

Министерство образования Республики Беларусь
Учреждение образования
«Белорусский государственный университет
информатики и радиоэлектроники»

Н. И. Шатило, Г. Г. Машара

**ФУНКЦИОНАЛЬНЫЕ УСТРОЙСТВА И ЭЛЕКТРОПИТАНИЕ
СИСТЕМ ТЕЛЕКОММУНИКАЦИЙ.
ЛАБОРАТОРНЫЙ ПРАКТИКУМ**

*Рекомендовано УМО вузов Республики Беларусь по образованию
в области информатики и радиоэлектроники в качестве
учебно-методического пособия для студентов учреждений,
обеспечивающих получение высшего образования по специальностям
«Сети телекоммуникаций», «Системы распределения
мультимедийной информации»,
«Защита информации в телекоммуникациях»*

В 4-х частях

Часть 1

Минск БГУИР 2012

УДК 621.391:621.311(076.5)
ББК 32.811я73+32.88-4я73
Ш28

Р е ц е н з е н т ы:

кафедра телекоммуникационных систем учреждения образования
«Высший государственный колледж связи»
(протокол №4 от 9.12.2010 г.);

заведующий кафедрой «Информационные технологии в управлении»
Белорусского национального технического университета,
доктор технических наук, профессор В. Ф. Голиков

Шатило, Н. И.

Ш28 Функциональные устройства и электропитание систем телекоммуникаций. Лабораторный практикум : учеб.-метод. пособие. В 4 ч. Ч. 1 / Н. И. Шатило, Г. Г. Машара. – Минск : БГУИР, 2012. – 56 с. : ил.
ISBN 978-985-488-701-2 (ч.1).

Приводится описание семи лабораторных работ. Каждая работа содержит краткие теоретические сведения по изучаемому разделу дисциплины, принципиальную схему устройства, подлежащего исследованию, задания на проведение предварительных расчетов и выполнение моделирования, а также перечень контрольных вопросов.

УДК 621.391:621.311(076.5)
ББК 32.811я73+32.88-4я73

ISBN 978-985-488-701-2 (ч.1)
ISBN 978-985-488-700-5

© Шатило Н. И., Машара Г. Г. , 2012
© УО «Белорусский государственный университет информатики и радиоэлектроники», 2012

Лабораторная работа N1

МЕТОДИКА ИЗМЕРЕНИЯ ОСНОВНЫХ ПАРАМЕТРОВ И ХАРАКТЕРИСТИК УСТРОЙСТВ ТЕЛЕКОММУНИКАЦИЙ

Цель работы – изучить и освоить практически методы измерения основных показателей аналоговых устройств телекоммуникаций.

1.1 Теоретические сведения

1.1.1 Основные виды измерений в аналоговой технике

Базой для построения устройств телекоммуникаций различного назначения служат усилители сигналов на основе транзисторов, электронных ламп и других приборов.

При исследовании и настройке усилителей наиболее часто приходится измерять следующие параметры:

- постоянные напряжения и токи в схеме, характеризующие статический режим усилительных элементов;
- амплитудную характеристику и динамический диапазон усилителя;
- амплитудно-частотную характеристику;
- переходную характеристику;
- входное и выходное сопротивления усилителя;
- нелинейные искажения.

Постоянные напряжения в электронных схемах измеряют вольтметром постоянного тока либо при относительно невысоких требованиях к точности (погрешность порядка 5...10 %) осциллографом в режиме открытого входа.

В последнем случае напряжение в контролируемой точке определяют по вертикальному смещению луча развертки при калиброванной чувствительности осциллографа, выражаемой в вольтах на деление (В/дел). Для повышения точности чувствительность устанавливают такой, чтобы смещение было не менее 2...3 делений масштабной сетки на экране осциллографа.

Токи обычно определяют косвенным путем по падению напряжения на участке цепи с известным сопротивлением.

Измерение амплитуд гармонических и импульсных сигналов производят осциллографом, а среднеквадратичных значений – вольтметром переменного тока.

При проведении измерений необходимо учитывать погрешность, вносимую входным сопротивлением прибора (на низких частотах) и входной емкостью (на высоких частотах) при подключении к схеме.

1.1.2 Измерение амплитудной характеристики

Амплитудная характеристика (АХ) – это зависимость амплитуды (или среднеквадратического значения) первой гармоники выходного напряжения от амплитуды (или среднеквадратического значения) гармонического синусоидального сигнала на входе устройства. Общий вид характеристики показан на рисунке 1.1.

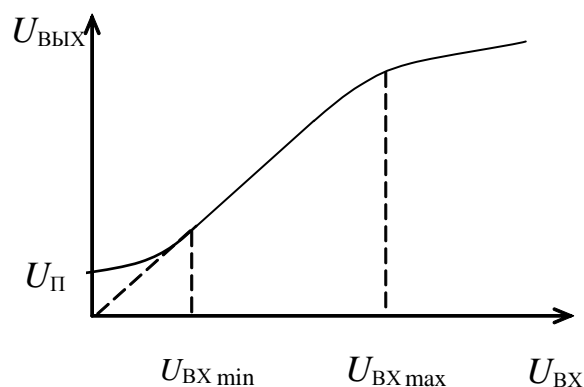


Рисунок 1.1 – Амплитудная характеристика усилителя

У идеального усилителя АХ линейна и проходит через начало координат (штриховая линия), а угол наклона характеристики к оси абсцисс определяется коэффициентом усиления:

$$U_{\text{ВЫХ}} = k \cdot U_{\text{ВХ}}. \quad (1.1)$$

Отклонение АХ реального усилителя (сплошная линия) от идеальной на начальном участке обусловлено влиянием помех (собственные шумы усилителя, наводки, фон и др.), приводящих к тому, что при $U_{\text{ВХ}} = 0$ на выходе усилителя присутствует некоторое напряжение помех $U_{\text{П}}$. Верхний изгиб АХ реального усилителя связан с нелинейностью вольт-амперных характеристик усилительных элементов, приводящей к появлению нелинейных искажений при больших уровнях входного сигнала.

Отношение максимального и минимального уровней входного сигнала, при котором обеспечивается усиление с заданными параметрами качества, называется **динамическим диапазоном** (D) усилителя. Минимальный уровень входного сигнала $U_{\text{ВХ min}}$ определяется допустимым соотношением сигнал/помеха на выходе усилителя, а максимальный $U_{\text{ВХ max}}$ – допустимыми нелинейными искажениями сигнала.

Обычно динамический диапазон выражается в децибелах:

$$D = 20 \cdot \lg(U_{\text{ВХ max}} / U_{\text{ВХ min}}). \quad (1.2)$$

Структурная схема измерения АХ приведена на рисунке 1.2.

Измерения проводят на фиксированной частоте в средней части частотного диапазона усилителя.

1.1.3 Измерение амплитудно-частотной характеристики

Коэффициент усиления в общем случае является комплексной величиной, что обусловлено влиянием реактивных параметров элементов схемы.

Амплитудно-частотная характеристика (АЧХ) устанавливает зависимость модуля коэффициента усиления от частоты гармонического сигнала на входе усилителя.

Типовая АЧХ аperiodического (нерезонансного) усилителя имеет вид, показанный на рисунке 1.3. Спад усиления в области нижних частот (НЧ) в ос-

новном определяется наличием разделительных и блокировочных конденсаторов в цепях усилителя, а в области верхних частотах (ВЧ) – инерционными свойствами усилительных элементов, паразитными емкостями монтажа и комплексным характером сопротивления реальной нагрузки.

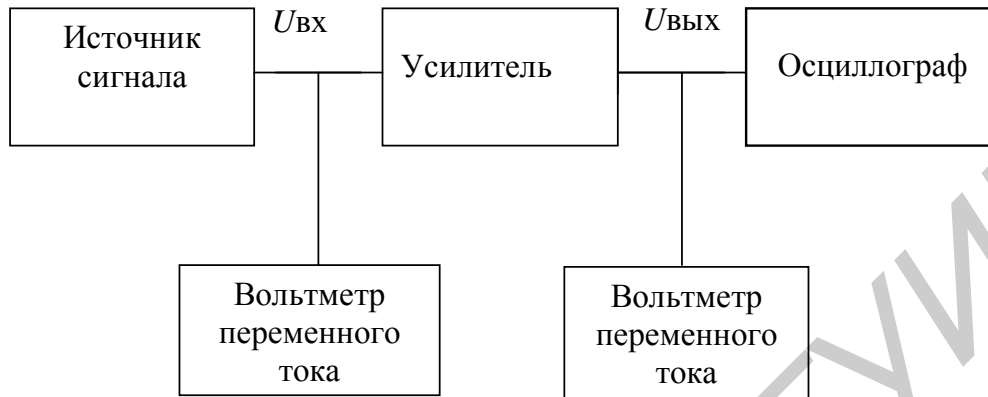
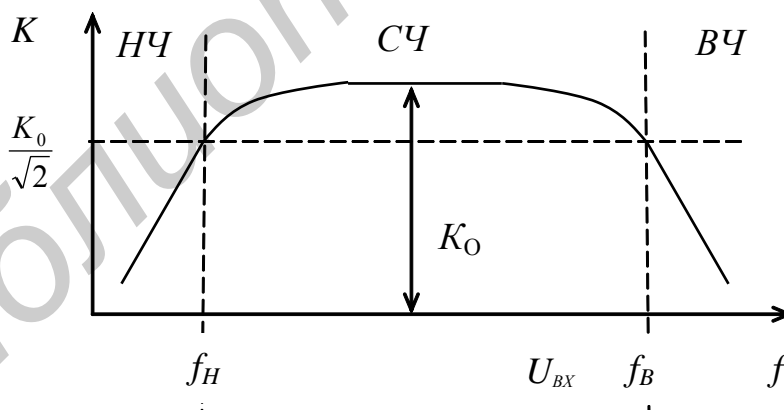


Рисунок 1.2 – Структурная схема измерения амплитудной характеристики

Нижняя и верхняя границы частотного диапазона определяются предельными частотами f_H и f_B , на которых усиление снижается до установленного допуском уровня. Наиболее часто используется допуск по уровню -3дБ , соответствующий снижению усиления в $\sqrt{2}$ раз.



НЧ – область нижних частот; СЧ – область средних частот;
ВЧ – область верхних частот

Рисунок 1.3 – Амплитудно-частотная характеристика

Структурная схема измерения АЧХ та же, что и при измерении АХ. Измерения проводят при фиксированном уровне входного сигнала, соответствующем линейному участку АХ ($U_{BX} = (0,1 \dots 0,3) \cdot U_{BX \max}$).

Для компактного изображения графика АЧХ используют логарифмический масштаб оси частот, при котором десятикратному изменению частоты (декаде) соответствуют равные геометрические отрезки. График строится, начиная с некоторой начальной частоты $f_{нач} < f_H$, а координаты текущей частоты f на оси частот определяются по формуле

$$X_f = b \cdot Lg(f/f_{нач}), \quad (1.3)$$

где b – геометрическая длина декады.

1.1.4 Измерение переходной характеристики

Переходная характеристика (ПХ) показывает зависимость от времени мгновенного значения напряжения на выходе усилителя при бесконечно быстром скачкообразном изменении напряжения на его входе.

ПХ используется для оценки искажений при усилении импульсных сигналов. Переходные искажения, как и частотные, при усилении гармонических сигналов обусловлены влиянием реактивных элементов в схеме усилителя. Практически параметры ПХ измеряют, подавая на вход усилителя последовательность прямоугольных импульсов и контролируя осциллографом форму сигнала на выходе (рисунок 1.4).

