Документ подписан простой электронной подписью
Информация о владельце:
ФИО: Клочков Юрий Сергеевич
Должность: Ректор
Дата подписания: 15.10.2026 14:38:59
Уникальный программный ключ:
3beb265d5d589e7ff4c954946f3ad99a1e70ac12

МИНИСТЕРСТВО НАУКИ И ВЫСШЕГО ОБРАЗОВАНИЯ РОССИЙСКОЙ ФЕДЕРАЦИИ

ФЕДЕРАЛЬНОЕ ГОСУДАРСТВЕННОЕ БЮДЖЕТНОЕ ОБРАЗОВАТЕЛЬНОЕ УЧРЕЖДЕНИЕ ВЫСШЕГО ОБРАЗОВАНИЯ «ТЮМЕНСКИЙ ИНДУСТРИАЛЬНЫЙ УНИВЕРСИТЕТ»

«ТЮМЕНСКИЙ ИНДУСТРИАЛЬНЫЙ УНИВЕРСИТЕТ»

Институт геологии и нефтегазодобычи
Кафедра кибернетических систем

ЭЛЕКТРОНИКА И ЦИФРОВАЯ СХЕМОТЕХНИКА МЕДИЦИНСКАЯ ЭЛЕКТРОНИКА И МИКРОПРОЦЕССОРНАЯ ТЕХНИКА

Методические указания к выполнению курсового проекта для студентов технических специальностей очной и заочной формы обучения (вариант II)

Составитель: А.Э. Сидорова, ст. преподаватель

Тюмень
ТИУ
2019

Электроника и цифровая схемотехника; электроника и схемотехника, электроника и микропроцессорная техника: методические указания к выполнению курсового проекта (вариант II) для студентов технических специальностей очной и заочной формы обучения / сост. А. Э. Сидорова; Тюменский индустриальный университет.– Тюмень: Издательский центр БИК, ТИУ, 2019.– 48 с.

Методические указания рассмотрены и рекомендованы к изданию на заседании кафедры кибернетических систем

«05» с е н т б р я 2019 года, протокол № 1.

Аннотация

Методические указания к выполнению курсового проекта (вариант II) предназначены для студентов, обучающихся по техническим специальностям. Дисциплина изучается в одном или двух семестрах.

Приведено содержание упрощенного инженерного расчета усилителя мощности, работающего на низкоомную нагрузку, примерные задания и количество баллов за каждый элемент защиты курсового проекта, в приложениях приведено содержание курсовой работы, вид титульного листа, ряды номинальных базовых электронных элементов.

СОДЕРЖАНИЕ

Введение 4
1. Задание на курсовую работу 5
2. Выбор блок-схемы 6
3. Расчет элементов используемых в схеме: 6
3.1Выходной усилительный каскад 6
3.2 Эмиттерный повторитель №3 на транзисторах VT8,VT7 13
3.3 Аттенюатор 15
3.4 Эмиттерный повторитель №2 на транзисторах VT6,VT5 17
3.5 Цепь Вина 20
3.6 Отрицательная нелинейная обратная связь 22
3.7 Предварительный усилитель на транзисторах VT4, VT3 23
3.8 Эмиттерный повторитель №1 на транзисторах VT2,VT1 28
4. Расчет разделительных конденсаторов 30
5. Расчет параметрических стабилизаторов напряжения 31
6. Расчет радиаторов 34
7. Расчет АФХ и ФЧХ усилителя на транзисторе VT4 35
8. Карты режимов 37
9. Спецификация элементов 38
10. Список использованных источников. 39
Приложение А 40
Приложение Б 41
Приложение В 42

Введение

Цель и задачи курсового проекта

Целью выполнения курсового проекта является проведение упрощенного инженерного расчета автогенератора с мостом Вина.

Основными задачами выполнения курсового проекта является формирование у студентов необходимых знаний основных электротехнических законов и методов инженерного расчета усилителя мощности, работающего на низкоомную нагрузку. Упрощенный инженерный расчет предполагает проведение самых элементарных вычислений с использованием графиков, заранее построенных на основе обобщенных результатов моделирования, вместо того, чтобы каждый раз обращаться к решению исходных дифференциальных уравнений.

В результате выполнения курсового проекта студент должен

знать:

- основные законы электротехники;
- принципы работы основных электрических узлов и схем, особенности их применения, их рабочие характеристики;
- элементную базу современных полупроводниковых устройств;
- основные требования к устройству электроустановок;
- базовые элементы электроники, их свойства и сравнительные характеристики;
- параметры и характеристики полупроводниковых приборов;
- параметры и характеристики основных функциональных узлов электронных устройств;
- свойства и характеристики интегральных схем элементов.

уметь:

- читать электрические и электронные схемы;
- грамотно применять в своей работе электротехнические и электронные устройства и приборы, первичные преобразователи и исполнительные механизмы;
- использовать пакеты прикладных программ для произведения инженерных и прочих расчетов, такие как Mathcad;
- подбирать необходимую аппаратуру для проведения измерений в цепи с заданными параметрами;
- формулировать принципы энергосберегающих технологий;
- проектировать и строить основные функциональные узлы электронных устройств автоматических и автоматизированных систем.

владеть:

- методами инженерных расчетов для различных электронных узлов и устройств;
- способность анализировать работу электронных схем в нормальном режиме;
- умением принимать решения при выборе и анализе различных электронных элементов;
- навыками письменного и устного аргументированного изложения собственной точки зрения.

Порядок защиты курсового проекта

В начале семестра выдается задание на курсовой проект, в течение семестра студенты выполняют расчет и проектируют принципиальную электрическую схему устройства, затем оформляют работу в соответствии с требованиями ГОСТ 7.32-2001 «Отчёт о научно-исследовательской работе. Структура и правила оформления». Затем студенты предоставляют пояснительную записку к курсовому проекту и графическую часть. После проверки правильности оформления и расчета студенты защищают курсовой проект.

Критерии оценки работы студента

Критерии оценки в баллах приведены в таблице:

I этап	II этап	III этап	IV этап	V этап
Расчет главы 3.1	Расчет глав 3.2 – 3.7	Проектирование схемы	Оформление	Защита курсовой работы
0-10 баллов	0-20 баллов	0-20 баллов	0-20 баллов	0-30 баллов

1. Задание на курсовой проект:

Спроектировать электронное устройство, учитывая параметры, приведенные в техническом задании (пример):

№	вариант	ФИО	Рвых [вт]	Rн[Ом]	fн[Гц]	Мн	аттенюатор[Дб]
1	1 0 1 1	Иванов Иван Иванович	12,38	5,62	40,98	1,0654	-0,650

Kf %	Rвх[кОм]	Uвх[в]	Uбэнач мах[в]	Сн[пФ]	
				C_1	C_2
0,0784	-	-	0,909	134	192

Требования, предъявляемые к выполнению курсового проекта:

1. Использовать при расчетах среднее значение β транзистора, приведенное в справочнике, но не более 150.

3. Во всех каскадах ввести обратную отрицательную связь с глубиной не менее 5, т.е. $F \geq 5$.

4. Для одного из каскадов рассчитать АЧХ и ФЧХ до $M=\sqrt{2}$.

5. Привести карту режимов и спецификацию элементов.

6. Все элементы должны быть пронумерованы. Нумерация элементов сквозная.

7. Отклонение всех параметров от расчетных (заданных) не более ±10%.

8. В аттенюаторе регулировка плавная и дискретная.

9. Значения резисторов и конденсаторов выбираются в соответствии номиналами (использовать ряд Е24, Е6, Е3).

10. Оформление курсовой работы согласно ГОСТ 7.32-2001 «Отчёт о научно-исследовательской работе. Структура и правила оформления».

11. Привести информацию об изготовлении печатных и монтажных плат.

12. Спроектировать принципиальную электрическую схему электронного устройства и привести в графической части проекта на листе формата А3, с использованием пакета прикладных программ (таких как AutoCAD, sPlan 7 Portable Rus и т.п.)

Обязательные пункты, входящие в **содержание** курсового проекта приведены в приложении А.

Пример титульного листа приведен в приложении Б.

Ряды номинальных базовых электронных элементов приведены в приложении В. В соответствии с рядом Е24 (Е6, Е3) необходимо привести к номинальному значению все сопротивления в расчете, которые имеют порядковые номера (например R41, C16).

Далее приведен упрощенный инженерный расчет электронного устройства – АВТОГЕНЕРАТОРА С МОСТОМ ВИНА.

2. Выбор блок-схемы

Автономный источник синусоидальных колебаний, работающий в режиме самовозбуждения, называется генератором. Он является преобразователем энергии источника питания в энергию колебаний переменного тока требуемой частоты.

RC-генераторами называются автогенераторы, частота входных колебаний которых определяется цепями, состоящими из сопротивлений и емкостей.

Структурная схема RC-автогенератора с мостом Вина может быть представлена в виде замкнутой системы.

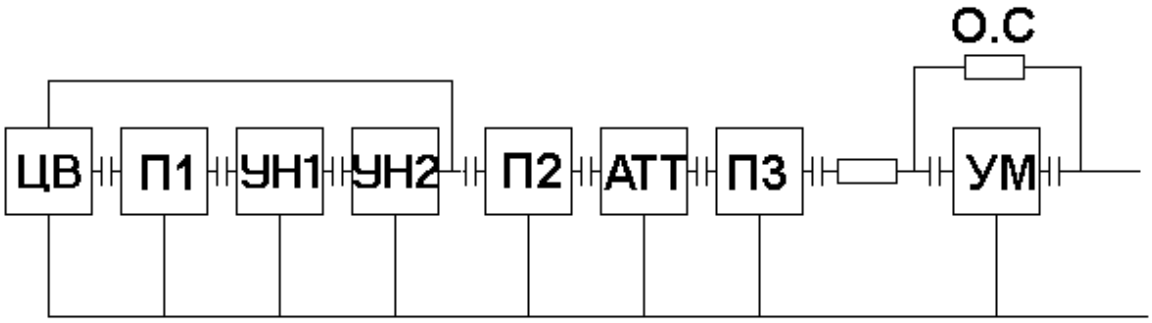


Рис. 1 Блок-схема автогенератора с мостом Вина

Источник питания (на схеме не обозначен);

- Цепь Вина используется как частотозадающая цепь;
- Повторитель (**П1**) служит для согласования фазирующей цепи с усилителем напряжения по сопротивлению;
- Усилители напряжения (**УН1, УН2**) обеспечивают баланс фаз и баланс амплитуд (при введении нелинейной отрицательной обратной связи);.
- Повторители (**П2** и **П3**) согласуют задающий генератор с усилителем мощности по сопротивлению и обеспечивающих необходимый режим работы аттенюатора
- Аттенюатор (**АТТ**) служит для плавной и ступенчатой регулировки уровня ослабления выходного напряжения.
- Усилитель мощности (**УМ**), охваченный отрицательной обратной связью, предназначен для обеспечения заданной мощности на заданном сопротивлении нагрузки.

3. Расчет элементов используемых в схеме

Расчет усилителя мощности следует начать с расчета ***выходного оконечного каскада.***

3.1 Выходной усилительный каскад

Принципиальная электрическая схема выходного оконечного каскада приведена на рисунке 2.

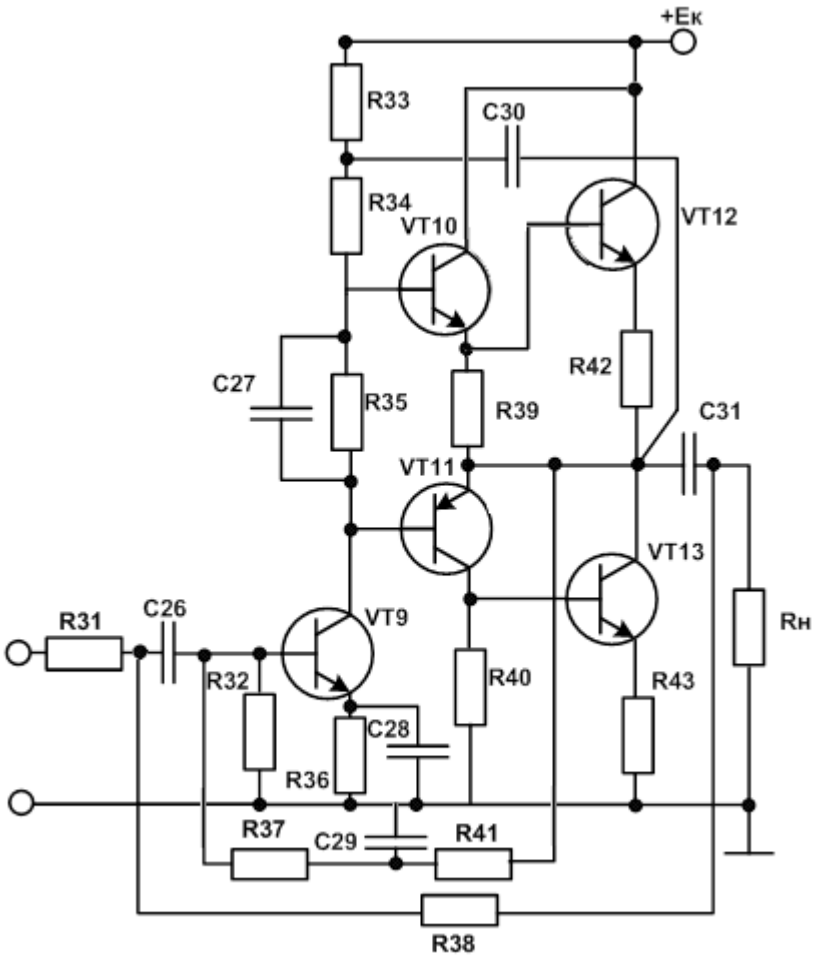


Рис. 2 Принципиальная электрическая схема выходного оконечного каскада

Выбор режима работы.

