)$$

### 2.2.7 Рабочие параметры транзистора:

$$I_0 = \frac{I_{\text{нм}}}{\pi} = \frac{2,82}{3,14} = 0,9 \text{ А} \quad (2.16)$$

$$P_0 = I_0 \cdot E_0 = 0,9 \cdot 17 = 15,3 \text{ Вт} \quad (2.17)$$

$$\eta = \frac{P_{\text{н}}}{P_0} = \frac{8}{15,3} = 52,2 \% \quad (2.18)$$

### 2.2.8 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:

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

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

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

### 2.2.9 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.

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

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

При этом номинальные значения сопротивлений резисторов выбираются из справочника.

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

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

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

### 2.2.11 Итоговые данные транзисторов оконечного каскада:

Таблица 2.2 — Параметры выбора транзистора

	тип	$P_{\text{K}}$ доп, Вт	$I_{\text{K}}$ доп, А	$U_{\text{K}}$ 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

В цепи оконечного 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.

### 2.3 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 оконечного 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 об-

щим 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.

### 2.3.1 Ток покоя транзистора VT3:

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

$$I_{O\ K3} = \frac{2.5 \cdot I_{HM}}{h_{21\ экв}} = 55.55$$

### 2.3.2 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.

### 2.3.3 Выбор резистора R6:

$$R_6 = (E_0 \sim U_{БЭ5} \sim I_{O\ K3} \cdot R_7) / I_{O\ K3} = (15 \sim 0.6 \sim 0.023 \cdot 100) / 0.02 = 100\ \text{Ом} \quad (2.26)$$

При прохождении сигнала динамическое сопротивление R6 будет определяться:

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

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.

#### 2.3.4 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.

$$C_3 \geq \frac{5 \dots 10}{2\pi f_n(R_7 + R_n)} g_{eq} \frac{5}{2\pi 18(52 + 52)} g_{eq} 654 \text{ мкФ} \quad (2.28)$$

#### 2.3.5 Параметры выбора транзистора VT3:

$$P_{к доп} = (1.2 \dots 1.5) P_{к 3} = (1.2 \dots 1.5) \cdot \frac{E_0 I_{0 кз}}{2} = 1.3 \cdot \frac{160.02}{2} = 0.025 \text{ Вт} \quad (2.29)$$