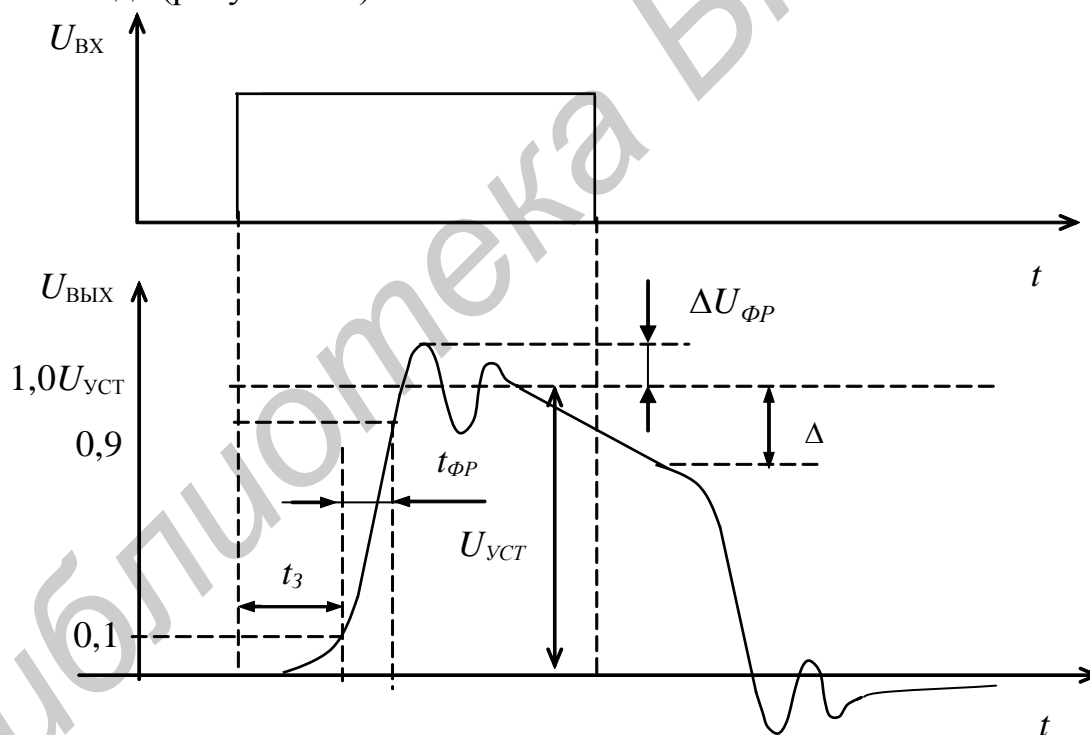


Рисунок 1.4 – Переходная характеристика усилителя

Параметры ПХ в области малых времен характеризуют искажения фронта импульсного сигнала. При подаче прямоугольного импульса на вход усилителя передний фронт импульса выходного напряжения оказывается задержанным и растянутым во времени. Подобные искажения фронта импульса определяются **временем задержки** $t_з$, равным временному интервалу между временем подачи входного импульса и временем достижения выходным сигналом уровня

0,1 от установившегося значения $U_{уст}$, и **длительностью фронта** $t_{фр}$, определяемому как интервал времени, в течение которого выходной сигнал изменяется от 0,1 до 0,9 от установившегося значения $U_{уст}$.

У апериодического усилителя длительность фронта связана с верхней предельной частотой f_B по уровню -3дБ соотношением

$$t_{фр} = 0,35/f_B . \quad (1.4)$$

Выброс фронта, возникающий при колебательном характере установления выходного напряжения, характеризуется отношением напряжения выброса $\Delta U_{фр} = (U_{\max} - U_{уст})$ к установившемуся значению выходного напряжения:

$$\delta = \frac{\Delta U_{фр}}{U_{уст}} 100 \% . \quad (1.5)$$

Искажение вершины импульса (область больших времен) оценивают относительной величиной Δ – **спадом выходного напряжения** (в процентах) за время длительности импульса $t_{И}$. Величина Δ связана с нижней предельной частотой по уровню -3дБ f_H соотношением

$$\Delta_{\%} = 2\pi \cdot f_H \cdot t_{И} \cdot 100 \% . \quad (1.6)$$

1.1.5 Измерение входного и выходного сопротивлений усилителя

Структурная схема измерения приведена на рисунке 1.5. Уровень сигнала при измерении должен соответствовать линейному участку АХ усилителя.

Измерения проводят на фиксированной частоте в области средних частот. Обычно принимают $f_{ИЗМ} = \sqrt{f_H \cdot f_B}$.

Для измерения входного сопротивления сигнал на вход усилителя подают через измерительный резистор известного номинала R . Величину R_{BX} определяют косвенным путем, измеряя вольтметром (или осциллографом) напряжение E до резистора и напряжение U_{BX} непосредственно на входе усилителя:

$$R_{BX} = \frac{U_{BX} \cdot R}{E - U_{BX}} . \quad (1.7)$$

При большом R_{BX} , соизмеримым с входным сопротивлением используемого вольтметра, данная методика может давать значительную погрешность. В этом случае R_{BX} можно определить, измеряя напряжение на выходе усилителя при двух различных сопротивлениях измерительного резистора R и при этом

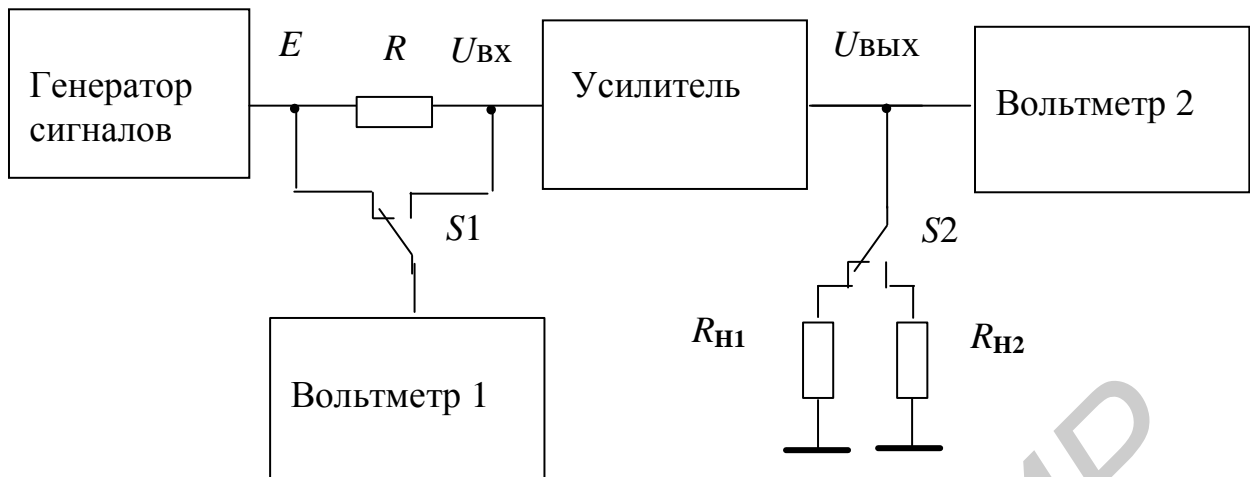


Рисунок 1.5 – Структурная схема измерения входного и выходного сопротивлений усилителя

поддерживая неизменным напряжение E . На практике одно из значений R берется равным нулю (резистор закорачивается). Тогда

$$R_{BX} = \frac{R \cdot U_{ВЫXR}}{U_{ВЫX0} - U_{ВЫXR}}, \quad (1.8)$$

где $U_{ВЫXR}$ – выходное напряжение при подаче сигнала через резистор;

$U_{ВЫX0}$ – выходное напряжение при закороченном резисторе.

Выходное сопротивление усилителя также определяют косвенным путем, последовательно измеряя напряжение на выходе усилителя при двух различных сопротивлениях нагрузочных резисторов R_{H1} и R_{H2} :

$$R_{ВЫX} = \frac{\Delta U_{ВЫX}}{\Delta I_{ВЫX}}, \quad (1.9)$$

где $\Delta U_{ВЫX} = U_{ВЫX1} - U_{ВЫX2}$, $\Delta I_{ВЫX} = I_{ВЫX2} - I_{ВЫX1}$.

Здесь $I_{ВЫX1} = \frac{U_{ВЫX1}}{R_{H1}}$ и $I_{ВЫX2} = \frac{U_{ВЫX2}}{R_{H2}}$.

Для измерения $R_{ВЫX}$ можно также использовать методику измерения R_{BX} по первому способу, т. е. подавая сигнал от генератора на выход усилителя через резистор известного номинала, определять сопротивление со стороны выхода схемы по падению напряжения на измерительном резисторе.

1.2 Подготовка к работе

1.2.1 Изучить приемы работы с программой Electronic Workbench [1].

1.2.2 Изучить методы измерения параметров усилителей (подраздел 1.1).

1.2.3 Провести анализ схемы исследуемого усилителя (рисунок 1.6) по постоянному току при напряжении питания $E_{П}=12$ В. Расчётным путём определить коллекторные токи транзисторов и напряжения в узлах схемы 1...6. При

расчётах принять напряжение база – эмиттер транзисторов $U_{БЭ}=0,6$ В, а базовыми токами пренебречь, т. е. считать ток коллектора I_K равным току эмиттера $I_Э$. Учесть, что в дифференциальном каскаде токи транзисторов $V1$ и $V2$ в исходном состоянии практически равны.

1.2.4 Рассчитать ориентировочную нижнюю граничную частоту по уровню -3 дБ f_H для выходной цепи усилителя при сопротивлении внешней нагрузки $R_{Н1}=R9$ и $R_{Н2}=R10$, полагая выходное сопротивление усилителя $R_{ВЫХ}$ пренебрежимо малым.

1.2.5 Рассчитать относительный спад вершины прямоугольного импульса $\Delta\%$ при длительности $t_H=1$ мс.

1.2.6 Подготовить таблицу для измерения АЧХ усилителя в диапазоне частот 10 Гц...1 МГц. Сетку частот составить, придерживаясь принципа удвоения частоты: 10, 20, 50, 100, 200 Гц и т. д.

1.3 Выполнение работы

1.3.1 Включить компьютер и запустить программу Electronic Workbench.

1.3.2 Изобразить на экране принципиальную схему усилителя, представленную на рисунке 1.6.

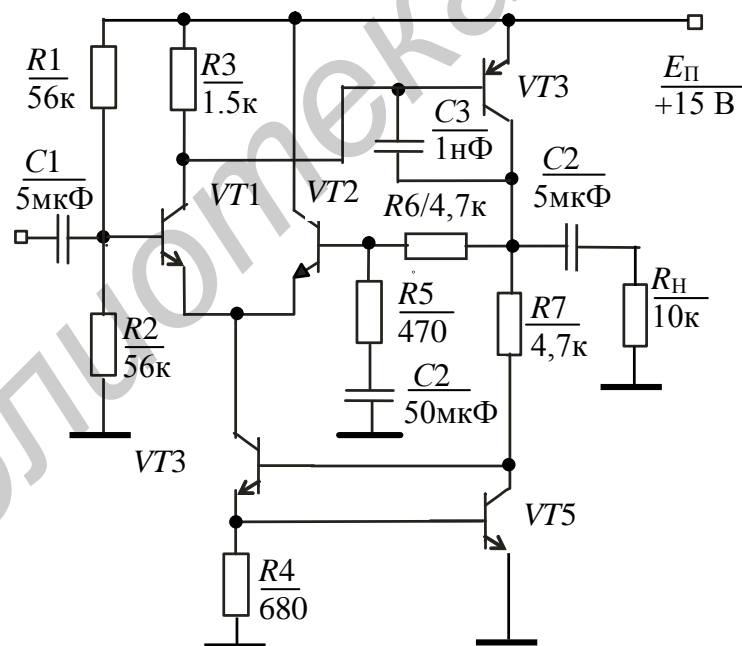


Рисунок 1.6 – Принципиальная схема усилителя

1.3.3 Используя мультиметр (Multimeter) из панели инструментов, определить постоянные напряжения в узлах принципиальной схемы (статический режим).