Выбор режима «**А»** несет в себе небольшие нелинейные искажения по сравнению с другими режимами работы, хотя КПД усилителя мощности в этом режиме небольшой примерно **30-45 %**. В то время как режим «**В**» обеспечивает чрезмерно большие нелинейные искажения, вызванные наличием нелинейного участка в начале входной вольт-амперной характеристики. КПД режима «**В»** составляет **50-60 %.**

Расчет будем вести в режиме «А».

1. Определяем амплитудные значения тока и напряжения на нагрузке:

$$I_{HM} = \sqrt{\frac{2P_H}{R_H}} \text{ (А)}$$

$$U_{HM} = \sqrt{2P_H \times R_H} \text{ (В)}$$

2. Определим максимально допустимую мощность рассеивания на транзисторах VT12, VT13:

$$P_{Kdon} = \frac{P_н}{2 \cdot \eta_A} \textbf{ (Вт),}$$

где η_A – КПД, равный 35 - 40%. Поскольку в режиме «А» предельный КПД составляет 50%, а реальный не выше 35 - 40%.

3. Определим $U_{КЭ12}=U_{КЭ13}$:

$$U_{КЭ12,13} = \frac{U_{НМ}}{K_{П\Sigma}} + U_0 \text{ (В)},$$

где U_0 - запас, исключающий попадание рабочей точки в область насыщения, для различных типов транзисторов колеблется в пределах 0,5 - 3 В, для маломощных транзисторов можно выбирать в пределах 1-2 В;

$К_{П\Sigma}$ - коэффициент передачи всего усилителя мощности. Практически значение $К_{П\Sigma}$ находится в пределах 0,7-0,9, в зависимости от величины нагрузки. При нагрузках ниже 5-10 Ом следует принимать меньшее значение.

Принимаем $U_0 =$ (В), $К_{П\Sigma} =$ и определяем $U_{КЭ12}=U_{КЭ13}$.

4. Определим величину напряжения источника питания

$$E_К = 2\cdot U_{КЭ12,13} + 2\cdot U_{защ} = 2\cdot U_{КЭ12,13} + 2\cdot U_{R43} = \text{(В)},$$

где $U_{защ}$ – падение напряжения на резисторе защиты (R_{43}), можно принять в пределах 0,8 – 1 В.

Принимаем $E_К =$ (В), в соответствии со стандартным рядом источников питания.

Пересчитываем значения напряжений коллектор-эмиттер транзисторов 12 и 13:

$$U_{КЭ12,13} = \frac{E_К - 2U_З}{2} \text{ (В)}$$

5. Выбираем из справочника транзисторы VT13, VT12, соответствующие по мощности, току покоя и по верхней граничной частоте полосы пропускания, основные характеристики сводим в таблицу вида:

	Модель	Тип	P, Вт	$U_{кэ\ доп}$, В	I_{kmax}, А	β_{min}	$f_{гр}$, МГц	$I_{ко}$, мА
VT12								
VT13								

Необходимо учитывать, что у выбираемых в качестве выходных транзисторов допустимое напряжение $U_{к\ доп}$ должно соответствовать неравенству $U_{кэ.доп} \geq E_к$.

6. Определяем токи покоя и токи базы транзисторов VT12, VT13:

$$Iп_{12} = 0{,}5\cdot I_{НМАХ} + I_{Н.У.} \text{ (А)},$$

где $I_{Н.У.}$- неуправляемая часть тока покоя, определяемая наличием теплового тока коллектора $I_{К0}$ (определяется из справочных данных).

$$I_{Н.У.} = 5\cdot I_{К0} \text{ (мА)},$$

$$I_{б12} = \frac{I_{п12}}{\beta_{12}} \text{ (А)},$$

$$I_{П13} = I_{п12} + I_{б12} \text{ (А)},$$

$$I_{б13} = \frac{I_{П13}}{\beta_{13}} \text{ (А)};$$

7. Определим значение резистора защиты$R_з = R_{43}$, Значение резистора защиты $R_з$ должно быть достаточно большим, чтобы ограничить на допустимом уровне вели-

чину тока через транзисторы VT12 и VT13 и в то же время снижений коэффициента полезного действия при введении $R_з$ должно быть незначительным:

$$R_з = \frac{U_{бэ12,13}}{I_{п12}} \text{ (Ом),}$$

где значение $U_{бэ12,13}$ дано в техническом задании.

Значение резистора Rз=R_{43} принимаем в соответствии с рядом Е24.

8. Определяем ток покоя транзисторов VT10:

$$I_{п10} = 4 \cdot I_{б12} \quad \text{(А)}$$

9. Определяем постоянное напряжение $U_{КЭ10,11}$:

$$U_{КЭ10,11} = U_{КЭ12,13} - U_{БЭ12,13} \quad \text{(В)}$$

Определим мощность, рассеиваемую на транзисторах VT10, VT11:

$$P_{К10,11} = U_{КЭ10,11} \cdot I_{п10} \text{ (Вт)}$$

10. Выбираем из справочника транзисторы VT10, VT11, соответствующие по мощности, току покоя и по верхней граничной частоте полосы пропускания, основные характеристики сводим в таблицу вида:

	Модель	Тип	Р, Вт	$U_{кэ\ доп}$, В	I_{kmax}, А	β_{min}	$f_{гр}$, МГц	$I_{ко}$, мА
VT10								
VT11								

11. Определим сквозной ток через транзисторы VT10, VT11:

$$I_{10,11} = I_{П10} - I_{б12} - I_{б13} \text{ (А)}$$

12. Определим токи покоя и токи базы транзисторов VT10, VT11

$$I_{б10} = \frac{I_{П10}}{\beta_{10}} \quad \text{(А);}$$

$$I_{П11} = I_{10,11} + I_{б13} + I_{б10} \text{ (А);}$$

$$I_{б11} = \frac{I_{П11}}{\beta_{11}} \text{ (А)}$$

13. Определим ток покоя транзистора VT9:

$$I_{П9} >> I_{Б10}$$

Для обеспечения максимальных усилительных свойств транзистора VT9, можно принять значение $I_{п9}$=0,005А.

14. Определим напряжение на резисторе *R36*:

$$U_{R36} = 0{,}05 \cdot E_К \text{ (В)}$$

15. Определим напряжение на участке коллектор-эмиттер транзистора VT9, при этом значение Uбэ можно принять равным 0,7 В для всех остальных транзисторов в данном устройстве:

$$U_{кэ9} = E_к - U_{кэ12,13} - U_{защ} - U_{бэ10,11} - U_{R36} \quad \text{(В)}$$

16. Определим мощность, рассеиваемую на коллекторе транзистора VT9:

$$P_{к9} = I_{П9} \cdot U_{кэ9} \quad \textbf{(Вт)}$$

17. Выбираем из справочника транзистор VT9, соответствующий по мощности, току покоя и по верхней граничной частоте полосы пропускания, основные характеристики сводим в таблицу вида:

	Модель	Тип	P, Вт	$U_{кэ\ доп}$, В	I_{kmax}, А	β_{min}	$f_{гр}$, МГц	$I_{ко}$, мА
VT9								

18. Определим сквозной ток и ток базы транзистора VT9

$$I_9 = I_{П9} - I_{б11} \ \textbf{(А)}$$

$$I_{б9} = \frac{I_{П9}}{\beta_9} \ \textbf{(А)}$$

19. Выбираем ток делителя $I_д >> I_{б9}$. Пусть $I_д = 10 \cdot I_{б9}$ **(А)**.

20. Определим значения сопротивлений в схеме и выберем резисторы в соответствии с рядом Е24:

$$I_{R42} = I_{П12} + I_{б12} \ \textbf{(А)}$$

$$R_{42} = \frac{U_З}{I_{R42}} \ \textbf{(Ом)},$$

$$U_{R42} = R_{42} \cdot I_{R42} \ \textbf{(В)}$$

$$I_{R43} = I_{П13} + I_{б13} \ \textbf{(А)}$$

Пересчитаем значение сопротивления R_{43}:

$$R_{43} = \frac{U_{защ}}{I_{R43}} \ \textbf{(Ом)},$$

$$U_{R43} = R_{43} \cdot I_{R43} \ \textbf{(В)}$$

$$I_{R39} = I_{10,11} + I_{б10} + I_{б11} + I_{б13} \ \textbf{(А)}$$

$$R_{39} = \frac{U_{БЭ12} + U_З}{I_{R39}} \ \textbf{(Ом)},$$

$$U_{БЭ12} = R_{43} \cdot I_{R39} - U_{защ} \ \textbf{(В)}$$

$$I_{R40} = I_{10,11} + I_{б10} \ \textbf{(А)}$$

$$R_{40} = \frac{U_{БЭ13} + U_З}{I_{R40}} \ \textbf{(Ом)}$$

$$U_{БЭ13} = R_{40} \cdot I_{R40} - U_{защ} \ \textbf{(В)}$$

$$I_{R35} = I_9 \ \textbf{(А)}$$

$$R_{35} = \frac{U_{БЭ10} + U_{БЭ12} + U_{БЭ11} + U_{защ}}{I_{R35}} \ \textbf{(Ом)},$$

$$U_{БЭ10} = \frac{R_{35} \cdot I_{R35} - (U_{БЭ12} + U_{защ})}{2} \ \textbf{(В)}$$

$$U_{БЭ11} = U_{БЭ10} \ \textbf{(В)}$$

$$U_{R35} = R_{35} \cdot I_9 \ \textbf{(В)}$$

$$I_{R36} = I_9 + I_{д9} + I_{д11} \ \textbf{(А)}$$

$$R_{36} = \frac{U_{R36}}{I_{R36}} \ \textbf{(Ом)}$$

$$U_{R36} = R_{36} \cdot I_{R36} \ \textbf{(В)}$$

$$U_{КЭ9} = E_К - U_{КЭ12} - U_{защ} - U_{БЭ11} - U_{R36} \ \textbf{(В)}$$

$$U_{R35} = R_{35} \cdot I_{R35} \ \textbf{(В)}$$

$$I_{R34,R33} = I_9 + I_{б10} \ \textbf{(А)}$$

$$U_{R34} = E_к - U_{кэ12,13} - U_{защ} - U_{бэ10,11} - U_{R35} \ \textbf{(В)}$$

$$R_{33} + R_{34} = \frac{E_К - U_{КЭ9} - U_{R36} - U_{R35}}{I_{R34,R33}} \ \textbf{(Ом),}$$

принимаем $R_{33}<R_{34}$

Пересчитываем значения сопротивления резисторов в соответствии с рядом Е24: $R_{33}+R_{34}=$ **(Ом)**

$$I_{R32} = I_д \ \textbf{(А)}$$

$$R_{32} = \frac{U_{БЭ9} + U_{R36}}{I_{R32}} \ \textbf{(Ом),}$$

$$U_{БЭ9} = R_{32} \cdot I_{R32} - U_{R36} \ \textbf{(В)}$$

$$I_{R37,R41} = I_д + I_{б9} \ \textbf{(А)}$$

$$R_{37} + R_{41} = \frac{U_{КЭ13} + U_{R43} - U_{БЭ9} - U_{R36}}{I_{R37,R41}} \ \textbf{(Ом),}$$

принимаем $R_{37}<R_{41}$

Пересчитываем значения сопротивления резисторов в соответствии с рядом Е24: $R_{37}+R_{41}=$ **(Ом)**

21. Определим коэффициент передачи повторителя на транзисторах VT10÷VT13:

$$K_П = \frac{R_Н}{R_{43} + R_Н}$$

22. Проверим правильность выбранного значения $U_{КЭ9}$:

$$U_{КЭ9} > \frac{U_{НМ}}{K_П}$$

23. Определим коэффициент усиления предварительного каскада:

$$K = \frac{R_{К\sim} \cdot \beta_9}{r_{Б9} + r_{Э9} \cdot (1 + \beta_9)};$$

где $r_{б9}$ - объемное сопротивление базы, можно принять в пределах 200-400 Ом;

$r_{Э9}$ - сопротивление эмиттерного перехода, определяется следующим образом:

$$r_{Э9} = \frac{0{,}025}{I_{n9} + I_{Б9}} \qquad \textbf{(Ом);}$$

$R_{ВХ.П}$ – входное сопротивление выходного каскада в целом, определяется:

$$R_{ВХ.П} = 0{,}5 \cdot \beta_{10} \cdot \beta_{12} \cdot R_Н \quad \textbf{(Ом);}$$

$R_{K\sim}$ - эквивалентное сопротивление предварительного каскада, определяется:

$$R_{K\sim} = R_{ВХ.П} \parallel \frac{R_{34}}{1 - K_П} \qquad \textbf{(Ом)}$$

24. Определим коэффициент усиления каскада в целом:

$$K_{УМ} = K \cdot K_П$$

25. Охватим каскад глубокой отрицательной параллельной обратной связью по напряжению.