1.3.4 Подключить мультиметр к выходу усилителя и измерить его амплитудную характеристику в соответствии с методикой пункта 1.1.2. Рекомендуемые уровни входного сигнала: 1 мВ, 2 мВ, 5 мВ, 10 мВ, 20 мВ, 50 мВ, 100 мВ, 200 мВ, 500 мВ.

1.3.5 Измерить амплитудно-частотную характеристику усилителя по методике пункта 1.1.3. Определить амплитудно-частотную характеристику с помощью характериографа (Bode Plotter) из панели инструментов (входы IN характериографа подключить к входу усилителя, а входы OUT – к нагрузке). Сравнить полученные результаты.

1.3.6 Измерить входное и выходное сопротивление усилителя по методике пункта 1.1.5. Значение эталонного сопротивления на входе и значение сопротивлений нагрузки выбрать самостоятельно и обосновать этот выбор.

1.3.7 Подключить к входу усилителя импульсный источник сигнала с параметрами: амплитуда импульса 1 мВ , длительность фронтов 10 нс , длительность импульса 1 мс, период повторения 2 мс. Выход усилителя соединить с осциллографом (Oscilloscope) из панели инструментов (использовать вход А осциллографа). Измерить параметры переходной характеристики усилителя в соответствии с пунктом 1.1.4.

1.4 Контрольные вопросы

1 Покажите пути протекания постоянных токов в схеме усилителя, объясните методику ориентировочного расчета и измерения режимов по постоянному току.

2 Дайте определение и поясните методику измерения амплитудной характеристики.

3 Дайте определение и поясните методику измерения амплитудно-частотной характеристики.

4 Укажите параметры переходной характеристики в области малых времен и их связь с параметрами АЧХ.

5 Укажите параметры переходной характеристики в области больших времен и их связь с параметрами АЧХ.

6 Поясните методику измерения входного и выходного сопротивления усилителя.

Лабораторная работа N2

ИССЛЕДОВАНИЕ РЕЗИСТОРНОГО КАСКАДА ПРЕДВАРИТЕЛЬНОГО УСИЛЕНИЯ НА БИПОЛЯРНОМ ТРАНЗИСТОРЕ

Цель работы – исследовать влияние различных схемных элементов на параметры резисторного каскада предварительного усиления. Закрепить навыки экспериментального исследования усилительных каскадов.

2.1 Краткие теоретические сведения

Принципиальная схема резисторного каскада предварительного усиления с включением транзистора с общим эмиттером (ОЭ) приведена на рисунке 2.1.

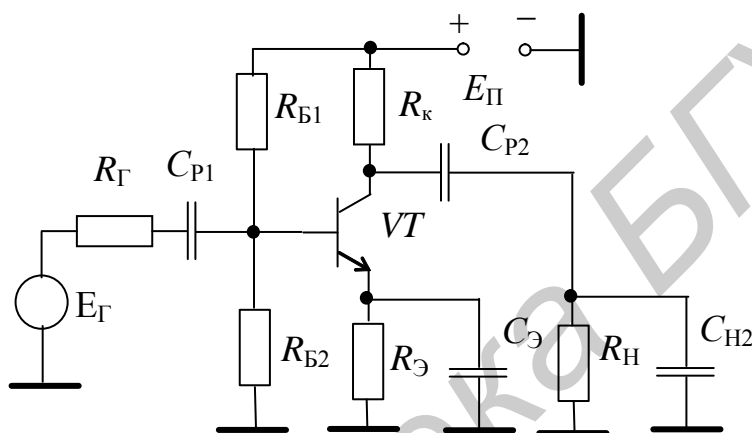


Рисунок 2.1 – Типовая схема резисторного каскада

Эквивалентная схема этого каскада по переменному току в области средних частот имеет вид, представленный на рисунке 2.2.

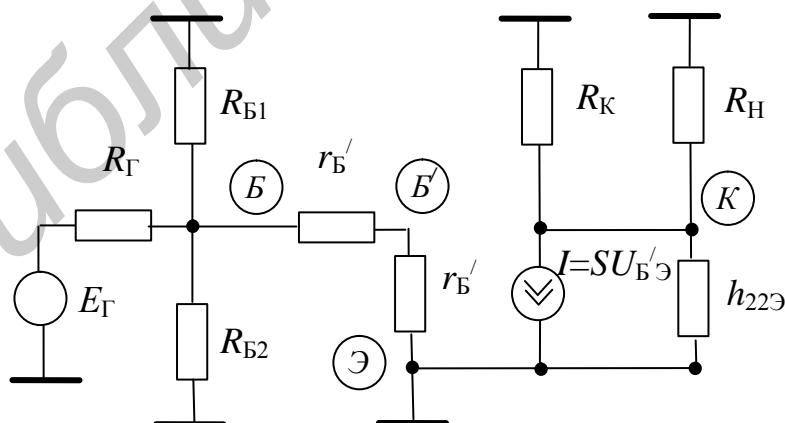


Рисунок 2.2 – Эквивалентная схема резисторного каскада по переменному току в области средних частот

Коэффициент передачи по напряжению каскада равен

$$K_U = \frac{U_{ВЫХ}}{U_{ВХ}} = \frac{I_K \cdot R_{H \text{ ЭКВ}}}{I_B \cdot h_{11Э}} = \frac{h_{21Э}}{h_{11Э}} \cdot R_{H \text{ ЭКВ}} = \frac{h_{21Э}}{r_{Б'} + r_{Б'/Э}} \cdot R_{H \text{ ЭКВ}}, \quad (2.1)$$

где $h_{21Э} = I_K / I_B$ – коэффициент передачи по току транзистора в схеме с ОЭ;

$h_{11Э}$ – входное дифференциальное сопротивление транзистора в схеме с ОЭ;

$r_{Б'}$ – объемное сопротивление базы;

$r_{Б'/Э}$ – дифференциальное сопротивление перехода внутренняя база – эмиттер;

$R_{H \text{ ЭКВ}} = R_{ВЫХ} \cdot R_H / (R_{ВЫХ} + R_H)$ – эквивалентное сопротивление нагрузки.

Дифференциальное сопротивление $r_{Б'/Э}$ определяется по формуле

$$r_{Б'/Э} = r_{Э} \cdot (h_{21Э} + 1) = \frac{\varphi_T}{I_{0К}} (h_{21Э} + 1), \quad (2.2)$$

где $r_{Э} = \varphi_T / I_{0К}$ – дифференциальное сопротивление эмиттера;

$\varphi_T \approx 0,026$ мВ – температурный потенциал;

$I_{0К}$ – постоянный ток коллектора в рабочей точке.

Входное $R_{ВХ}$ и выходное $R_{ВЫХ}$ сопротивления каскада равны

$$R_{ВХ} = \frac{1}{\frac{1}{R_{Б1}} + \frac{1}{R_{Б2}} + \frac{1}{h_{11Э}}}, \quad R_{ВЫХ} = \frac{1}{\frac{1}{R_R} + h_{22Э}}, \quad (2.3)$$

где $h_{22Э}$ – дифференциальная проводимость коллектор – эмиттер транзистора.

Эта проводимость зависит от постоянного тока коллектора:

$$h_{22Э} = \frac{I_{0К}}{U_A}, \quad (2.4)$$

где U_A – напряжение Эрли, равное 100...200 В у транзисторов типа *n-p-n* и 70...150 В у транзисторов типа *p-p-n*.

Нижняя граничная частота каскада определяется по формуле

$$f_H = \frac{1}{2\pi\tau_H}, \quad (2.5)$$

где τ_H – эквивалентная постоянная времени каскада в области нижних частот.

Постоянную времени τ_H можно определить из выражения

$$\tau_H \approx \frac{1}{\sqrt{(1/\tau_{H1})^2 + (1/\tau_{H2})^2 + (1/\tau_{H3})^2}}, \quad (2.6)$$

где τ_{H1} , τ_{H2} , τ_{H3} – постоянные времени цепей, подключенных к базе, эмиттеру и коллектору транзистора соответственно.

Эти постоянные времени определяются по формулам

$$\tau_{H1} = C_{P1}(R_{\Gamma} + R_{BX}), \quad (2.7)$$

$$\tau_{H2} = \left(r_{\text{Э}} + \frac{r_{\delta}}{1 + h_{21\text{Э}}} \right) \cdot C_{\text{Э}}, \quad (2.8)$$

$$\tau_{H3} = C_{P2}(R_{\text{Н}} + R_{\text{ВЫХ}}), \quad (2.9)$$

где C_{P1} и C_{P2} – разделительные конденсаторы на входе и выходе каскада;

R_{Γ} – внутреннее сопротивление источника сигнала;

$C_{\text{Э}}$ – блокировочное сопротивление в цепи эмиттера.

Объемное сопротивление области базы $r_{B'}$ можно определить из постоянной коллектора (постоянной обратной связи) τ_K транзистора, приводимой в справочниках:

$$r_{B'} = \frac{\tau_K}{C_K}, \quad (2.10)$$

где C_K – емкость коллектора транзистора при измерении τ_K .

Верхняя граничная частота каскада определяется по формуле

$$f_B = \frac{1}{2\pi\tau_B}, \quad (2.11)$$

где τ_B – эквивалентная постоянная времени каскада в области верхних частот.

Постоянную времени τ_B можно определить из выражения

$$\tau_B = \sqrt{\tau_{B1}^2 + \tau_{B2}^2}, \quad (2.12)$$

где τ_{B1} и τ_{B2} – постоянные времени входной и выходной цепей соответственно.

Эти постоянные времени определяются по формулам

$$\tau_{B1} = C_0 \frac{R_{\Gamma} \cdot R_{BX}}{R_{\Gamma} + R_{BX}}, \quad (2.13)$$

$$\tau_{B2} = C_{\text{Н}} \frac{R_{\text{Н}} \cdot R_{\text{ВЫХ}}}{R_{\text{Н}} + R_{\text{ВЫХ}}}, \quad (2.14)$$

где C_0 – эквивалентная входная емкость каскада;

$C_{\text{Н}}$ – емкость нагрузки.

Эквивалентная входная емкость каскада включает емкость перехода база-эмиттер $C_{B'\text{Э}}$ и пересчитанную на вход емкость перехода база – коллектор C_K :

$$C_0 = C_{B'\text{Э}} + C_K (1 + K_U), \quad (2.15)$$

где K_U – коэффициент передачи каскада по напряжению,

$C_K = C_{K0} / (1 + |U_{БК}| / \varphi_K)^n$ – емкость коллектора транзистора в рабочей точке.

Емкость перехода база – эмиттер $C_{B'\text{Э}}$ рассчитывается по формуле

$$C_{B'Э} = \frac{1}{2\pi \cdot f_{h_{21Э}} \cdot h_{11Э}}, \quad (2.16)$$

где $f_{h_{21Э}}$ – предельная частота усиления транзистора по току в схеме с общим эмиттером.

Эта частота определяется по единичной частоте усиления f_T , приводимой в справочных характеристиках транзистора:

$$f_{h_{21Э}} = \frac{f_T}{|h_{21Э}|}. \quad (2.17)$$

Иногда в справочниках приводится не значение граничной частоты f_T , а модуль коэффициента передачи по току $|h_{21Э}|$ на частоте измерения $f_{ИЗМ}$. Эти параметры связаны соотношением

$$f_T = |h_{21Э}| \cdot f_{ИЗМ}. \quad (2.18)$$

2.2 Подготовка к работе

2.2.1 Изучить по рекомендованной литературе принцип работы, основные параметры и характеристики резисторного каскада на биполярном транзисторе.

2.2.2 Изучить схему исследуемого усилителя, представленную на рисунке 2.3, определить назначение элементов.

2.2.3 Провести анализ схемы исследуемого усилителя по постоянному току при напряжении питания $E_{П} = +15$ В. Вычислить напряжения в узлах схемы, определить величины $I_{0К}$, $U_{0КЭ}$, P_K . При расчётах принять $U_{БЭ} = 0,6$ В, а постоянным током базы пренебречь.

2.2.4. Используя справочные данные транзистора BC107BP ($h_{21Э} = 400$; $|h_{21Э}| = 2,5$ на частоте $f_{ИЗМ} = 100$ МГц; $C_{K0} = 4$ пФ; $\tau_K = 2$ пс; $m = 1,6$; $n = 0,33$), определить следующие параметры его модели:

а) емкость коллектора при измерении $|h_{21Э}|$ $C_{Kh} = C_{K0} / (1 + |U_{БК}| / \varphi_K)^n$.
Принять $U_{БК} = 5$ В, $\varphi_K = 1$ В;

б) входное сопротивление транзистора в заданном режиме $h_{11Э} = r_B + r_{B'Э}$,
где $r_{B'} = \tau_K / C_{Kh}$; $r_{B'Э} = r_Э(1 + h_{21Э})$; $r_Э = m \cdot \varphi_T / I_{0К}$; $\varphi_T = 26$ мВ;

в) крутизну транзистора $Y_{21Э} = h_{21Э} / h_{11Э}$;

г) емкость коллектора в рабочей точке $C_K = C_{K0} / (1 + |U_{БК}| / \varphi_K)^n$.

Здесь $U_{БК}$ – напряжение база – коллектор в рабочей точке;

д) предельную частоту усиления по току $f_{h_{21Э}} = |h_{21Э}| \cdot f_{ИЗМ} / h_{21Э}$;

е) емкость перехода база – эмиттер $C_{B'Э}$ по формуле (2.16).

2.2.5. Вычислить сигнальные параметры каскада :

- а) коэффициент усиления по напряжению K_U по формуле (2.1);
- б) входное сопротивление R_{BX} по формуле (2.3);
- в) сквозной коэффициент передачи $K_E = K_U \cdot R_{BX} / (R_{BX} + R1)$;
- г) эквивалентную входную ёмкость по формуле (2.15) ;
- д) верхнюю граничную частоту по формулам (2.11)... (2.14);
- е) нижнюю граничную частоту по формулам (2.5)... (2.9) .

2.3 Выполнение работы

2.3.1 Включить компьютер и запустить программу Electronic Workbench.

2.3.2 Изобразить на экране принципиальную схему усилителя, представленную на рисунке 2.3.

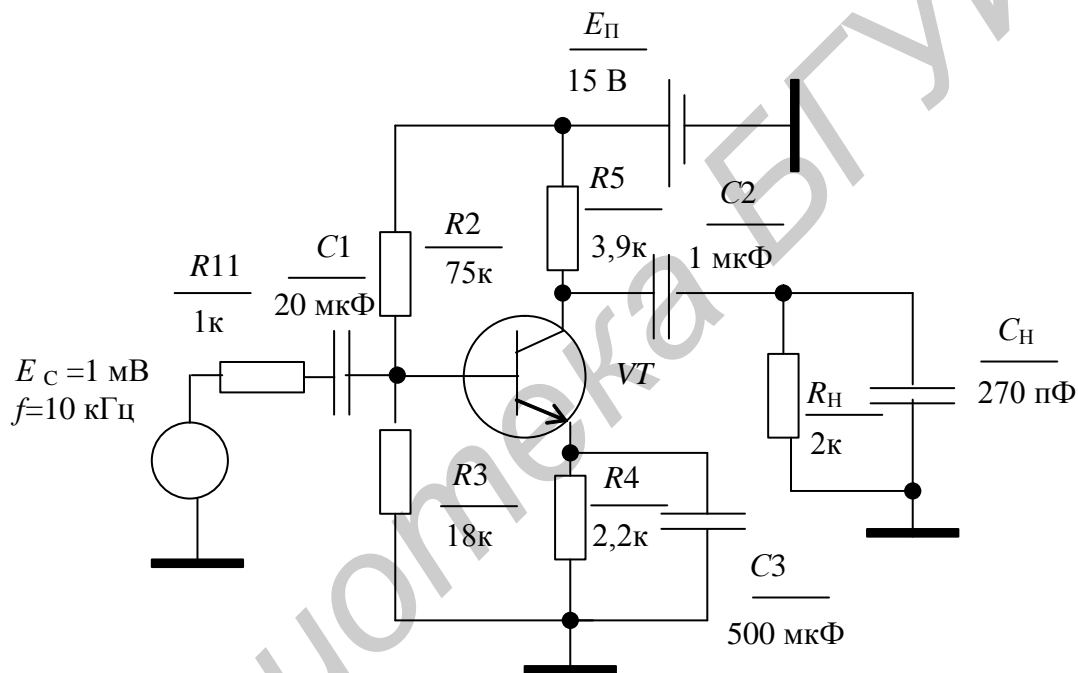


Рисунок 2.3 – Принципиальная схема исследуемого усилителя

2.3.3 Используя мультиметр из панели инструментов, определить постоянные напряжения в узлах принципиальной схемы (статический режим).

2.3.4 Определить влияние сопротивления нагрузки на амплитудную характеристику усилителя.

Подключить мультиметр к выходу усилителя и измерить амплитудную характеристику усилителя в соответствии с методикой пункта 1.1.2 при сопротивлениях нагрузки $R_{H1} = 2$ кОм и $R_{H2} = 100$ кОм. Рекомендуемые уровни входного сигнала: 1, 2, 5, 10, 20, 50, 100, 200 мВ.

2.3.5 Определить влияние сопротивления нагрузки на амплитудно-частотную характеристику усилителя.

Определить параметры амплитудно-частотных характеристик (K_0, f_H, f_B) с помощью характериографа из панели инструментов при сопротивлениях нагрузки $R_{H1} = 2$ кОм и $R_{H2} = 100$ кОм.

2.3.6 Определить влияние емкости нагрузки на амплитудно-частотную характеристику усилителя.

Определить параметры амплитудно-частотных характеристик (K_0, f_H, f_B) при сопротивлении нагрузки $R_{H1} = 2$ кОм и значениях емкости $C_{H1} = 270$ пФ и $C_{H2} = 27$ пФ.

2.3.7 Определить влияние емкости блокировочного конденсатора $C3$ на амплитудно-частотную характеристику усилителя.

Определить параметры амплитудно-частотных характеристик (K_0, f_H, f_B) при сопротивлении нагрузки $R_{H1} = 2$ кОм и значениях емкости конденсатора $C3 = 500$ мкФ и $C3 = 1$ пФ.

2.3.8 Определить влияние блокировочной емкости $C3$ на входное и выходное сопротивления усилителя.

Измерить входное и выходное сопротивления усилителя по методике пункта 1.1.5 при значениях емкости конденсатора $C3 = 500$ мкФ и $C3 = 1$ пФ.

2.3.9 Определить влияние емкости разделительного конденсатора $C2$ на амплитудно-частотную характеристику усилителя.

Определить параметры амплитудно-частотных характеристик (K_0, f_H, f_B) при нагрузке $R_{H1} = 2$ кОм, $C_H = 270$ пФ и значениях емкости конденсатора $C2 = 5$ мкФ и $C2 = 1$ мкФ.

2.3.10 Определить влияние значения сопротивления в цепи коллектора $R5$ на выходное сопротивление усилителя.

Измерить выходное сопротивление усилителя по методике пункта 1.1.5 при значениях сопротивления $R5 = 1$ кОм и $R5 = 3,9$ кОм.

2.3.11 Определить влияние емкости разделительного конденсатора $C2$ на переходную характеристику усилителя.

Подключить к входу усилителя импульсный источник сигнала с параметрами: амплитуда импульса 1 мВ, длительность фронтов 10 нс, длительность импульса 1 мс, период повторения 2 мс. Выход усилителя соединить с осциллографом из панели инструментов (использовать вход А осциллографа). Измерить параметры переходной характеристики усилителя в соответствии с пунктом 1.1.4 при сопротивлении нагрузки $R_{H1} = 2$ кОм, $C_H = 270$ пФ и значениях емкости $C2 = 5$ мкФ и $C2 = 1$ мкФ.

2.4 Контрольные вопросы

1 Укажите причины нестабильности режима биполярных транзисторов в усилительных каскадах.

2 Объясните принцип эмиттерной стабилизации режима транзистора в каскаде.

3 Как усилительные свойства каскада зависят от режима транзистора по постоянному току и от значения нагрузки по переменному току?

4 Как зависят входное и выходное сопротивления каскада от параметров транзистора и его режима по постоянному току?

5 Объясните, чем определяются свойства каскада в области верхних частот.

6 Объясните, как формируется амплитудно-частотная характеристика каскада в области нижних частот.

Библиотека БГУИР

Лабораторная работа №3 ИССЛЕДОВАНИЕ РЕЗИСТОРНОГО КАСКАДА ПРЕДВАРИТЕЛЬНОГО УСИЛЕНИЯ НА ПОЛЕВОМ ТРАНЗИСТОРЕ

Цель работы – исследовать влияние различных схемных элементов на параметры резисторного каскада предварительного усиления. Закрепить навыки экспериментального исследования усилительных каскадов.

3.1 Краткие теоретические сведения

Принципиальная схема резисторного каскада предварительного усиления с включением транзистора с общим истоком (ОИ) приведена на рисунке 3.1.

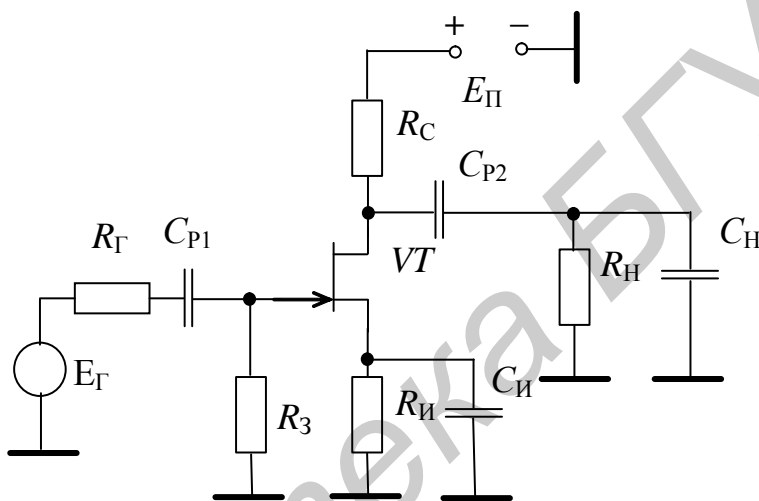


Рисунок 3.1 – Типовая схема усилителя на полевом транзисторе

Эквивалентная схема этого каскада по переменному току в области средних частот имеет вид, представленный на рисунке 3.2.