Глубина обратной связи определяется как:

$$F = \frac{K_{f0}}{K_f}$$

где: K_{f0} - исходный коэффициент нелинейных искажений, равный 5%,

K_f - заданный коэффициент нелинейных искажений.

Входное сопротивление транзистора VT9 определяется следующим образом:

$$R_{вх.VT9} = r_{б9} + r_{э9} \cdot (1 + \beta_9)$$

Входное сопротивление выходного каскада без ООС определяется как:

$$R_{ВХ.У.М} = R_{ВХ.VT9.} \parallel R_{32} \parallel R_{37}$$

Т.к. $R_{ВХ\ У.М.} \rightarrow R_{31}$ принимаем R_{31} равным входному сопротивлению выходного каскада, R_{31} = **(Ом)** в соответствии с рядом Е24.

Определяем эквивалентное сопротивление:

$$R_{ЭКВ} = R_{ВХ.У.М} \parallel R_{31} \textbf{ (Ом)}$$

$$\beta = \frac{F - 1}{K_{У.М.}}$$

Определяем сопротивление R_{38}:

$$R_{38} = R_{ЭКВ}\left(\frac{1}{\beta} - 1\right) \textbf{ (Ом),}$$

Из полученного выражения следует, что:

$$\beta_{экв} = \frac{R_{ЭКВ}}{R_{ЭКВ} + R_{38}}$$

Пересчитаем значение глубины обратной связи:

$$F = 1 + \beta_{экв} \cdot K_{УМ}$$

Определим коэффициент усиления выходного каскада с ООС:

$$K_{OC} = 10 \cdot \frac{K_{УМ.}}{F} \cdot \frac{R_{38}}{R_{38} + R_{ЭКВ}} \cdot \frac{R_{ВХ.У.М.}}{R_{31} + R_{ВХ.У.М}}$$

При этом необходимо пересчить входное сопротивление усилителя мощности:

$$R_{ВХ.У.М.} = \frac{R_{31}\left(1 + \beta \cdot K_{УМ.}\right)}{\beta_{экв}\left(1 + K_{УМ.}\right)} \textbf{ (Ом)}$$

26. Определим входное напряжение усилителя мощности.

$$U_{BX} = \frac{U_{H.M}}{K_{OC}} \quad \textbf{(В)}$$

27. Определим значение емкости конденсатора фильтра и выберем конденсатор в соответствии с рядом Е24, Е6 или Е3:

$$C_{29} = \frac{10K_{УМ}}{\omega_н \cdot R_{41}} \textbf{ (мкФ)}$$

28. Определим значение емкости конденсатора C_{27} и выберем конденсатор в соответствии с рядом Е24:

$$C_{27} = \frac{20}{\omega_н \cdot R_{35}} \textbf{ (мкФ)}$$

29. Определим значение емкости конденсатора C_{28} и выберем конденсатор в соответствии с рядом Е24:

$$C_{28} = \frac{20}{\omega_H \cdot R_{36}} \textbf{ (мкФ)}$$

30. Определим значение емкости в цепи компенсации C_{30} и выберем конденсатор в соответствии с рядом Е24:

$$C_{30} = \frac{20}{\omega_H \cdot R_{33}} \qquad \textbf{(мкФ)}$$

3.2 Эмиттерный повторитель №3 на транзисторах VT8, VT7

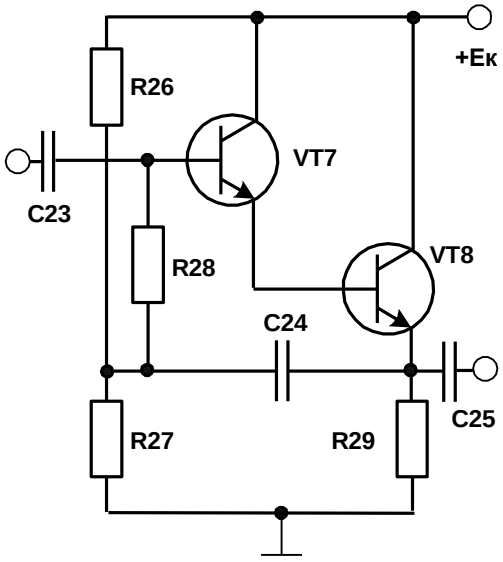


Рис. 3 Принципиальная электрическая схема эмиттерного повторителя №3

Нагрузкой этого эмиттерного повторителя является выходной каскад, поэтому:

$U_H = U_{BX}=$ **(В)**

$R_H = R_{BX.У.М.}=$ **(Ом)**

1. Примем значение тока покоя транзистора VT8 равным 5 мА

$I_{П8} = 5$ **(мА)**

2. Рассчитаем напряжение на участке коллектор-эмиттер транзистора VT8:

$$U_{КЭ8} = Uн+U_0 \quad \textbf{(В)}$$

Определим мощность, рассеиваемую на коллекторе транзистора VT8 $P_{К8} = U_{КЭ8} \cdot I_{П8}$ **(мВт)**

4. Выбираем транзисторы VT7, VT8, в соответствии с полученными параметрами, основные характеристики сводим в таблицу вида:

	Модель	Тип	P, Вт	$U_{кэ\ доп}$, В	I_{kmax}, А	β_{min}	$f_{гр}$, МГц	$I_{ко}$, мА
VT7								
VT8								

5. Зададимся напряжением питания из расчета, что $E_К < U_{КДОП}$
   Принимаем $E_К$ = **(В)**

6. Определим ток базы транзистора VT8

$$I_{Б8} = I_{к7} + \frac{I_{П8}}{\beta_8} \qquad \textbf{(мА)}$$

7. Определим ток базы и ток покоя транзистора VT7:
   По графику зависимости β от тока эмиттера определяем, что β_7 = (7-10).

$$I_{б7} = \frac{I_{б8}}{1+\beta_7} \qquad \textbf{(мА)}$$

$$I_{П7} = \beta_7 \cdot I_{б7} \ \textbf{(мА)}$$

8. Примем ток делителя $I_Д = 10 I_{б7}$ **(мА)**
   Определим значение сопротивления резистора в цепи эмиттера транзистора VT8:

$$I_{R29}=I_{б8}+I_{П8} \quad \textbf{(мА)}$$

$$R_{29} = \frac{E_К - U_{КЭ8}}{I_{R29}} \quad \textbf{(Ом)}$$

   Принимаем R_{29} = **(Ом)**
   В соответствии с этим пересчитаем значения напряжений на участке коллектор-эмиттер транзистора VT8 и определим падение напряжения на резисторе 29:

$$U_{КЭ8}=E_К-R_{29} \cdot I_{R29} \ \textbf{(В)}$$

$$U_{R29}=R_{29} \cdot I_{R29} \ \textbf{(В)}$$

9. Определим значение сопротивления резистор R_{28}:

$$R_{28} = 5\ R_Н \text{ (Ом)}$$

   Принимаем R_{28} = **(Ом)**
Тогда: $I_{R28} = I_{б7}$ **(мА)**
$U_{R28}=R_{28} \cdot I_{R28}$ **(В)**

10. Определим значения сопротивлений резисторов в цепи делителя:

$$I_{R27} = I_Д \ \textbf{(мкА)}$$

$$R_{27} = \frac{U_{R28} + U_{R29} + U_{БЭ8} + U_{БЭ7}}{I_{R27}} \ \textbf{(Ом)}$$

   Принимаем R27 = **(Ом)**

Тогда: $U_{R27}=R_{27}\cdot I_{R27}$ **(В)**

$$U_{БЭ8} = U_{R27} - (U_{R28} + U_{R29} + U_{БЭ7})$$ **(В)**

$$I_{R26} = I_{Д} + I_{б7}$$ **(А)**

$$R_{26} = \frac{E_K - U_{R27}}{I_{R26}}$$ **(Ом)**

Принимаем R26 = **(кОм)**

11. Определим значения эквивалентного сопротивления резистора эмиттера $R_{Э\sim}$:

$R_{Э\sim} = R_Н \| R27 \| R29 \| R26$ **(Ом)**

12. Определим коэффициент передачи повторителя:

$$r_{Э8} = \frac{0{,}025}{I_{П8} + I_{б8}}$$ **(Ом)**

$$K_п = \frac{R_{Э\sim}}{r_{Э8} + R_{Э\sim}}$$

13. Определим входное сопротивление повторителя:

$$R_{ВХ.п.} = (R_{Э\sim} \cdot \beta_7 \cdot \beta_8) \| \frac{R28}{1 - K_п}$$ **(Ом)**

14. Определим выходное сопротивление повторителя:

$R_{ВЫХП} = r_{Э8}$ **(Ом)**

15. Определим значение емкости конденсатора C_{24}:

$$C24 = \frac{20}{\omega_н \cdot R26 \| R27}$$ **(мкФ)**

Примем С24= (мкФ)

Рассчитаем напряжение, которое необходимо подать на вход повторителя:

$$U_{ВХП} = \frac{U_{ВЫХ.П.}}{K_П}$$ **(В),**

где $U_{ВЫХ.П.} = U_Н$.

3.3 Аттенюатор

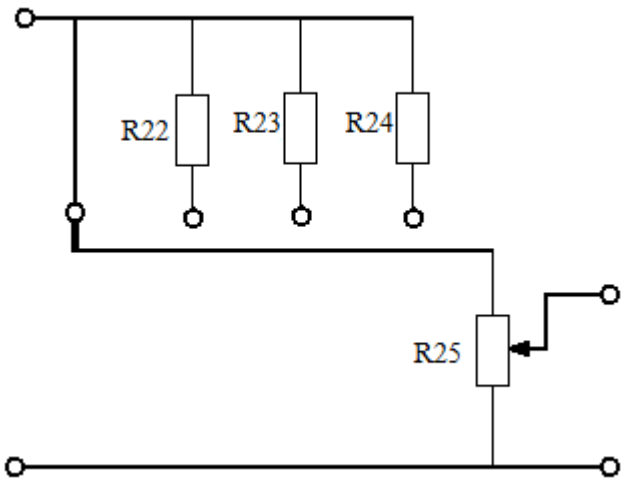


Рис. 4 Принципиальная электрическая схема аттенюатора

Аттенюатор – это устройство, уменьшающее амплитуду сигнала без искажения его формы. Аттенюатор с помощью резистора R_{25} обеспечивает плавную регулировку и при помощи резисторов R_{22}-R_{24} – дискретную.

Т.о. аттенюатор должен обеспечивать дискретное переключение диапазонов и плавное изменение сигнала внутри них:

В техническом задании нам дан аттенюатор со следующими ослаблениями:

0; -X; -Y; -Z.

Разобьем на участки:

(-Z; -Y);

(-Y; -X);

(-X; 0).

Примем R25=3300 Ом, чтобы получался не слишком большой разброс между крайними значениями резисторов $R_{24} \div R_{22}$.

В качестве потенциометра R_{25} выберем резистор с сопротивлением в пределах от 2,0 до 5,1 кОм.