Коэффициент передачи по напряжению каскада равен

$$K_U = \frac{U_{ВЫХ}}{U_{ВХ}} = \frac{S \cdot U_{ЗИ} \cdot R_{Н \text{ ЭКВ}}}{U_{ЗИ}} = S \cdot R_{Н \text{ ЭКВ}}, \quad (3.1)$$

где S – крутизна транзистора,

$R_{Н \text{ ЭКВ}} = R_{ВЫХ} \cdot R_{Н} / (R_{ВЫХ} + R_{Н})$ – эквивалентное сопротивление нагрузки.

Входное $R_{ВХ}$ и выходное $R_{ВЫХ}$ сопротивления каскада равны

$$R_{ВХ} \approx R_3, \quad R_{ВЫХ} = \frac{1}{\frac{1}{R_C} + h_{22И}}, \quad (3.2)$$

где $h_{22И}$ – дифференциальная проводимость сток – исток транзистора.

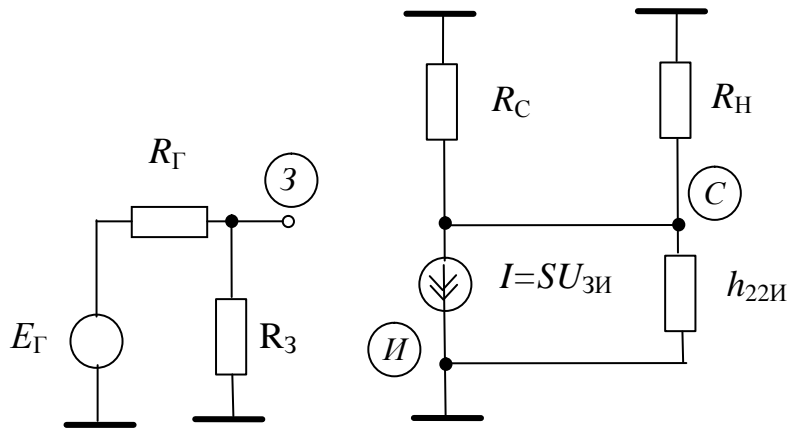


Рисунок 3.2 – Эквивалентная схема резисторного каскада по переменному току в области средних частот

Эта проводимость зависит от постоянного тока стока I_{0C} :

$$h_{22И} = \frac{I_{0C}}{U_A}, \quad (3.3)$$

где U_A – эквивалент напряжения Эрли, равный 20...50 В у маломощных полевых транзисторов.

Нижняя граничная частота каскада определяется по формуле

$$f_H = \frac{1}{2\pi\tau_H}, \quad (3.4)$$

где τ_H – эквивалентная постоянная времени каскада в области нижних частот.

Постоянную времени τ_H можно определить из выражения

$$\tau_H \approx \frac{1}{\sqrt{(1/\tau_{H1})^2 + (1/\tau_{H2})^2 + (1/\tau_{H3})^2}}, \quad (3.5)$$

где τ_{H1} , τ_{H2} , τ_{H3} – постоянные времени цепей, подключенных к затвору, истоку и стоку транзистора соответственно.

Эти постоянные времени определяются по формулам

$$\tau_{H1} = C_{P1}(R_G + R_{BX}), \quad (3.6)$$

$$\tau_{H2} = \frac{1}{S} \cdot C_{И}, \quad (3.7)$$

$$\tau_{H3} = C_{P2}(R_H + R_{ВЫХ}), \quad (3.8)$$

где C_{P1} и C_{P2} – разделительные конденсаторы на входе и выходе каскада;

R_G – внутреннее сопротивление источника сигнала;

$C_{И}$ – блокировочное сопротивление в цепи истока.

Верхняя граничная частота каскада определяется по формуле

$$f_B = \frac{1}{2\pi\tau_B}, \quad (3.9)$$

где τ_B – эквивалентная постоянная времени каскада в области верхних частот.

Постоянную времени τ_B можно определить из выражения

$$\tau_B = \sqrt{\tau_{B1}^2 + \tau_{B2}^2}, \quad (3.10)$$

где τ_{B1} и τ_{B2} – постоянные времени входной и выходной цепей соответственно.

Эти постоянные времени определяются по формулам

$$\tau_{B1} = C_0 \frac{R_{\Gamma} \cdot R_{BX}}{R_{\Gamma} + R_{BX}}, \quad (3.11)$$

$$\tau_{B2} = C_H \frac{R_H \cdot R_{ВЫХ}}{R_H + R_{ВЫХ}}, \quad (3.12)$$

где C_0 – эквивалентная входная емкость каскада,

C_H – емкость нагрузки.

Эквивалентная входная емкость каскада включает емкость затвор – исток $C_{ЗИ}$ и пересчитанную на вход емкость затвор – сток $C_{ЗС}$:

$$C_0 = C_{ЗИ} + C_{ЗС} (1 + K_U), \quad (3.13)$$

где K_U – коэффициент передачи каскада по напряжению.

Емкости затвор – исток $C_{ЗИ}$ и затвор – сток $C_{ЗС}$ определяются по формулам

$$C_{ЗИ} = C_{ЗИ0} / (1 + |U_{ЗИ}| / \varphi_K)^m, \quad C_{ЗС} = C_{ЗС0} / (1 + |U_{ЗС}| / \varphi_K)^m, \quad (3.14)$$

где $C_{ЗИ0}$ и $C_{ЗС0}$ емкости затвор-исток и затвор-сток при нулевых смещениях,

$U_{ЗИ}$ и $U_{ЗС}$ – напряжения затвор-исток и затвор-сток в рабочей точке,

$\varphi_K \approx 1$ В – контактная разность потенциалов p - n -перехода,

$m = 0,33$ – коэффициент вольт-фарадной характеристики p - n -перехода.

3.2. Подготовка к работе

3.2.1 Изучить по рекомендованной литературе принцип работы, основные параметры и характеристики резисторного каскада на полевом транзисторе.

3.2.2 Изучить схему исследуемого усилителя, представленную на рисунке 3.3, определить назначение элементов.

3.2.3 Провести анализ схемы исследуемого усилителя по постоянному току при напряжении питания $E_0 = +15$ В.

В каскаде используется полевой транзистор J309, имеющий следующие параметры: напряжение отсечки $U_{ОТС} = -2,4$ В, ток стока при нулевом смещении затвор-исток $I_{C0} = 22$ мА, емкости затвор-исток и затвор-сток при нулевых смещениях $C_{ЗИ0} = 6,5$ пФ и $C_{ЗС0} = 5,7$ пФ соответственно, эквивалент напряжения Эрли $U_A = 30$ В.

Решить нижеприведенную систему уравнений относительно тока стока I_C :

$$\begin{cases} I_C = I_{C0} \left(1 - U_{ЗИ} / U_{ОТС}\right)^2, \\ U_{ЗИ} = I_C \cdot R_{И}, \end{cases}$$

где I_C – ток стока;

I_{C0} – ток стока при нулевом смещении затвор-исток;

$U_{ЗИ}$ – напряжение затвор-исток;

$U_{ОТС}$ – напряжение отсечки транзистора.

Вычислить напряжения в узлах схемы.

3.2.4. Используя справочные данные транзистора, определить следующие параметры его модели:

а) крутизну S по формуле $S = (2I_{C0} / |U_{ОТС}|) (1 - U_{ЗИ} / U_{ОТС})$;

б) выходную проводимость по формуле (3.3);

в) емкости транзистора в рабочей точке по формулам (3.14).

3.2.5. Вычислить сигнальные параметры каскада :

а) коэффициент усиления по напряжению K_U по формуле (3.1);

б) входное и выходное сопротивления каскада по формуле (3.2);

в) эквивалентную входную ёмкость по формуле (3.13) ;

г) верхнюю граничную частоту по формулам (3.10)... (3.12);

д) нижнюю граничную частоту по формулам (3.5)... (3.8) .

3.3 Выполнение работы

3.3.1 Включить компьютер и запустить программу Electronic Workbench.

3.3.2 Изобразить на экране принципиальную схему усилителя, представленную на рисунке 3.3.

3.3.3 Используя мультиметр, определить постоянные напряжения в узлах принципиальной схемы (статический режим).

3.3.4 Определить влияние сопротивления нагрузки на амплитудную характеристику усилителя .

Подключить мультиметр к выходу усилителя и измерить амплитудную характеристику усилителя в соответствии с методикой пункта 1.1.2 при сопротивлениях нагрузки $R_{H1} = 2$ кОм и $R_{H2} = 100$ кОм . Рекомендуемые уровни входного сигнала: 1, 2, 5, 10, 20, 50, 100, 200, 500 мВ.

3.3.5 Определить влияние сопротивления нагрузки на амплитудно-частотную характеристику усилителя.

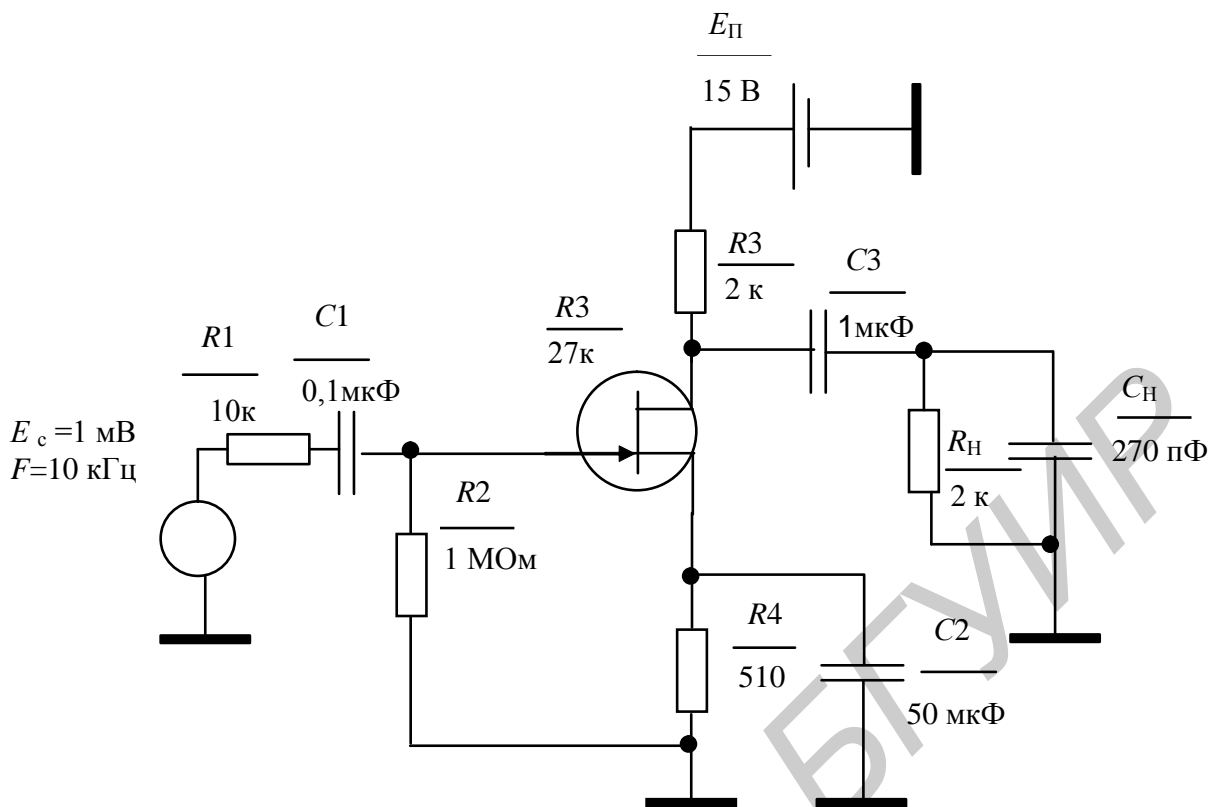


Рисунок 3.3 – Принципиальная схема исследуемого каскада предварительного усиления на полевом транзисторе.