Диапазон ослабления определяется следующим образом:

$$A = 20\lg\frac{U_{вых}}{U_{вх}} = 20\lg\frac{R_{25}}{R_{25}+R_i}\ \textbf{.(дБ)}$$

$$\text{Отсюда } R_i = \frac{R_{25}\left(1-10^{\frac{A}{20}}\right)}{10^{\frac{A}{20}}}\ \textbf{(Ом)}$$

1. $A = -X$ дБ.

$$R_{22} = \frac{R_{25}\cdot\left(1-10^{\frac{-X}{20}}\right)}{10^{\frac{-X}{20}}}\ \textbf{(Ом)}$$

Принимаем значение R_{22}= Ом, в соответствии с рядом Е24.

Тогда ослабление будет несколько отличатся от заданного, реально получаем:

$$A = 20\lg\frac{R25}{R25+R22}\ \textbf{(дБ)}$$

2. $A = -Y$ дБ.

$$R_{23} = \frac{R_{25}\cdot\left(1-10^{\frac{-Y}{20}}\right)}{10^{\frac{-Y}{20}}}\ \textbf{(Ом)}$$

Принимаем значение R_{23}= Ом, в соответствии с рядом Е24.

Тогда ослабление будет несколько отличатся от заданного, реально получаем:

$$A = 20\lg\frac{R25}{R25+R23}\ \textbf{(дБ)}$$

3. $A = -Z$ дБ.

$$R_{24} = \frac{R_{25}\cdot\left(1-10^{\frac{-Z}{20}}\right)}{10^{\frac{-Z}{20}}}\ \textbf{(Ом)}$$

Принимаем значение R_{24}= Ом, в соответствии с рядом Е24.

Тогда ослабление будет несколько отличатся от заданного, реально получаем:

$$A = 20\lg\frac{R25}{R25+R24}\ \textbf{(дБ)}$$

Определим токи проходящие через сопротивления аттенюатора:

$$I_{R25} = \frac{U_{ВХА}}{R_{25}}\ \textbf{(мА),}$$

где входное напряжение аттенюатора соответствует входному напряжению эмиттерного повторителя на транзисторах VT7- VT8:

$$U_{вхА}=U_{вхП3}$$

$$I_{R22} = \frac{U_{ВХА}}{R_{25}+R_{22}}\ \textbf{(мА)}$$

$$I_{R23} = \frac{U_{ВХА}}{R_{25}+R_{23}}\ \textbf{(мА)}$$

$$I_{R24} = \frac{U_{ВХА}}{R_{25}+R_{24}}\ \textbf{(мА)}$$

Рассчитаем мощность, рассеиваемую на резисторах аттенюатора:

$$P_{Ri} = I_i^{\,2}\cdot R_i\ \textbf{(Вт)}$$

3.4 Эмиттерный повторитель №2 на транзисторах VT6, VT5

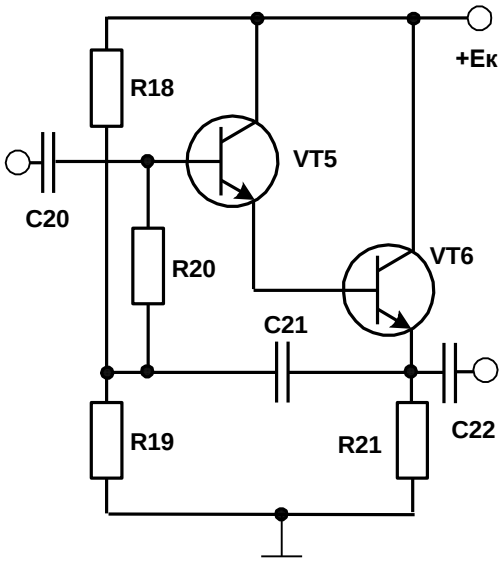


Рис.5 Принципиальная электрическая схема эмиттерного повторителя №2 на транзисторах VT6, VT5

В качестве нагрузки данного эмиттерного повторителя примем R25 аттенюатора:

$U_Н = U_{ВХ\ А}$ (В)

$R_Н = R_{25}$ (Ом)

1. Примем значение тока покоя транзистора VT6 равным 5 мА

$I_{П6} = 5$ **(мА)**

2. Рассчитаем напряжение на участке коллектор-эмиттер транзистора VT6:

$U_{КЭ6} = Uн+U_0$ **(В)**

3. Определим мощность, рассеиваемую на коллекторе транзистора VT6:

$P_{К6} = U_{КЭ6}\cdot I_{П6}$ **(Вт)**

4. Выбираем транзисторы VT5, VT6, в соответствии с полученными параметрами, основные характеристики сводим в таблицу вида:

	Модель	Тип	P, Вт	$U_{кэ\ доп}$, В	I_{kmax}, А	β_{min}	$f_{гр}$, МГц	$I_{ко}$, мА
VT5								
VT6								

5. Зададимся напряжением питания из расчета, что:

$E_к=2\cdot U_{кэ6}$ **(В)**

Принимаем $E_К =$ **(В)**, в соответствии с рядом напряжений источников питания.

6. Определим ток базы транзистора VT6:

$$I_{б6} = I_{к6} + \frac{I_{П6}}{\beta_6} \qquad \textbf{(А),}$$

При этом, $I_{к6} << I_{kmax}$.

7. Определим ток базы и ток покоя транзистора VT7:

По графику зависимости β от тока эмиттера определяем, что β_5 =(7-10).

$$I_{б5} = \frac{I_{б6}}{1+\beta_5} \qquad \textbf{(А)}$$

$$I_{П5} = \beta_5 \cdot I_{б5}$$ **(А)**

8. Примем ток делителя $I_Д = 10 I_{б5}$ **(А)**
9. Определим сопротивление резистора в цепи эмиттера транзистора VT6:

$$I_{R21}=I_{б6}+I_{П6}$$ **(А)**

$$R_{21} = \frac{E_K - U_{КЭ6}}{I_{R21}}$$ **(Ом)**

Принимаем R_{21} = (Ом)

В соответствии с этим пересчитаем значения напряжений на участке коллектор-эмиттер транзистора VT6 и определим падение напряжения на резисторе 21:

$$U_{КЭ6}=E_K-R_{21}\cdot I_{R21}$$ **(В)**

$$U_{R21}=R_{21}\cdot I_{R21}$$ **(В)**

10. Примем значение сопротивления R_{20} максимально большим (≈3900-15000 Ом):
R_{20} = **(Ом)**

Тогда:

$$I_{R20}= I_{б5}$$ **(А)**

$$U_{R20}=R_{20}\cdot I_{R20}$$ **(В)**

11.Определим резисторы в цепи делителя

$$I_{R19} = I_Д$$ **(А)**

Uбэ5, Uбэ6 примем равными 0,7 В

$$R_{19} = \frac{U_{R20} + U_{R21} + U_{БЭ6} + U_{БЭ5}}{I_{R19}}$$ **(Ом)**

Принимаем R_{19} = **(Ом)**

$U_{R19}=R19\cdot I_{R19}$ **(В)**

Пересчитаем значение напряжения $U_{бэ5}$:

$$U_{БЭ5} = \frac{U_{R19} - (U_{R20} + U_{R21})}{2}$$ **(В)**

$$I_{R18} = I_Д + I_{б5}$$ **(А)**

$$R_{18} = \frac{E_K - U_{R19}}{I_{R18}}$$ **(Ом)**

Принимаем R18 = **(Ом)**

12.Определим $R_{Э\sim}$:

$$R_{Э\sim} = R_Н \,||\, R19 \,||\, R21 \,||\, R18$$ **(Ом)**

13.Определим коэффициент передачи повторителя:

$$r_{Э6} = \frac{0.025}{I_{П6} + I_{б6}}$$ **(Ом)**

$$K_п = \frac{R_{Э\sim}}{r_{Э6} + R_{Э\sim}}$$

14. Определим входное сопротивление повторителя

$$R_{вх.п.} = (R_{Э\sim} \cdot \beta_5 \cdot \beta_6) \parallel \frac{R20}{1 - K_n} \textbf{ (Ом)}$$

15. Определим выходное сопротивление повторителя

$$R_{ВЫХП} = r_{Э6} \quad \textbf{(Ом)}$$

16. Определим значение емкости C_{21}:

$$C_{21} = \frac{20}{\omega_н \cdot R_{18} \parallel R_{19}} \textbf{ (мкФ)}$$

Примем C_{21}= **(мкФ)**

Определим входное напряжение повторителя:

$$U_{ВХП} = \frac{U_{ВЫХ.П.}}{K_П} \textbf{ (В)}$$

Перед тем как начать расчет усилителя напряжения нам надо рассчитать входное сопротивление моста Вина, учесть отрицательную обратную связь, которую мы вводим для стабилизации коэффициента усиления, а значит и выходного сигнала.

3.5 Цепь Вина

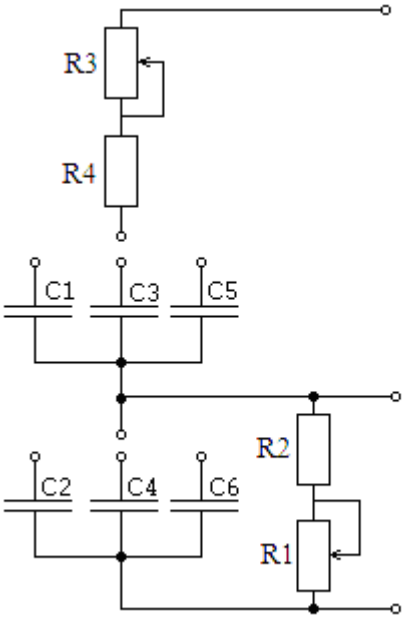


Рис. 6 Принципиальная электрическая схема цепи Вина

Перед тем как начать расчет усилителя напряжения нам надо рассчитать входное сопротивление моста Вина, учесть отрицательную обратную связь, которую мы вводим для стабилизации коэффициента усиления, а значит и выходного сигнала.

Изменение частоты производится дискретно (грубо) с помощью конденсаторов и плавно с помощью переменных резисторов.

Входное сопротивление моста Вина определяется следующим образом:

$$Z_{вх} = R + \frac{1}{j\omega C} + \frac{\frac{R}{j\omega C}}{R + \frac{1}{j\omega C}} = R + \frac{1}{j\omega C} + \frac{R}{j\omega RC + 1} = \frac{j\omega RC + 1}{j\omega C} + \frac{R}{j\omega RC + 1}$$

На частоте квазирезонанса $\omega = \frac{1}{RC}$ следовательно:

$$Z_{вх} = \frac{j+1}{\frac{j}{R}} + \frac{R}{j+1} = \frac{3}{2} R(1-j)$$

$$\left|Z_{вх}\right| = \frac{3}{2} R\sqrt{2}$$

Выходное сопротивление моста Вина определяется:

$$Z_{вых} = \frac{\frac{R}{j\omega C}}{(R + \frac{1}{j\omega C})} = \frac{R}{Rj\omega C + 1}$$

На частоте квазирезонанса $\omega = \frac{1}{RC}$ $Z_{íà\div àñòîêîâàçèð} = \frac{1}{\sqrt{2}} R$

Нагрузкой для моста Вина является эмиттерный повторитель на транзисторах VT1 и VT2 , поэтому предположим, что входное сопротивление эмиттерного повторителя будет максимально большим – в пределах от 150 до 250 кОм. Для того, чтобы $R_{вхп}$ не шунтировало мост Вина:

$$R_{\max ЦВ} = \frac{R_{вхп}}{10} \textbf{ (Ом)}$$

$$R_{\min ЦВ} = \frac{R_{вхп}}{100} \textbf{ (Ом)}$$

Примем значения сопротивлений резисторов цепи Вина R1 и R3, равными максимальному значению сопротивления цепи Вина ($R_{maxЦВ}$), а значения R2 и R4, равными минимальному значению ($R_{mixЦВ}$).

$R_1=R_3=$ **(Ом)**, а $R_2=R_4=$ **(Ом).**

Определим значение выходного сопротивления цепи Вина:

$$R_{выхЦВ\min} = \frac{1}{\sqrt{2}} \cdot R_{\min ЦВ} \textbf{ (Ом)}$$

$$R_{выхЦВ\max} = \frac{1}{\sqrt{2}} \cdot (R_1 + R_2) \textbf{ (Ом)}$$

Определим значение входного сопротивления цепи Вина:

$$R_{вхЦВ\min} = 3 \cdot R_{выхЦВ\min} \textbf{ (Ом)}$$

$$R_{вхЦВ\max} = 3 \cdot R_{выхЦВ\max} \textbf{ (Ом)}$$

Рассчитаем ёмкости C1÷C12:

$$C = \frac{1}{2 \cdot \pi \cdot f_H \cdot 2 \cdot (R_1 + R_2)}$$

$$f_H = \frac{1}{2 \cdot \pi \cdot (R_1 + R_2) \cdot (C_1 + C_2)} \qquad f_B = \frac{1}{2 \cdot \pi \cdot R_2 \cdot (C_1 + C_2)}$$

1. Для первого диапазона (X) Гц ÷ (10X) Гц, (X=$f_н$ из технического задания), при $R_1+R_2=$ Ом :

$$C_1 = C_2 = \frac{1}{2 \cdot \pi \cdot X \cdot 2 \cdot (R_1 + R_2)} \text{ (Ф)},$$

принимаем $C_1 = C_2 =$ **(Ф)**

Пересчитаем значения первого частотного диапазона в соответствии с принятыми значениями емкостей конденсаторов C_1,C_2:

$$f_H = \text{ (Ф)}, \quad f_B = \text{ (Ф)}$$

2. Для второго диапазона (10X) Гц ÷ (100X) Гц:

$$C_3 = C_4 = \frac{1}{2 \cdot \pi \cdot 10 \cdot X \cdot 2 \cdot (R_1 + R_2)} \text{ (Ф)}$$

принимаем C_3=C_4= **(Ф)**

Пересчитаем значения второго частотного диапазона в соответствии с принятыми значениями емкостей конденсаторов C_3,C_4:

$$f_H = \text{ (Ф)}, \quad f_B = \text{ (Ф)}$$

3. Для третьего диапазона (100X) Гц ÷ (1000X) Гц:

$$C_5 = C_6 = \frac{1}{2 \cdot \pi \cdot 100 \cdot X \cdot 2 \cdot (R_1 + R_2)} \text{ (Ф)}$$

принимаем C_5=C_6= **(Ф)**

Пересчитаем значения третьего частотного диапазона в соответствии с принятыми значениями емкостей конденсаторов C_5=C_6:

$$f_H = \text{ (Ф)}, \quad f_B = \text{ (Ф)}$$

Определим токи, протекающие в резисторах:

$$I_{R3} = I_{R4} = I_{вхЦВ.} = \frac{U_{ВХ.П.}}{R_{вхЦВ\min}} \text{ (А)}$$

$$I_{R2} = I_{R1} = \frac{U_{ВЫХ.П}}{R_1 + R_2} = \frac{U_{ВХ.П.}}{3(R_1 + R_2)} \text{ (А)}$$

3.6 Отрицательная нелинейная обратная связь

В качестве нелинейного элемента выбираем лампу накаливания. Нелинейный элемент (НЭ) вводится нами в схему для ограничения амплитуды. Сопротивление НЭ зависит от температуры, а та в свою очередь от баланса мощностей. При этом постоянная времени НЭ, работающего в автогенераторе, должна быть намного больше периода колебаний на самой нижней рабочей частоте, в этом случае температура НЭ на протяжении периода колебаний не может следовать за изменениями мгновенной мощности и остается постоянной с высокой степенью точности. Таким образом, сопротивление НЭ является функцией действующего значения тока или напряжения, а получаемые автоколебания - синусоидальными. Характеристики нелинейного элемента – лампы накаливания:

Тип	$U_{ст}$, В	$I_{ср}$, мА	$I_{р.о.}$, мА	$I_{н}$, мА	t, с
НСМ12х5	0,5 ÷ 3	1	0,6 ÷ 1,8	6	0,4

Найдем напряжение лампы:

$$U_{Л} = \frac{Uн}{3} \quad \textbf{(В)}$$

Рассчитаем значения элементов, через которые реализована обратная связь.

Найдем сопротивление лампочки с помощью ом-амперной характеристики.

$I_л$=0,0013 А, $R_л$ = 1200 Ом

Выбираем резистор R_{12} из условия $R_{12} >> R_л$, предположим, что R_{12}=3·$R_л$=3600 Ом.

Принимаем R_{12} = 3,6 **(кОм)**

$R_{э\sim}$=R_{12} || Rл = **(кОм)**

$R_{СВ}$ = 2·(R_{12} || $R_л$) = **(кОм)**

R_{13} = $R_{СВ}$ = **(кОм)**

Посчитаем сопротивление ООС:

$$R_{ООС} = R_{13} + R_{э\sim} \quad \textbf{(Ом)}$$

Определим коэффициент отрицательной обратной связи и коэффициент усиления:

$$\beta_{ООС} = \frac{R_H \parallel R_{12}}{R_H \parallel R_{12} + R_{СВ}}$$, где $R_н$=$R_{вх.\ п\ на\ VT5,6}$

$$K_{ООС} = \frac{1}{\beta_{ООС}}$$

Определим значения напряжений на резисторах R_{12} и R_{13}

U_{R12} = $U_Н$ = **(В)**

U_{R13} = 2$U_Н$ = **(В)**

Определим значение емкости конденсатор в цепи ОС:

$$C_{18} = \frac{20}{2\pi \cdot f_н \cdot R_{13}} \quad \textbf{(Ф)}$$

Принимаем C_{18}= **(мкФ)**

3.7 Предварительный усилитель

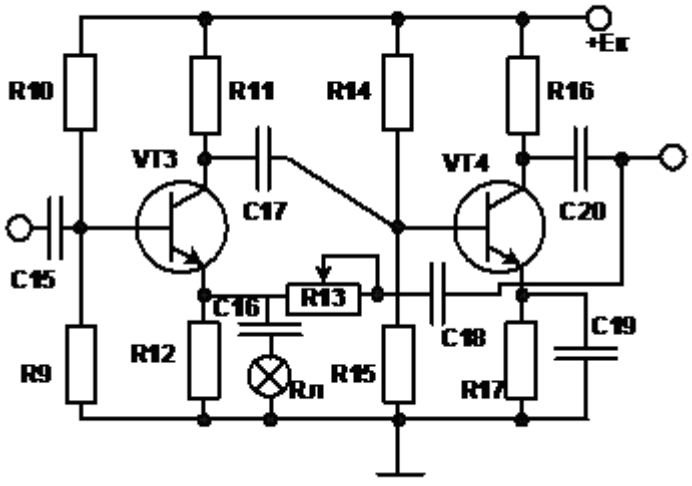


Рис. 7 Принципиальная электрическая схема предварительного усилителя

Этот усилитель выполняет две основные функции:

- ◊ обеспечивает баланс фаз
- ◊ обеспечивает коэффициент усиления ≥ 3

Рассчитаем элементы, относящиеся к усилительному каскаду на транзисторе VT4.

Усилитель напряжения работает на нагрузку (эмиттерный повторитель), на мост Вина, на ООС.

$$U_{вых.у} = U_{вх.п2} = \quad \textbf{(В)}$$

$$R_{н.\,у} = R_{ООС} || R_{вхЦВmin.} || R_{вхп2} \quad \textbf{(Ом)}$$

Определим ток в нагрузке:

$$I_{Н4} = \frac{\sqrt{2} \cdot U_{ВЫХ.,.У.}}{R_{Н.У}} \quad \textbf{(А)}$$

Зададимся I_{Kmin4} и $U_{КЭmin4}$:

$$I_{K\min 4} = 0{,}2 \cdot I_{Н4} + 2 \quad \textbf{(мА)}$$

$$U_{КЭ\min 4} = 0{,}2 \cdot U_{ВЫХ.У} + 2 \textbf{(В)}$$

Определим I_{KMAX4}

$$I_{Kmax4} = (2\sim5) \cdot (2 \cdot I_{H4} + I_{Kmin4}) \quad \textbf{(А)}$$

Определим λ_4:

$$\lambda_4 = \frac{I_{Н4} + I_{K\min 4}}{I_{K\max 4} - I_{Н4}}$$

Определим напряжение питания:

Зададимся $\gamma_4 = 0{,}05$

$$E_K = \frac{1}{1-\gamma_4} \cdot \frac{2 \cdot \sqrt{2} \cdot U_{ВЫХ.У.} + U_{КЭ\min 4} \cdot (1-\lambda_4)}{1-\lambda_4} \textbf{(В)}$$

Принимаем $E_K =$ **(В)**

Пересчитаем γ_4

$$\gamma_4 = 1 - \frac{2 \cdot \sqrt{2} \cdot U_{ВЫХ..У.} + U_{КЭ\min 4} \cdot (1-\lambda_4)}{(1-\lambda_4) E_K}$$

Определяем значение сопротивления резистора в цепи коллектора транзистора VT4:

$$R_{16} = \frac{(1-\gamma_4) \cdot E_K - U_{КЭ\min 4}}{I_{K\max 4} - I_{Н4}} \quad \textbf{(Ом)}$$

Принимаем R16 = **(Ом)**

Определим падение напряжения на резисторе R_{17} и величину напряжения, до которого зарядится конденсатор C_{20}:

$$U_{R17} = E_K \cdot \gamma_4 \quad \textbf{(В)}$$

$$U_{C20} = \sqrt{2} \cdot U_{вых.у.} + U_{КЭmin4} + U_{R17} \quad \textbf{(В)}$$

Определим покоя транзистора VT_4 - $I_{П4}$:

$$I_{П4} = \frac{E_K - U_{C20}}{R16} \quad \textbf{(мА)}$$

Определим напряжение на участке коллектор-эмиттер транзистора VT4 - $U_{КЭ4}$:

$$U_{КЭ4} = E_К – (I_{П4} + I_{Kmin4}) \cdot R_{16} - U_{R17}$$ **(В)**

Определим допустимую мощность, рассеиваемую на транзисторе VT4:

$$P_{КДОП} = I_{П4} \cdot U_{КЭ4}$$ **(Вт)**

Выбираем транзистор VT4, в соответствии с полученными параметрами, основные характеристики сводим в таблицу вида:

	Модель	Тип	P, Вт	$U_{кэ\ доп}$, В	I_{kmax}, А	β_{min}	$I_{ко}$, мА	Ск, мкФ
VT4								

Так как значение I_{k0} сильно отличается от I_{Kmin4}, то произведем перерасчет с учетом того, что $I_{Kmin4} = I_{ко} = 30$ мкА

Определим максимальный ток коллектора транзистора VT4 - I_{Kmax4}:

$$I_{Kmax4} = (2\sim5) \cdot\cdot (2 \cdot I_{Н4} + I_{Kmin4})$$ **(мА)**

Определим ток базы транзистора VT4:

$$I_{б4} = \frac{I_{П4}}{\beta_4}$$ **(мА)**

Определим резистор в цепи эмиттера

$$R_{17} = \frac{U_{R17}}{I_{б4} + I_{П4}}$$ **(Ом)** По ряду Е24 принимаем R_{17}= Ом.