С помощью характериографа определить параметры амплитудно-частотных характеристик (K_0, f_H, f_B) при сопротивлениях нагрузки $R_{H1} = 2 \text{ кОм}$ и $R_{H2} = 100 \text{ кОм}$.

3.3.6 Определить влияние емкости нагрузки на амплитудно-частотную характеристику усилителя.

С помощью характериографа определить параметры амплитудно-частотных характеристик (K_0, f_H, f_B) при сопротивлении нагрузки $R_{H1} = 2 \text{ кОм}$ и значениях емкости $C_{H1} = 270 \text{ пФ}$ и $C_{H2} = 27 \text{ пФ}$.

3.3.7 Определить влияние емкости блокировочного конденсатора C_2 на амплитудно-частотную характеристику усилителя.

С помощью характериографа определить параметры амплитудно-частотных характеристик (K_0, f_H, f_B) при сопротивлении нагрузки $R_{H1} = 2 \text{ кОм}$ и значениях емкости конденсатора $C_2 = 1 \text{ пФ}$ и $C_2 = 50 \text{ мкФ}$.

3.3.8 Определить влияние блокировочной емкости C_2 на входное и выходное сопротивления усилителя.

Измерить входное и выходное сопротивления усилителя по методике пункта 1.1.5 при значениях емкости конденсатора $C_2 = 1 \text{ пФ}$ и $C_2 = 50 \text{ мкФ}$.

3.3.9 Определить влияние емкости разделительного конденсатора C_3 на амплитудно-частотную характеристику усилителя.

С помощью характериографа определить параметры амплитудно-частотных характеристик (K_0, f_H, f_B) при нагрузке $R_{H1} = 2 \text{ кОм}$, $C_H = 270 \text{ пФ}$ и значениях емкости конденсатора $C_3 = 0,1 \text{ мкФ}$ и $C_3 = 1 \text{ мкФ}$.

3.3.10 Определить влияние значения сопротивления в цепи стока R_3 на выходное сопротивление усилителя.

Измерить выходное сопротивление усилителя по методике пункта 1.1.5 при значениях сопротивления $R_3=1$ кОм и $R_3=2$ кОм.

3.3.11 Определить влияние емкости разделительного конденсатора C_3 на переходную характеристику усилителя .

Подключить к входу усилителя импульсный источник сигнала с параметрами: амплитуда импульса – 1мВ, длительность фронтов – 10 нс, длительность импульса – 1 мс, период повторения 2мс. Выход усилителя соединить с осциллографом из панели инструментов (использовать вход А осциллографа). Измерить параметры переходной характеристики усилителя в соответствии с пунктом 1.1.4 при сопротивлении нагрузки $R_H=2$ кОм, $C_H=100$ пФ и значениях емкости $C_3=5,1$ мкФ и $C_3=1$ мкФ .

3.4 Контрольные вопросы

1 Укажите причины нестабильности режима полевых транзисторов в усилительных каскадах.

2 Объясните принцип истоковой стабилизации режима транзистора в каскаде.

3 Как усилительные свойства каскада зависят от режима транзистора по постоянному току и от значения нагрузки по переменному току?

4 Как зависят входное и выходное сопротивления каскада от параметров транзистора и его режима по постоянному току?

5 Объясните, чем определяются свойства каскада в области верхних частот.

6 Объясните, как формируется амплитудно-частотная характеристика каскада в области нижних частот.

Лабораторная работа №4 ИССЛЕДОВАНИЕ ЭМИТТЕРНОГО ПОВТОРИТЕЛЯ

Цель работы – исследовать влияние различных схемных элементов на параметры эмиттерного повторителя. Закрепить навыки экспериментального исследования усилительных каскадов.

4.1 Краткие теоретические сведения

Эмиттерный повторитель широко используется в усилительных устройствах в качестве согласующих и выходных каскадов. Типовая схема эмиттерного повторителя приведена на рисунке 4.1. Упрощённо эта схема изображается в виде, показанном на рисунке 4.2.

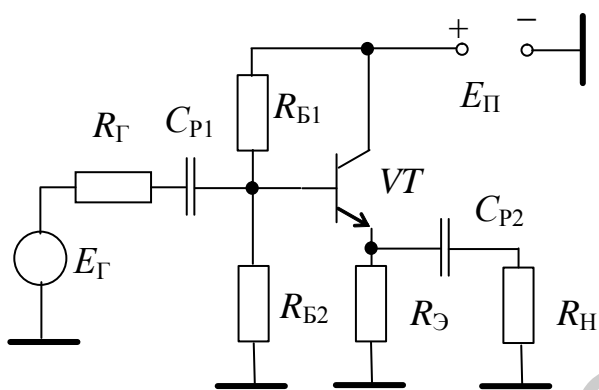


Рисунок 4.1 – Типовая схема эмиттерного повторителя

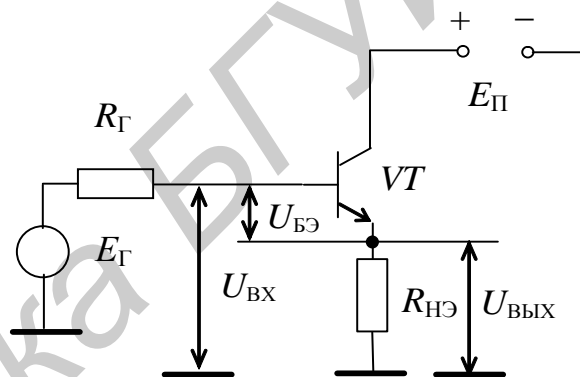


Рисунок 4.2 – Упрощенная схема эмиттерного повторителя

На рисунке 4.2 $R_{ЭН} = R_{Э} \parallel R_{Н}$, где $R_{Н}$ – входное сопротивление следующей цепи или каскада. Такой же вид имеет реальная схема эмиттерного повторителя в случае непосредственной связи с источником сигнала и нагрузкой. В эмиттерном повторителе транзистор включён по схеме с общим коллектором. Входное напряжение приложено к участку база – коллектор ($U_{ВХ} = U_{БК}$), выходное снимается с участка эмиттер – коллектор ($U_{ВЫХ} = U_{КЭ}$). Поскольку $U_{ВХ} = U_{БЭ} + U_{ВЫХ}$, то коэффициент усиления по напряжению эмиттерного повторителя всегда меньше единицы, т. е. повторитель не усиливает по напряжению:

$$K = \frac{U_{ВЫХ}}{U_{ВХ}} = \frac{U_{ВЫХ}}{U_{БЭ} + U_{ВЫХ}} < 1. \quad (4.1)$$

Поскольку $U_{КЭМ} = I_{ЭМ} \cdot R_{ЭН} = (I_{БМ} + I_{КМ}) \cdot R_{ЭН}$,

$$U_{БЭМ} = I_{БМ} \cdot h_{11Э} \quad \text{и} \quad I_{КМ} / I_{БМ} = h_{21Э},$$

то

$$K = \frac{(1 + h_{21Э}) \cdot R_{ЭН}}{h_{11Э} + (1 + h_{21Э}) \cdot R_{ЭН}}. \quad (4.2)$$

В то же время эмиттерный повторитель является усилителем тока с максимальным коэффициентом усиления, т. к. входным током является базовый, а выходным – эмиттерный:

$$K_i = \frac{i_{ВЫХ}}{i_{ВХ}} = \frac{I_{ЭМ}}{I_{БМ}} = \frac{I_{БМ} + I_{КМ}}{I_{БМ}} = 1 + h_{21Э}. \quad (4.3)$$

Как видно из направлений протекания переменных составляющих токов в каскаде, повторитель не изменяет полярности усиливаемого сигнала, т.е. является неинвертирующей схемой.

Входное сопротивление транзистора с общим коллектором $R_{ВХТ}$ в области низких и средних частот велико при условии, что нагрузка представляет собой заметную величину по сравнению с $h_{11Э}$ транзистора:

$$R_{ВХТ} = h_{11Э} + (1 + h_{21Э}) \cdot R_{ЭН}. \quad (4.4)$$

Цепи питания базы по постоянному току снижают входное сопротивление каскада. В схеме, представленной на рисунке 4.1,

$$R_{ВХ} = R_{ВХТ} \parallel R_B, \quad (4.5)$$

где $R_B = R_{Б1} \parallel R_{Б2}$.

Для уменьшения шунтирующего действия базового делителя используют схему, показанную на рисунке 4.3.

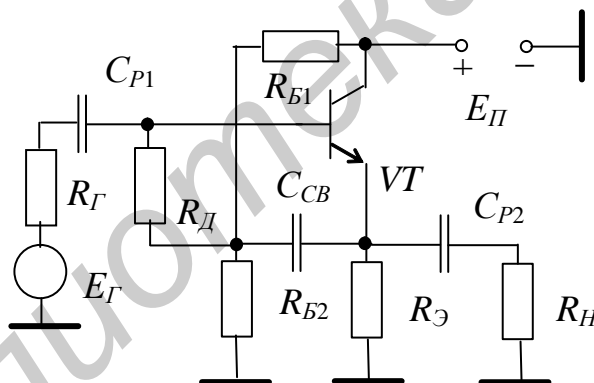


Рисунок 4.3 – Схема эмиттерного повторителя с нейтрализацией базового делителя

Подача синфазного напряжения сигнала с выхода повторителя в среднюю точку делителя через конденсатор $C_{СВ}$ практически «отключает» по переменному току резистор R_D , через который подаётся на базу транзистора напряжение смещения делителя. Это эквивалентно увеличению R_D до величины

$$R_{D \text{ экв}} = \frac{R_D}{1 - K_U}. \quad (4.6)$$

Выходное сопротивление каскада достаточно мало и зависит от сопротивления источника сигнала (генератора):

$$R_{ВЫХ} = \frac{h_{11Э} + R_{Г}}{1 + h_{21Э}}. \quad (4.7)$$

Все перечисленные параметры физически объясняются тем, что каскад с общим коллектором может рассматриваться как каскад с общим эмиттером, охваченный 100 %-ной отрицательной обратной связью по напряжению и последовательной по входу (последовательная ООС по напряжению). Эта связь определяет широкополосность каскада и малые нелинейные искажения сигнала. По сравнению со схемой с общим эмиттером здесь значительно ослаблено влияние емкости перехода база – эмиттер, т. к. она находится под напряжением, равным разности его входного и выходного напряжений, а при $K_U \rightarrow 1$ эта разность стремится к нулю:

$$C_0 = C_K + C_{Б'Э}(1 - K_U). \quad (4.8)$$

Емкость перехода база – эмиттер $C_{Б'Э}$ рассчитывается по формуле (2.16).

Верхняя граничная частота эмиттерного повторителя определяется по формулам, аналогичным формулам для резисторного усилительного каскада:

$$f_B = \frac{1}{2\pi\tau_B}, \quad (4.9)$$

$$\tau_B = \sqrt{\tau_{B1}^2 + \tau_{B2}^2}, \quad (4.10)$$

где τ_{B1} и τ_{B2} – постоянные времени входной и выходной цепей соответственно.