Определим ток делителя:

$$I_Д = (2\sim5) \cdot I_{Б4}$$ **(мА)**

Определим значения сопротивлений резисторов делителя базы:

$$U_{R16} = R_{16} \cdot (I_{б4} + I_{К04})$$ **(В)**

$$R_{14} = \frac{U_{КЭ4} - U_{БЭ4} + U_{R16}}{I_{б4} + I_Д}$$ **(Ом)**

Принимаем R_{14}= **(Ом)**

$$U_{БЭ4} = U_{КЭ4} + U_{R16} - R14 \cdot (I_{б4} + I_Д)$$ **(В)**

$$R_{15} = \frac{E_К - R_{14}(I_{б4} + I_Д)}{I_{К04} + I_Д}$$ **(Ом)**

Принимаем R_{15}= **(Ом)**

$$I_{R15} = I_{к04} + I_д$$ **(А)**

Определим значение емкости конденсатора в цепи эмиттера:

$$C_{19} = \frac{(10 \sim 20)}{\omega_н \cdot R_{17}}$$ **(Ф)**

Принимаем C_{19} = **(мкФ)**

Определим коэффициент усиления каскада на транзисторе VT4:

$$K_4 = \frac{R_{К\sim4} \cdot \beta_4}{r_{Б4} + r_{Э4} \cdot (1 + \beta_4)},$$

где значение сопротивления в области базы примем $r_{Б4}$ = 400 (Ом).

$$r_{Э4} = \frac{0{,}025}{I_{П4} + I_{б4}} \text{ (Ом)}$$

$$R_{к\sim4} = R_{Н4} \parallel R_{16} \textbf{ (Ом)}$$

Определим входное и выходное сопротивления каскада на транзисторе VT4:

$$R_{ВХ4} = R_{14} \parallel R_{15} \parallel (r_{Б4} + r_{Э4} \cdot (1+\beta_4)) \textbf{ (Ом)}$$

$$r_{К4} = \frac{U_{КЭ4}}{I_{П4}} - r_{Э4} \textbf{ (Ом)}$$

$$R_{ВЫХ4} = r_{К4} \parallel R_{16} \textbf{ (Ом)}$$

Определим входное напряжение каскада на транзисторе VT4:

$$U_{ВХ4} = \frac{U_{ВЫХ.У.}}{K_4} \textbf{ (В)}$$

Рассчитаем элементы, относящиеся к усилительному каскаду на транзисторе VT3.

$$U_{ВЫХ.У.} = U_{вх4} \text{ (В)}$$

$$R_{Н.У.} = R_{ВХ4} = \text{ (Ом)}$$

Определим ток в нагрузке:

$$I_{Н3} = \frac{\sqrt{2} \cdot U_{ВЫХ.У.}}{R_{Н.У}} \textbf{ (мА)}$$

Зададимся значениями тока и напряжения I_{Kmin3} и $U_{КЭmin3}$:

$$I_{K\min 3} = 0{,}2 \cdot I_{Н4} + 2 \textbf{ (мА)}$$

$$U_{КЭ\min 3} = 0{,}2 \cdot U_{ВЫХ.У} + 2 \textbf{ (В)}$$

Определим максимальное значение тока коллектора транзистора VT3 - I_{KMAX3}:

$$I_{Kmax3} = (2\sim5) \cdot (2 \cdot I_{Н3} + I_{Kmin3}) \textbf{ (мА)}$$

Определим величину γ_3:

$$\gamma_3 = \frac{U_{R12}}{E_К}$$

Определяем значение сопротивления резистора в цепи коллектора транзистора VT3:

$$R_{11} = \frac{(1+\gamma_3) \cdot E_К - U_{КЭ\min 3}}{I_{K\max 3} - I_{Н3}} \textbf{ (Ом)}$$

Принимаем R_{11} = **(Ом)**

Определим падение напряжения на разделительном конденсаторе C_{17}:

$$U_{C17} = \sqrt{2} \cdot U_{ВЫХ.У.} + U_{КЭmin3} + U_{R12} \textbf{ (В)}$$

Определим ток покоя транзистора VT3 $I_{П3}$:

$$I_{П3} = \frac{E_К - U_{C17}}{R_{11}} \textbf{ (мА)}$$

Определим значения напряжения на участке коллектор-эмиттер транзистора VT3:

$$U_{КЭ3} = E_К – (I_{П3} + I_{Kmin3}) \cdot R_{11} - U_{R12} \quad \textbf{(В)}$$

Определим допустимую мощность, рассеиваемую на транзисторе VT3:

$$P_{КДОП} = I_{П3} \cdot U_{КЭ3} \quad \textbf{(Вт)}$$

Выбираем транзистор VT3, в соответствии с полученными параметрами, основные характеристики сводим в таблицу вида:

	Модель	Тип	P, Вт	$U_{кэ\ доп}$, В	I_{kmax}, А	β_{min}	$I_{ко}$, мА
VT3							

Определим ток базы транзистора VT3:

$$I_{б3} = \frac{I_{П3}}{\beta_3} \quad \textbf{(мА)}$$

Определим значение сопротивления резистора в цепи эмиттера:

$$R_{12} = \frac{U_{R12}}{I_{б3} + I_{П3}} \quad \textbf{(Ом)}$$

По ряду E24 принимаем R_{12}= **(Ом)**

Определим ток делителя:

$$I_Д = (2\sim5) \cdot I_{б3} \quad \textbf{(мА)}$$

Определим значение сопротивлений резисторов делителя базы:

$$U_{R11} = R_{11} \cdot (I_{б3} + I_{k03}) \quad \textbf{(В)}$$

$$R_{10} = \frac{U_{КЭ3} - U_{БЭ3} + U_{R11}}{I_{б3} + I\partial} \quad \textbf{(Ом)}$$

Принимаем R10= **(Ом)**

$$U_{БЭ3} = U_{КЭ3} + U_{R11} - R_{10} \cdot (I_{б3} + I_Д) \quad \textbf{(В)}$$

$$R_9 = \frac{E_К - R_{10}(I_{б3} + I_Д)}{I_{k03} + I_\partial} \quad \textbf{(Ом)}$$

Принимаем R_9= **(Ом)**

$$I_{R9} = I_{k03} + I_\partial \quad \textbf{(А)}$$

Определим значение емкости конденсатора в цепи эмиттера :

$$C_{16} = \frac{10}{\omega_н \cdot R_Л} = \frac{10}{2 \cdot \pi \cdot R_л} \quad \textbf{(Ф)}$$

Принимаем C_{16} = **(Ф)**

Определим коэффициент усиления каскада (без ООС) на транзисторе VT3:

$$K_3 = \frac{R_{К\sim3} \cdot \beta_3}{r_{б3} + r_{Э3} \cdot (1 + \beta_3)}$$

где: $r_{Б3}$ = 400 **(Ом)**

$$r_{Э3} = \frac{25}{I_{П3} + I_{б3}} \text{ (Ом)}$$

$$R_{K\sim3} = R_{Н3} \parallel R_{11} \text{ (Ом)}$$

Определим входное сопротивление каскада на транзисторе VT3:

$$R_{ВХ3}=R_{10}\|R_9\|(r_{б3}+r_{э3}\ (1+\beta_3)) \text{ (Ом)}$$

Определим выходное сопротивление каскада на транзисторе VT3:

$$r_{К3} = \frac{U_{КЭ3}}{I_{П3}} - r_{Э3} \text{ (Ом)}$$

$$R_{ВЫХ4} = r_{К3} \parallel R_{11} \text{ (Ом)}$$

Определим общий коэффициент усиления каскадов:

$$K=K_3 \cdot K_4$$

Определим входное напряжение предварительного усилителя:

$$U_{ВХ.У} = \frac{U_{ВХ.П2}}{K_{ООС}} \text{ (В)}$$

3.8 Эмиттерный повторитель №1 на транзисторах VT2, VT1

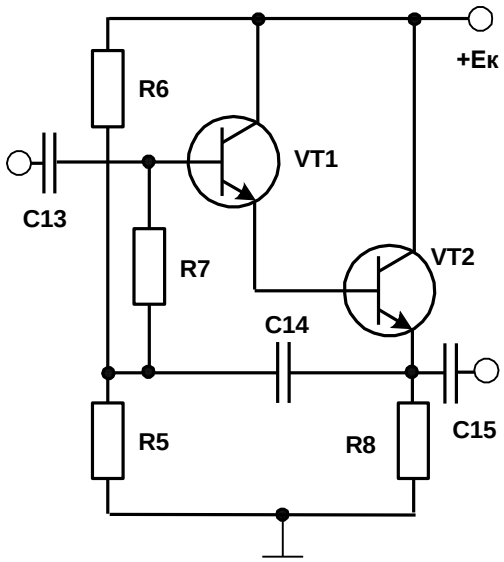


Рис.8 Принципиальная электрическая схема эмиттерного повторителя №1 на транзисторах VT2, VT1

Нагрузкой этого эмиттерного повторителя является предварительный усилитель, поэтому:

$$U_Н = U_{ВХ.У} = \text{ (В)}$$

$$R_Н = R_{ВХ.З} = \text{ (Ом)}$$

Примем значение тока покоя транзистора VT2 равным 5 мА

$$I_{П2} = 5 \text{ (мА)}$$

Примем значение максимального напряжения на участке коллектор-эмиттер равным 20 В, тогда минимальное значение этого напряжения составит:

$U_{КЭ2min} = 0{,}1 \cdot U_{КЭ2max} = 2$ **(В)**

Рассчитаем значение напряжения $U_{КЭ2}$:

$U_{КЭ2} = U_н + U_{КЭ2min}$ **(В)**

Определим мощность, рассеиваемую на коллекторе транзистора VT2:

$P_{К2} = U_{КЭ2} \cdot I_{П2}$ **(Вт)**

Определим напряжение источника питания:

$E_к = 2 \cdot U_{КЭ2}$ **(В)**

Примем Ек= (В)

Выбираем транзисторы VT1, VT2, в соответствии с полученными параметрами, основные характеристики сводим в таблицу вида:

	Модель	Тип	P, Вт	$U_{кэ\ доп}$, В	I_{kmax}, А	β_{min}	$f_{гр}$, МГц	$I_{ко}$, мА
VT1								
VT2								

Определим ток базы транзистора VT2:

$$I_{б2} = \frac{I_{П2}}{\beta_2} \quad \textbf{(мА)}$$

Определим ток базы и ток покоя транзистора VT1:

По графику зависимости β от тока эмиттера определяем, что $\beta_1 \approx 7{,}5$.

$$I_{б1} = \frac{I_{б2}}{1+\beta_1} = \textbf{(А)}$$

$$I_{П1} = \beta_1 \cdot I_{б1} \textbf{ (А)}$$

Примем значение тока делителя равным: $I_Д = 10 \cdot I_{б1}$ **(А)**

Определим значение сопротивления резистора в цепи эмиттера транзистора VT2:

$I_{R8} = I_{б2} + I_{П2}$ **(А)**

$$R_8 = \frac{E_K - U_{КЭ2}}{I_{R8}} \textbf{ (Ом)}$$

Принимаем R_8 = **(Ом)**

$U_{КЭ2} = E_К - R_8 \cdot I_{R8}$ **(В)**

$U_{R8} = R_8 \cdot I_{R8}$ (В)

Примем значение сопротивления резистора R_7 =6200 Ом:

Тогда:

$I_{R7} = I_{б1}$ **(А)**

$U_{R7} = R_7 \cdot I_{R7}$ **(В)**

Определим значение сопротивлений резисторов в цепи делителя:

$$I_{R5} = I_Д \quad \textbf{(А)}$$

$$R_5 = \frac{U_{R7} + U_{R8} + U_{БЭ4}}{I_{R5}} \textbf{ (Ом)}$$

Принимаем R_5 = **(Ом)**

$U_{R5} = R_5 \cdot I_{R5}$ **(В)**

$$U_{БЭ1} = \frac{U_{R5} - (U_{R7} + U_{R8})}{2}$$ **(В)**

$$I_{R6} = I_{Д} + I_{б1}$$ **(А)**

$$R_6 = \frac{E_K - U_{R7}}{I_{R6}}$$ **(Ом)**

Принимаем R_6 = **(Ом)**

Будем вести расчет эмиттерного повторителя по переменному току:

Определим эквивалентное сопротивление эмиттера $R_{Э\sim}$:

$$R_{Э\sim} = R_Н \| R_5 \| R_6 \| R_8$$ **(Ом)**

Определим коэффициент передачи повторителя:

$$r_{Э2} = \frac{0{,}025}{I_{П2} + I_{б2}}$$ **(Ом)**

$$K_п = \frac{R_{Э\sim}}{r_{Э2} + R_{Э\sim}}.$$

Определим входное сопротивление повторителя:

$$R_{ВХ.П} = (R_{Э\sim} \cdot \beta_1 \cdot \beta_2) \| \frac{R_7}{1 - K_п}$$ **(Ом)**

Определим выходное сопротивление повторителя:

$$R_{ВЫХ.П} = r_{Э2}$$ **(Ом)**

Определим значение емкости конденсатора C_{14}:

$$C_{14} = \frac{20}{\omega_н \cdot R_6 \| R_5} = \frac{20}{2 \cdot \pi \cdot f_н \cdot R_6 \| R_5}$$ **(Ф)**

Примем C_{14}= **(мкФ)**

Определим входное напряжение повторителя:

$$U_{ВХ.П} = \frac{U_{ВЫХ.П}}{K_П}$$ **(В)**

4. Расчет разделительных конденсаторов

Значения емкости разделительных конденсаторов рассчитываются исходя из приходящихся на них частотных искажений в области нижних частот. Имеется 9 разделительных конденсаторов. Распределим искажения равномерно между ними:

$$M_Н = \sqrt[n]{M_{НЗ}}\ ,$$

где n - количество разделительных емкостей.

Заданные коэффициенты частотных искажений в области нижних частот приведены в техническом задании. Определим, какие частотные искажения приходятся на одну разделительную емкость:

$$M_{нi} = \sqrt[9]{M_н}$$

Следовательно емкость конденсатора должна быть:

$$C \geq \frac{1}{2\pi f_н \left(R_г + R_{вх}\right)\sqrt{M_{нi}^2 - 1}}$$

Разделительные емкости рассчитываются следующим образом:

во входной цепи $C_{вх} = \dfrac{1}{2 \cdot \pi \cdot \mathrm{f_н} \cdot (R_г + R_{вх})\sqrt{M_{вх}{}^2 - 1}}$ **(Ф),**

где $M_{ВХ}$ - частотные искажения, вносимые входной цепью.

Определим значение емкостей конденсаторов C_{13} ,C_{15}, C_{17}, C_{20}, C_{22}, C_{23}, C_{25}, C_{26}, C_{31}:

Конденсатор С13.

$R_г = 0$ **(Ом);**

$R_{вх} = R_{вх.\,повт.\,на\,VT1,2}$ **(Ом);**

Выбираем конденсатор C_{13} типа ( ) на( ) мкФ, ( ) В.

Конденсатор С15.

$R_г = 0$ **(Ом);**

$R_{вх} = R_{вх.\,ус.\,на\,VT3,4}$ **(Ом);**

Конденсатор С17.

$R_г = R_{к\ ус\ на\ VT3,4} = \mathrm{R}_{11}$ **(Ом);**

$\mathrm{R}_{вх} = R_{вх.4} = R_{н.\,ус\,на\ VT3}$ **(Ом);**

Конденсатор С20.

$R_г = R_{кусна VT4} = \mathrm{R}_{16}$ **(Ом);**

$R_{вх} = R_{вх.\,повт.\,на\,VT5,6}$ **(Ом);**

Конденсатор С22.

$R_г = r_{э6}$ **(Ом);**

$R_{вх} = R_{атт} = \mathrm{R}_{25}$ **(Ом);**

Конденсатор С23.

$R_г = r_{э6} \parallel \mathrm{R}_{атт} = \mathrm{r}_{э6} \parallel \mathrm{R}_{25}$ **(Ом);**

$R_{вх} = R_{вхповтVT7,8}$ **(Ом);**

Конденсатор С25.

$R_г = r_{э8}$ **(Ом);**

$R_{вх} = R_{нповтVT7,8} = R_{31}$ **(Ом);**

Конденсатор С26.

$R_г = 0$ **(Ом);**

$R_{вх} = R_{ВХ.У.М}$ **(Ом);**

Конденсатор С31.

$R_г = 0$ **(Ом);**

$R_{вх} = R_{экв} = \mathrm{R}_{\mathrm{ВХ.У.М.}} \| \mathrm{R}_{31}$ **(Ом);**

5. Расчет параметрических стабилизаторов напряжения

Так как выходной усилительный каскад питается от источника питания $E_К$ = В, а остальным каскадам и эмиттерным повторителям необходимы другие значения напряжений источников питания, то необходимо уменьшить напряжение питания выходного каскада для остальных элементов схемы. Для решения этой задачи применяется схема параметрического стабилизатора напряжения:

Принципиальная электрическая схема параметрического стабилизатора напряжения на стабилитроне приведена на рисунке 9:

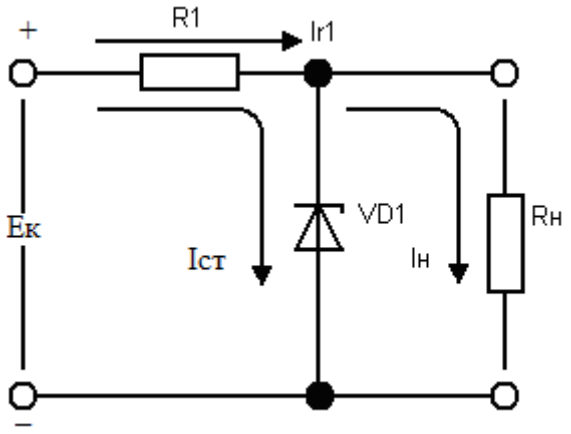


Рис.9 Принципиальная электрическая схема параметрического стабилизатора

Принцип действия данного стабилизатора основан на стабилизации напряжения на нагрузке (на Rн) на уровне напряжения стабилизации стабилитрона VD1. Данный стабилизатор представляет собой делитель напряжения, одним из плечей которого является балластный резистор R_1, а вторым - соединенные стабилитрон VD1 и нагрузка Rн. Расчет делителя напряжения проще всего производить, используя закон Ома для участка цепи. т.о. расчет сводится к выбору номинала и мощности балластного резистора R_1.

Исходными данными для расчета являются:

a) Входное напряжение ($U_{вх}$ =$E_к$), в данном случае равное напряжению источника питания всего устройства или напряжению питания выходного каскада.

b) Необходимое напряжение на нагрузке ($U_{Rн}$ =Ек $_{э.п.\ на\ VTi}$ или $U_{Rн}$ =Ек $_{ус\ на\ VTi}$), в данном случае равное напряжению питания для какого-либо эмиттерного повторителя либо предварительного усилителя.

с) Ток, потребляемый нагрузкой (Iн), в данном случае равный току для какого-либо эмиттерного повторителя либо предварительного усилителя.

1. С учетом исходных данных выбирается стабилитрон с напряжением стабилизации U_{VD1} (или $U_{ст}$), равным или близким $U_{Rн}$, и током стабилизации $I_{ст}$, большим примерно в 2 раза, чем ток, потребляемый нагрузкой. Далее, у выбранного стабилитрона сводим основные характеристики в таблицу вида:

Позиционное обозначение	Тип	$U_{ст\ min}$, В	$U_{ст\ max}$, В	$U_{ст\ ном}$, В	$I_{ст}$, А
VD_i					

2. Как видно из рисунка, ток протекающий через балластный резистор R_1 является суммой тока стабилизации стабилитрона VD1 - $I_{ст}$ и тока, потребляемого нагрузкой Iн. Именно этот ток ($I_н=I_{R1}$) и следует использовать в дальнейших расчетах. В качестве I_{R1} принимается сумма токов протекающих через эмиттерный повторитель или предварительный усилитель:

$$I_{R1i} = \sum I_i \quad \textbf{(А)}$$

Например, для эмиттерного повторителя на VT7-VT8 значение тока I_{R1} определяется следующим образом:

$I_{R1VT7,8}=I_{ст}+I_д + I_{б7} + I_{к7} + I_{к8}$ **(А)**

Для эмиттерного повторителя на транзисторах VT5-VT6:

$I_{R1VT5,6}= I_{ст}+I_д + I_{б5} + I_{к5} + I_{к6}$ **(А)**

Для эмиттерного повторителя на транзисторах VT1-VT2:

$I_{R1VT1,2}= I_{ст}+I_д + I_{б1} + I_{к1} + I_{к2}$ **(А)**

Для предварительного усилителя на транзисторах VT3,VT4:

$I_{R1VT3,4}= I_{ст}+I_д + I_{б3} + I_{к3}+I_{б4} + I_{к4}$ **(А)**

Из закона Ома для участка цепи определяем значение тока, проходящего через балластный резистор:

$$I_{R1} = \frac{E_к - U_{VD1}}{R_1} \quad \textbf{(А)}$$

3. Значение балластного сопротивления определяется из предыдущего пункта т.е.:

$$R_1 = \frac{E_к - U_{VD1}}{I_{R1}} \quad \textbf{(Ом)}$$

Реальное значение сопротивления R_1 выбирается, как ближайшее к полученному из ряда Е24.

4. Имея значение сопротивления резистора R_1 и ток, протекающий через него, рассчитывается мощность рассеяния резистора R_1:

$$P_{R_1} = (E_к - U_{ст}) \cdot I_{R_1} \quad \textbf{(Вт)}$$

На рисунке 10 приведена схема стабилизатора напряжения для одного из каскадов усилителя.

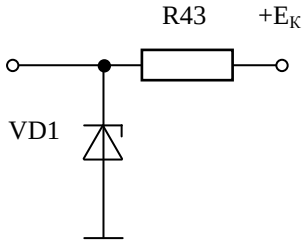


Рис. 10 Схема параметрического стабилизатора напряжения

Пример расчета для одного из нескольких, необходимых в схеме, параметрических стабилизаторов:

Выходной усилительный каскад питается от источника питания $E_К$ = 50 В, а эмиттерный повторитель №1 на транзисторах VT1- VT2 от $E_К$ = 9 В, то необходимо уменьшить напряжение питания.

1. Выбираем стабилитрон с подходящими параметрами:

В качестве стабилизатора VD1 выбираем:

Позиционное обозначение	Тип	$U_{ст\ min}$, В	$U_{ст\ max}$, В	$U_{ст\ ном}$, В	$I_{ст\ ном}$, А
VD_1	КС482А	8,5	10,2	9	0,005

Рассчитаем сопротивление R_{41}:

$$R_{43} = \frac{U_{R43}}{I_{R43}} \ \textbf{(В)}, \text{ где}$$

2. Определяем значение суммы токов, протекающих через балластный резистор:

$$I_{R43} = I_{ст} + \sum I_{эп1} \ \textbf{(А)}$$

$$\sum I_{эп1} = I_{к2} + I_{к1} + I_{б1} + I_{Д} = 3 + 0{,}0227 + 0{,}00227 + 0{,}227 = 3{,}252 мА$$

тогда $I_{R43} = I_{ст} + \sum I_{эп1}$ =5+3,314 = 8,314 **мА**

$$U_{R43} = E_к - 9 = 50 - 9 = 41 \textbf{ В}$$

3. Определяем значение сопротивления балластного резистора:

$$R_{43} = \frac{U_{R43}}{I_{R43}} = \frac{41}{8{,}314} = 4{,}931 \textbf{ кОм}$$

Принимаем: R_{43} = 5,1 кОм

4. Определяем мощность рассеяния резистора R_{41}:

$$P_{R43} = U_{R43} \cdot I_{R43} = 0{,}341 \textbf{ Вт}$$

6. Расчет радиаторов

Радиаторы предназначены для отвода тепла от транзисторов в схеме, при мощности, превышающей 1,5 Вт. Т.о. те транзисторы, на которых рассеивается мощность более 1,5 Вт необходимо вынести за разъем, а также рассчитать для каждого площадь радиатора.

Площадь радиатора определим следующим образом:

$$S = \frac{1000}{R_{Tп-с} \cdot \sigma T} \ \textbf{(см}^2\textbf{)} \ , \text{ где}$$

σТ-коэффициент теплоизлучения от теплоотвода в окружающую среду (для дюралюминия σТ = 1,5 (мВт / см^2·°С);

$R_{Тп-с}$ – тепловое сопротивление переход-среда, определяется следующим образом:

$$R_{Tп-с} = \frac{T_п - T_с}{P_с} \ \textbf{(К/Вт)}, \text{ где}$$

T_c - температура среды (в техническом задании задан диапазон рабочих температур усилителя – от 10 до 30 °С , выбираем верхнее значение этого диапазона → T_c=30°С);
$T_п$ - температура p-n - перехода, (определяется исходя из справочных данных, можно принять в пределах от 125 до 200 °С);
P_c – мощность, которую необходимо рассеять.

Затем необходимо привести рисунок радиатора с указанием его линейных размеров (в см).

Пример:

В качестве выходных транзисторов VT12 и VT13 выбраны транзисторы типа КТ928Г . У них температура p-n-перехода $T_п$ = 150°С (данные из справочника). Необходимо рассеять мощность Рк = 19,14 (Вт). Произведем расчет теплового сопротивления переход-среда:

$$R_{Tn-c} = \frac{T_n - T_c}{P_c} = \frac{150-30}{19{,}14} = 6{,}27 \quad \textbf{К/Вт}$$

Определим площадь радиатора из дюралюминия:

$$S = \frac{1000}{R_{T\,n-c} \cdot \sigma T} = \frac{1000}{6{,}27 \cdot 1{,}5} = 106{,}33 \ \textbf{см}^2$$

Рисунок: (Необходимо привести рисунок радиатора по тем размерам, которые получились в расчете).

7. Расчет АФХ и ФЧХ усилителя на транзисторе VT4

Рассчитаем амплитудно-частотную и фазо-частотную характеристики для предварительного усилителя на транзисторе VT4, без ОС, для диапазона частот, где частотные искажения не превышают $\sqrt{2}$.

Для расчета АЧХ воспользуемся формулами:

$$K(\omega) = \frac{K_4}{M_н \cdot M_в}, \text{ где}$$

K_4 – коэффициент усиления на средних частотах для усилительного каскада на транзисторе VT4.