Эти постоянные времени определяются по формулам

$$\tau_{B1} = C_0 \frac{R_{Г} \cdot R_{ВХ}}{R_{Г} + R_{ВХ}}, \quad (4.11)$$

$$\tau_{B2} = C_H \frac{R_H \cdot R_{ВЫХ}}{R_H + R_{ВЫХ}}, \quad (4.12)$$

Нижняя граничная частота каскада определяется значениями разделительных конденсаторов C_{P1} и C_{P2} :

$$f_H = \frac{1}{2\pi\tau_H}, \quad (4.13)$$

$$\tau_H \approx \frac{1}{\sqrt{(1/\tau_{H1})^2 + (1/\tau_{H2})^2}}, \quad (4.14)$$

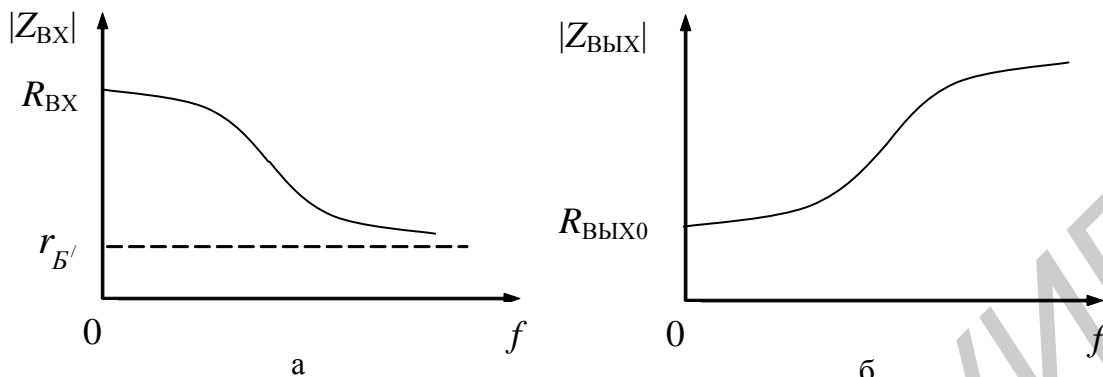
$$\tau_{H1} = C_{P1}(R_{Г} + R_{ВХ}), \quad (4.15)$$

$$\tau_{H2} = C_{P2}(R_H + R_{ВЫХ}), \quad (4.16)$$

где $R_{Г}$ – внутреннее сопротивление источника сигнала.

Уменьшение входного сопротивления повторителя на высоких частотах (рисунок 4.4, а) определяется в основном влиянием ёмкости коллекторного перехода, к которой приложено входное напряжение (через объемное сопротив-

ление базы $r_{B'}$ транзистора). Выходное сопротивление каскадов на высоких частотах возрастает (рисунок 4.4, б) и в некотором диапазоне частот носит индуктивный характер.



а – входное сопротивление; б – выходное сопротивление
 Рисунок 4.4 – Зависимость входного и выходного сопротивления эмиттерного повторителя от частоты

4.2 Подготовка к работе

4.2.1 Изучить по рекомендованной литературе принцип работы, основные параметры и характеристики резисторного каскада на биполярном транзисторе.

4.2.2 Изучить схему исследуемого усилителя, представленную на рисунке 4.5, определить назначение элементов.

4.2.3 Провести анализ схемы исследуемого усилителя по постоянному току при напряжении питания $E_{П} = +15$ В. Вычислить напряжения в узлах схемы, определить величины $I_{0К}$, $U_{0КЭ}$, P_K . При расчётах принять $U_{БЭ} = 0,6$ В, а постоянным током базы пренебречь.

4.2.4 Используя справочные данные транзистора BC107BP ($h_{21Э} = 400$; $|h_{21Э}| = 2,5$ на частоте $f_{ИЗМ} = 100$ МГц; $C_{K0} = 4$ пФ; $\tau_K = 2$ пс; $m = 1,6$; $n = 0,33$), определить следующие параметры его модели:

а) емкость коллектора при измерении $|h_{21Э}|$ $C_{Kh} = C_{K0} / (1 + |U_{БК}| / \varphi_K)^n$.
 Принять $U_{БК} = 5$ В, $\varphi_K = 1$ В;

б) входное сопротивление транзистора в схеме с ОЭ в заданном режиме $h_{11Э} = r_{б'} + r_{б'э}$,

где $r_{б'} = \tau_K / C_{Kh}$; $r_{б'э} = r_{э}(1 + h_{21Э})$; $r_{э} = m \cdot \varphi_T / I_{0К}$; $\varphi_T = 26$ мВ;

в) крутизну транзистора $Y_{21Э} = h_{21Э} / h_{11Э}$;

г) емкость коллектора в рабочей точке $C_K = C_{K0} / (1 + |U_{БК}| / \varphi_K)^n$,

где $U_{БК}$ – напряжение база–коллектор в рабочей точке;

д) предельную частоту усиления по току $f_h = |h_{21Э}| \cdot f_{изм} / h_{21Э}$;

е) емкость перехода база – эмиттер $C_{B'E}$ по формуле (2.16).

4.2.5 Вычислить малосигнальные параметры эмиттерного повторителя:

а) коэффициент усиления по напряжению K_U по формуле (4.2);

б) входное сопротивление R_{BX} по формулам (4.4), (4.5);

в) сквозной коэффициент передачи $K_E = K_U \cdot R_{BX} / (R_{BX} + R_1)$;

г) эквивалентную входную ёмкость по формуле (4.8) ;

д) верхнюю граничную частоту по формулам (4.9)...(4.12);

е) нижнюю граничную частоту по формулам (4.13)...(4.16) ;

ж) переходные искажения (длительность фронта $t_{ФР}$ и величину скола вершины Δ импульса) по формулам (1.4),(1.6). При определении скола вершины импульса принять длительность импульса $t_{И} = 1$ мс.

4.3 Выполнение работы

4.3.1 Включить компьютер и запустить программу Electronic Workbench.

4.3.2 Изобразить на экране принципиальную схему повторителя, представленную на рисунке 4.5.

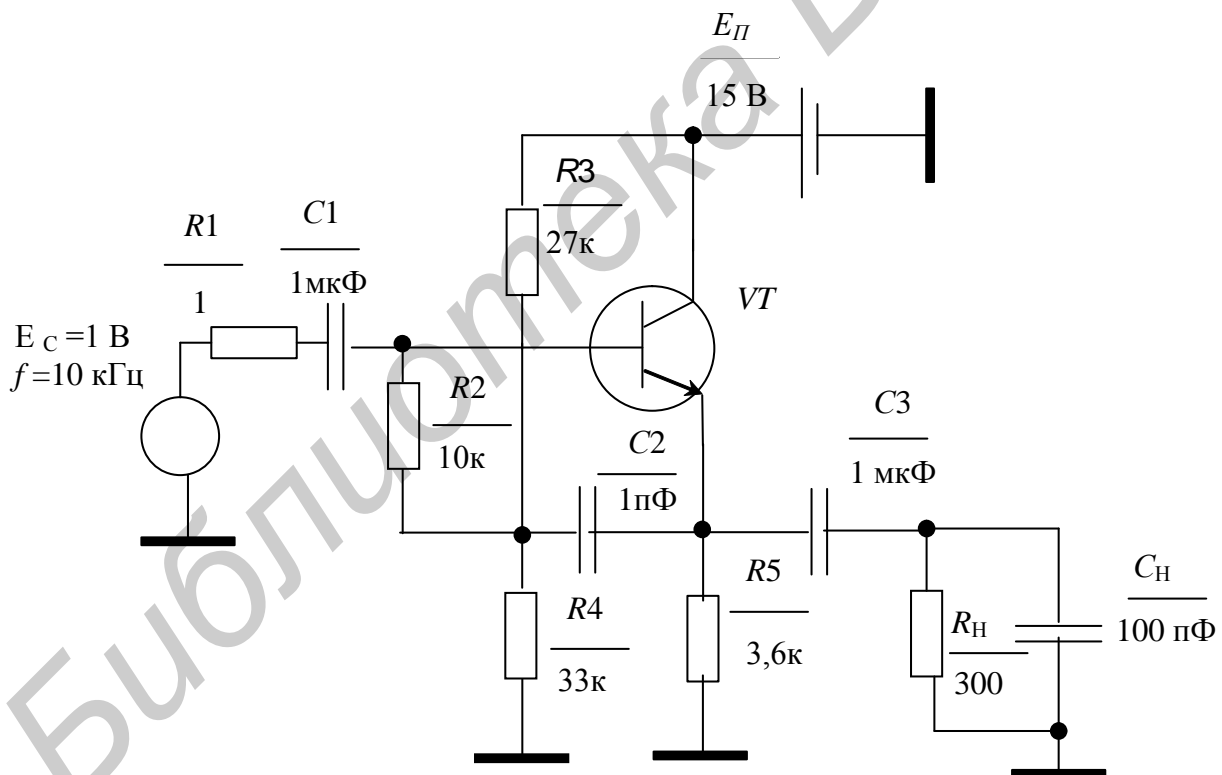


Рисунок 4.5 – Принципиальная схема исследуемого эмиттерного повторителя

4.3.3 Используя мультиметр, определить постоянные напряжения в узлах принципиальной схемы (статический режим).

4.3.4 Определить влияние сопротивления нагрузки на амплитудную характеристику повторителя.

Подключить мультиметр к нагрузке и измерить амплитудную характеристику повторителя в соответствии с методикой пункта 1.1.2 при сопротивлениях нагрузки $R_{H1} = 300 \text{ Ом}$ и $R_{H2} = 1 \text{ кОм}$. Рекомендуемые уровни входного сигнала: 10, 20, 50, 100, 200, 500 мВ, 1, 2, 5 В.

4.3.5 Определить влияние сопротивления нагрузки на входное сопротивление повторителя.

Подключить мультиметр к нагрузке $R_{H1} = 300 \text{ Ом}$. Измерить напряжение на нагрузке при $R1 = 1 \text{ Ом}$ (U_{H1}) и при $R1 = 20 \text{ кОм}$ (U_{H2}).

Рассчитать входное сопротивление каскада по формуле

$$R_{BX} = \frac{U_{H2}}{U_{H1} - U_{H2}} \cdot \Delta R1,$$

где $\Delta R1$ – разность значений сопротивления $R1$.

Повторить измерения при сопротивлении нагрузки $R_{H2} = 1 \text{ кОм}$.

4.3.6 Определить влияние сопротивления нагрузки на амплитудно-частотную характеристику повторителя.

Определить параметры амплитудно-частотных характеристик (K_0, f_H, f_B) при сопротивлениях нагрузки $R_{H1} = 300 \text{ Ом}$ и $R_{H2} = 1 \text{ кОм}$.

4.3.7 Определить влияние емкости нагрузки на амплитудно-частотную характеристику повторителя.

Определить параметры амплитудно-частотных характеристик (K_0, f_H, f_B) при сопротивлении нагрузки $R_{H1} = 300 \text{ Ом}$ и значениях емкости $C_{H1} = 100 \text{ пФ}$ и $C_{H2} = 1000 \text{ пФ}$.

4.3.8 Определить влияние емкости разделительного конденсатора $C3$ на амплитудно-частотную характеристику повторителя.

Определить параметры амплитудно-частотных характеристик (K_0, f_H, f_B) при нагрузке $R_{H1} = 300 \text{ Ом}$, $C_H = 100 \text{ пФ}$ и значениях емкости конденсатора $C3 = 5 \text{ мкФ}$ и $C3 = 1 \text{ мкФ}$.

4.3.9 Определить влияние значения сопротивления источника сигнала ($R1$) на выходное сопротивление повторителя.

Измерить выходное сопротивление повторителя по методике пункта 1.1.5 при значениях сопротивления $R1 = 1 \text{ Ом}$ и $R1 = 20 \text{ кОм}$.

4.3.10 Определить влияние емкости разделительного конденсатора $C3$ на переходную характеристику повторителя.