1. Рассчитаем зависимость коэффициента усиления на НЧ от частоты:

$$K_{нч} = \frac{K_4}{M_H}$$

Определим значение коэффициента частотных искажений в области низких частот:

$$M_H = M_{НВх} \cdot M_{НВых} -$$

$$M_{HBx} = \sqrt{1 + \frac{1}{(\omega \cdot \tau_{HBx})^2}}$$

$$M_{НВых} = \sqrt{1 + \frac{1}{(\omega \cdot \tau_{НВых})^2}}, \text{ где}$$

$$\tau_{H\ BX} = C_{17} \cdot \left(R_{BX.Уна\text{VT4}} + R_{ВЫХ.Уна\text{VT3}}\right)\ \textbf{(с)}$$

$$\tau_{H\ ВЫХ} = C_{20} \cdot \left(R_{ВЫХ.Уна\text{VT4}} + R_{BX.повтн\text{VT56}}\right)\ \textbf{(с)}$$

Определим частоту, на которой Мн=$\sqrt{2}$:

$$M_H = M_{\text{НВх}} \cdot M_{\text{НВых}} = \sqrt{2}$$

$$M_H = \sqrt{1+\frac{1}{\left(2\cdot\pi\cdot \text{f}_\text{н}\cdot\tau_{HBx}\right)^2}} \cdot \sqrt{1+\frac{1}{\left(2\cdot\pi\cdot \text{f}_\text{н}\cdot\tau_{HBых}\right)^2}} = \sqrt{2}$$

Решив это уравнение относительно $f_н$ получим значение нижней граничной частоты полосы пропускания. Т.О. $f_н$= Гц.

Задаваясь различными значениями частот fн найдем значения соответствующих коэффициенту усиления $K_{нч}$:

№	$f_н$, Гц	$\omega = 2*\pi*f$	$M_н$	$K_{нч}$
1				
2				
3				
4				
5				
6				
7				

2. Рассчитаем зависимость коэффициента усиления на ВЧ от частоты:

$$K_{вч} = \frac{K_4}{M_B}$$

Определим значение коэффициента частотных искажений в области высоких частот:

$$M_B = \sqrt{1+\left[\omega\cdot\left(\tau_в + \tau_\beta\right)\right]^2}\ \text{, где}$$

$$\tau_\beta = \frac{1}{2\cdot\pi\cdot f_в}\ \textbf{(с)}$$

$C_{0\text{на VT4}}=C_{K4}+C_M+C_2$ **(пФ)**

$$\tau_B = C_{0на\text{VT4}} \cdot R_{K\sim}\quad \textbf{(с)}$$

Определим частоту, на которой Мв=$\sqrt{2}$:

$$M_B = \sqrt{1+\left[\omega\cdot\left(\tau_в + \tau_\beta\right)\right]^2} = \sqrt{2}$$

Решив это уравнение относительно $f_в$ получим значение нижней граничной частоты полосы пропускания. Т.О. $f_в$= Гц.

Задаваясь различными значениями частот fв найдем значения соответствующих коэффициенту усиления $K_{вч}$:

№	$f_в$, Гц	$\omega = 2*\pi*f$	$M_в$	$K_{вч}$
1				
2				
3				
4				
5				
6				
7				

Для расчета ФЧХ воспользуемся формулой:

$$\varphi(\omega) = \frac{\pi}{2} - arctg(\omega \cdot \tau_{H\ BX}) + \frac{\pi}{2} - arctg(\omega \cdot \tau_{H\ ВЫХ}) - arctg(\omega \cdot (\tau_{\beta} + \tau_{B}))$$

Задаваясь различными значениями частот f, найдем значения соответствующих фаз φ:

№	f, Гц	$\omega = 2 * \pi * f$	φ, рад.	φ, град.	M
1					
2					
3					$\sqrt{2}$
4					
5					
6					
7					
8					
9					
10					
11					
12					$\sqrt{2}$
13					
14					

Пользуясь данными расчетов, приведенных выше, необходимо произвести построение АЧХ и ФЧХ:

На рисунке 11 приведена амплитудно-частотная характеристика, на рисунке 12 приведена фазо-частотная характеристика усилителя.

АЧХ

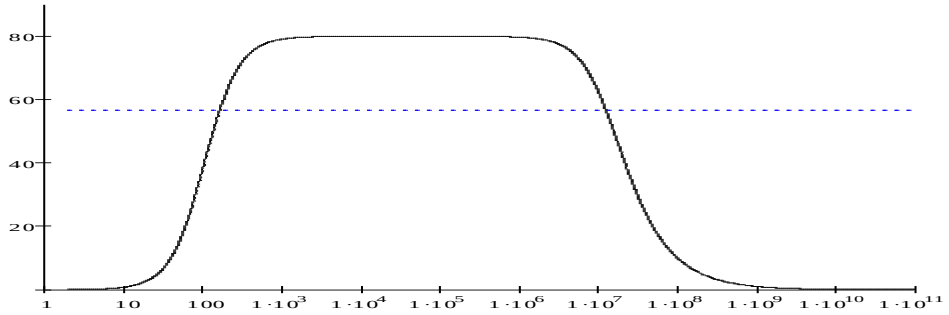


Рис. 11 АЧХ

ФЧХ:

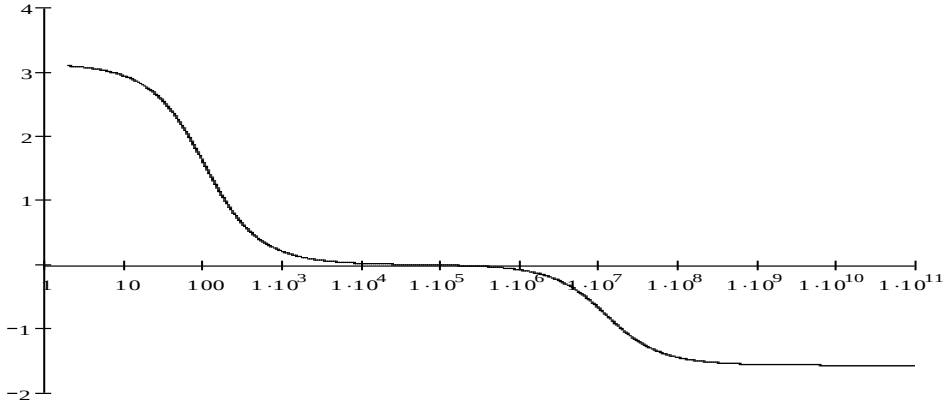


Рис. 12 ФЧХ

8. Карты режимов

В карте режимов необходимо привести информацию обо всех элементах рассчитанного устройства, сведенную в таблицы, следующего вида:

Резисторы:

Позиционное обозначение	R, Ом	U, В	I, А	P, Вт	Тип
R1*	22000	0,698	0,000032	0,000022	СП3-30-0,125

Конденсаторы:

Позиционное обозначение	C, мкФ	U, В	U_{MAX}, В	Тип
C1*	0,043	0,655	25	К10-17

Транзисторы:

Позиционное обозначение	Uбэ, В	Uкэ, В	$I_Б$, А	$I_К$, А	$I_Э$, А	$P_К$, Вт	Тип
VT1*	0,638	4,819	0,0000039	0,000029	0,000033	0,00014	1Т311Л

Стабилитроны:

Позиционное обозначение	$U_{СТ}$, В	I, мА	P, мВт	Тип
VD1*	12	22,549	0,2705	КС512А1

*-примеры

9. Спецификация элементов

В спецификации элементов необходимо привести информацию о количестве, наименовании, типе и позиционном обозначении (номере) всех элементах рассчитанного устройства, сведенную в таблицы, следующего вида:

Резисторы:

Позиционное обозначение	Наименование	Количество
R2, R4, R5, R6…*	МЛТ-0,125	35

Конденсаторы:

Позиционное обозначение	Наименование	Количество
C1, C2, C3, C4, C5…*	К10-17	19

Транзисторы:

Позиционное обозначение	Наименование	Количество
VT1, VT2, VT3…*	1Т311Л	8

Стабилитроны:

Позиционное обозначение	Наименование	Количество
VD1*	КС512А1	1

* - примеры

10. Список использованных источников.

1. Гусев, Владимир Георгиевич. Электроника и микропроцессорная техника [Текст] : учебник для студентов вузов / В. Г. Гусев, Ю. М. Гусев. - 5-е изд., стер. - М. : Высшая школа, 2008. - 799 с.

2. Лачин, Вячеслав Иванович. Электроника [Текст] : учебное пособие для студентов вузов, обучающихся по направлению подготовки В. И. Лачин, Н. С. Савелов. - 6-е изд., перераб. и доп. - Ростов н/Д : Феникс, 2007. - 703 с

3. Павлов, Владимир Николаевич. Схемотехника аналоговых электронных устройств [Текст] : учебник для студентов вузов/ В.Н. Павлов, В.Н. Ногин . - 3-е изд. - М. : Горячая линия - Телеком, 2005. - 320 с.

Приложение А

Содержание курсовой работы

Содержание

1. Техническое задание.
2. Возможная область применения автогенератора
3. Выбор блок-схемы.
4. Характеристики аналогичного устройства выпускаемого промышленностью
5. Расчет элементов оконечного каскада
6. Расчет повторителя на транзисторах VT7, VT8
7. Расчет аттенюатора
8. Расчет повторителя на транзисторах VT5, VT6
9. Расчет цепи Вина
10. Расчет отрицательной нелинейной обратной связи
11. Расчет предварительного усилителя на транзисторах VT3-VT4
12. Расчет повторителя на транзисторах VT1, VT2
13. Расчет разделительных емкостей
14. Расчет параметрического стабилизатора напряжения
15. Расчет радиаторов
16. Расчет АФХ и ФЧХ
17. Карты режимов
18. Спецификация элементов
19. Технология производства и изготовления печатных и монтажных плат
20. Список использованных источников.

Приложение Б

Пример титульного листа

МИНИСТЕРСТВО ОБРАЗОВАНИЯ И НАУКИ РОССИЙСКОЙ ФЕДЕРАЦИИ
Федеральное государственное бюджетное образовательное учреждение высшего образования
«ТЮМЕНСКИЙ ИНДУСТРИАЛЬНЫЙ УНИВЕРСИТЕТ»

Институт геологии и нефтегазодобычи
Кафедра «Кибернетических систем»

ПОЯСНИТЕЛЬНАЯ ЗАПИСКА
к курсовому проекту
по дисциплине
«Электроника и цифровая схемотехника»
или «Медицинская электроника и микропроцессорная техника»

на тему «Проектирование усилителя мощности»
или на тему «Проектирование автогенератора»

вариант □□□□

Выполнил:
студент группы □□□□
Иванов Н.А.
Проверил:
Ст. преп. каф. КС
Сидорова А. Э.

Дата защиты_____ Оценка_____

Тюмень 2019

Приложение В

Ряды номинальных базовых электронных элементов

Номинальные сопротивления резисторов, выпускаемых отечественной промышленностью в соответствии с рекомендациями МЭК, стандартизованы. Для постоянных резисторов установлено шесть рядов: Е6, Е12, Е24, Е48, Е96, Е192, а для переменных резисторов установлен ряд Е6. Кроме этого допускается использовать ряд Е3. Цифра после буквы Е указывает число номинальных значений в каждом десятичном интервале. Номиналы сопротивлений соответствуют числам в приведенных ниже таблицах или числам, полученным умножением или делением этих чисел на 10^n (n - целое положительное или отрицательное число).

Номинальные сопротивления по ряду Е3, Е6, Е12, Е24

E3	E6	E12	E24	E3	E6	E12	E24	E3	E6	E12	E24
1,0	1,0	1,0	1,0	2,2	2,2	2,2	2,2	4,7	4,7	4,7	4,7
			1,1				2,4				5,1
		1,2	1,2			2,7	2,7			5,6	5,6
			1,3				3,0				6,2
	1,5	1,5	1,5		3,3	3,3	3,3		6,8	6,8	6,8
			1,6				3,6				7,5
		1,8	1,8			3,9	3,9			8,2	8,2
			2,0				4,3				9,1

Учебное издание

ЭЛЕКТРОНИКА И ЦИФРОВАЯ СХЕМОТЕХНИКА МЕДИЦИНСКАЯ ЭЛЕКТРОНИКА И МИКРОПРОЦЕССОРНАЯ ТЕХНИКА

Методические указания к выполнению курсового проекта для студентов технических специальностей очной и заочной формы обучения
(вариант II)

Составитель
СИДОРОВА Анастасия Эдуардовна
В авторской редакции

Подписано в печать Формат 60х90 1/16. Усл. печ. л.3,0.
Тираж 35 экз. Заказ № .

Библиотечно-издательский комплекс
федерального государственного бюджетного образовательного
учреждения высшего профессионального образования
«Тюменский государственный нефтегазовый университет».
625000, Тюмень, ул. Володарского, 38.

Типография библиотечно-издательского комплекса.
625039, Тюмень, ул. Киевская, 52.