Подключить к входу усилителя импульсный источник сигнала параметрами: амплитуда импульса – 1 мВ, длительность фронтов – 10 нс, длительность импульса – 500 мкс. Выход усилителя соединить с осциллографом из панели инструментов программы Electronic Workbench (использовать вход А осциллографа). Измерить параметры переходной характеристики усилителя в соответствии с пунктом 1.1.4 при сопротивлении нагрузки $R_{H1} = 1 \text{ кОм}$, $C_H = 270 \text{ пФ}$ и значениях емкости $C3 = 5 \text{ мкФ}$ и $C3 = 1 \text{ мкФ}$.

4.3.11 Определить сквозную АЧХ при $R_1=20$ кОм и трех значениях нагрузки:

$R_H=300$ Ом и $C_H=1$ пФ, $R_H=1$ кОм и $C_H=1$ пФ, $R_H=1$ кОм и $C_H=1000$ пФ.

4.3.12 Определить влияние схемы нейтрализации делителя на входное и выходное сопротивление повторителя.

Установить значения емкости конденсатора $C_2=10$ мкФ и сопротивления нагрузки $R_{H1}=300$ Ом. Измерить входное сопротивление каскада по методике пункта 4.3.5.

Установить значение сопротивления $R_1=20$ кОм. Измерить выходное сопротивление повторителя по методике пункта 1.1.5.

Сравнить результаты измерений по пунктам 4.3.5, 4.3.9 и по пункту 4.3.12 при одинаковых значениях R_H и R_1 .

4.4. Контрольные вопросы

1 Нарисуйте полную и частные эквивалентные схемы эмиттерного повторителя для низкочастотной и высокочастотной областей.

2 Дайте сравнительную оценку параметров эмиттерного повторителя по отношению к параметрам схемы с общим эмиттером.

3 Поясните принцип нейтрализации шунтирующего действия делителя в базовой цепи повторителя.

4 Чем в первую очередь определяется выходное сопротивление эмиттерного повторителя?

5 Почему эмиттерный повторитель обладает более широкой полосой пропускания, чем каскад с общим эмиттером?

Лабораторная работа N5 ИССЛЕДОВАНИЕ ИСТОКОВОГО ПОВТОРИТЕЛЯ

Цель работы – исследовать влияние различных схемных элементов на параметры истокового повторителя. Закрепить навыки экспериментального исследования усилительных каскадов.

5.1 Краткие теоретические сведения

Истоковые повторители широко используются в усилительных устройствах в качестве согласующих и выходных каскадов.

Типовая схема истокового повторителя изображена на рисунке 5.1 и представляет собой каскад с общим стоком. Его основные свойства аналогичны свойствам эмиттерного повторителя.

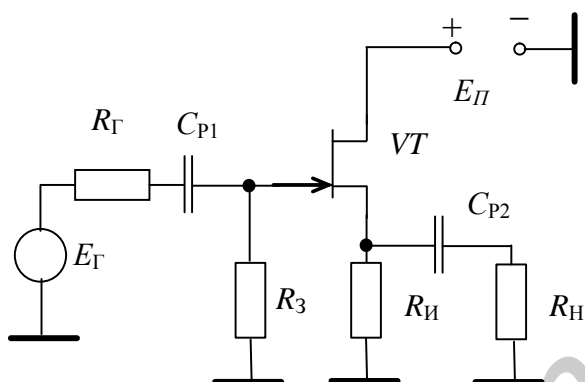


Рисунок 5.1 – Типовая схема истокового повторителя

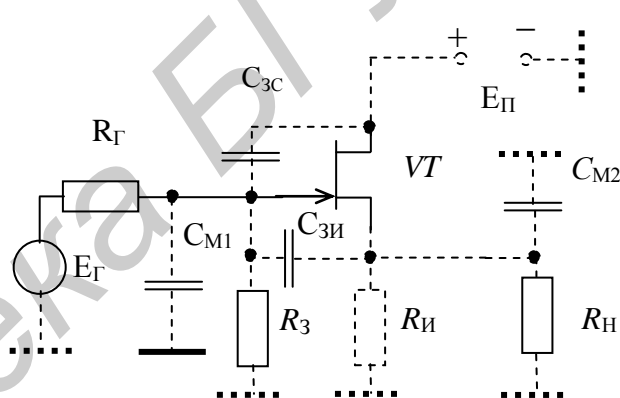


Рисунок 5.2 – Эквивалентная схема истокового повторителя

Коэффициент усиления по напряжению

$$K_U = \frac{U_{СИ}}{U_{ЗИ} + U_{СИ}} = \frac{S \cdot R_{И \text{ ЭКВ}}}{1 + S \cdot R_{И \text{ ЭКВ}}} < 1, \quad (5.1)$$

где S – крутизна транзистора в рабочей точке;

$$R_{И \text{ ЭКВ}} = \frac{1}{\frac{1}{R_{И}} + \frac{1}{R_{Н}} + h_{22И}} - \text{эквивалентное сопротивление в цепи истока.}$$

Здесь $h_{22И}$ – дифференциальная проводимость сток – исток транзистора.

Входное сопротивление истокового повторителя практически определяется резистором в цепи затвора, т. е. $R_{ВХ} = R_3$. На высоких частотах входной импеданс определяется входной динамической емкостью, которая значительно меньше входной ёмкости схемы с общим истоком и в основной определяется емкостью затвор – сток (рисунок 5.2):

$$C_{BX \text{ ДИИ}} = C_{3C} + C_{3И} \cdot (1 - K_U). \quad (5.2)$$

Выходное сопротивление истокового повторителя в области низких и средних частот достаточно мало и при использовании транзистора с большой крутизной определяется выражением

$$R_{ВЫХ} = \frac{1}{S + h_{22И}} \approx \frac{1}{S}, \quad (5.3)$$

где S – крутизна транзистора в рабочей точке;

$h_{22И}$ – дифференциальная проводимость сток – исток транзистора.

Как видно из выражения (5.3), выходное сопротивление каскада не зависит от сопротивления источника сигнала в отличие от эмиттерного повторителя.

Нижняя граничная частота каскада определяется по формуле

$$f_H = \frac{1}{2\pi\tau_H}, \quad (5.4)$$

где τ_H – эквивалентная постоянная времени каскада в области нижних частот.

Постоянную времени τ_H можно определить из выражения

$$\tau_H \approx \frac{1}{\sqrt{(1/\tau_{H1})^2 + (1/\tau_{H2})^2 + (1/\tau_{H3})^2}}, \quad (5.5)$$

где τ_{H1} , τ_{H2} , τ_{H3} – постоянные времени цепей, подключенных к затвору, истоку и стоку транзистора соответственно.

Эти постоянные времени определяются по формулам

$$\tau_{H1} = C_{P1}(R_{Г} + R_{ВХ}); \quad (5.6)$$

$$\tau_{H2} = \frac{1}{S} \cdot C_{И}; \quad (5.7)$$

$$\tau_{H3} = C_{P2}(R_{Н} + R_{ВЫХ}), \quad (5.8)$$

где C_{P1} и C_{P2} – емкость разделительных конденсаторов на входе и выходе каскада;

$R_{Г}$ – внутреннее сопротивление источника сигнала;

$C_{И}$ – емкость блокировочного конденсатора в цепи истока.

Верхняя граничная частота каскада определяется по формуле

$$f_B = \frac{1}{2\pi\tau_B}, \quad (5.9)$$

где τ_B – эквивалентная постоянная времени каскада в области верхних частот.

Постоянную времени τ_B можно определить из выражения

$$\tau_B = \sqrt{\tau_{B1}^2 + \tau_{B2}^2}, \quad (5.10)$$

где τ_{B1} и τ_{B2} – постоянные времени входной и выходной цепей соответственно.

Эти постоянные времени определяются по формулам

$$\tau_{B1} = C_0 \frac{R_{Г} \cdot R_{BX}}{R_{Г} + R_{BX}}, \quad (5.11)$$

$$\tau_{B2} = C_H \frac{R_H \cdot R_{BЫX}}{R_H + R_{BЫX}}, \quad (5.12)$$

где C_0 – эквивалентная входная емкость каскада;

C_H – емкость нагрузки.

Эквивалентная входная емкость каскада включает емкость затвор – сток $C_{ЗС}$ и пересчитанную на вход емкость затвор – исток $C_{ЗИ}$:

$$C_0 = C_{ЗС} + C_{ЗИ} \cdot (1 - K_U), \quad (5.13)$$

где K_U – коэффициент передачи каскада по напряжению.

Емкости затвор-исток $C_{ЗИ}$ и затвор-сток $C_{ЗС}$ определяются по формулам

$$C_{ЗИ} = C_{ЗИ0} / (1 + |U_{ЗИ}| / \varphi_K)^n, \quad C_{ЗС} = C_{ЗС0} / (1 + |U_{ЗС}| / \varphi_K)^n, \quad (5.14)$$

где $C_{ЗИ0}$ и $C_{ЗС0}$ – емкости затвор – исток и затвор – сток при нулевых смещениях;

$U_{ЗИ}$ и $U_{ЗС}$ – напряжения затвор-исток и затвор – сток в рабочей точке;

$\varphi_K \approx 1B$ – контактная разность потенциалов p - n -перехода;

$m = 0,33$ – коэффициент вольт-фарадной характеристики p - n -перехода.

5.2. Подготовка к работе

5.2.1 Изучить по рекомендованной литературе принцип работы, основные параметры и характеристики резисторного каскада на полевом транзисторе.

5.2.2 Изучить схему исследуемого усилителя, представленную на рисунке 5.3, определить назначение элементов.

5.2.3 Провести анализ схемы исследуемого усилителя по постоянному току при напряжении питания $E_0 = +15$ В.

В каскаде используется полевой транзистор J309, имеющий следующие параметры: напряжение отсечки $U_{ОТС} = -2,4$ В, ток стока при нулевом смещении затвор – исток $I_{C0} = 22$ мА, емкости затвор – исток и затвор – сток при нулевых смещениях $C_{ЗИ0} = 6,5$ пФ и $C_{ЗС0} = 5,7$ пФ соответственно, эквивалент напряжения Эрли $U_A = 30$ В.

Решить нижеприведенную систему уравнений относительно тока стока

$$\begin{cases} I_C = I_{C0} \left(1 - U_{ЗИ} / U_{ОТС}\right)^2, \\ U_{ЗИ} = I_C \cdot R_{И}, \end{cases}$$

где I_C – ток стока;

I_{C0} – ток стока при нулевом смещении затвор – исток;

$U_{ЗИ}$ – напряжение затвор – исток;

$U_{ОТС}$ – напряжение отсечки транзистора.

Вычислить напряжения в узлах схемы.

5.2.4 Используя справочные данные транзистора, определить следующие параметры его модели:

- а) крутизну S по формуле $S = (2I_{C0}/|U_{OTC}|) \cdot (1 - |U_{ЗИ}|/|U_{OTC}|)$;
- б) выходную проводимость по формуле (3.3);
- в) емкости транзистора в рабочей точке по формуле (3.14).

5.2.5. Рассчитать малосигнальные параметры истокового повторителя:

- а) коэффициент усиления по напряжению K_U по формуле (5.1);
- б) выходное сопротивление $R_{ВЫХ}$ по формуле (5.3);
- в) входное сопротивление $R_{ВХ} \approx R_3$;
- г) сквозной коэффициент передачи $K_E = K_U \cdot R_{ВХ} / (R_{ВХ} + R1)$;
- д) эквивалентную входную ёмкость по формуле (5.13);
- е) верхнюю граничную частоту по формулам (5.10)... (5.12);
- ж) нижнюю граничную частоту по формулам (5.4)... (5.8);
- з) переходные искажения (длительность фронта $t_{ФР}$ и величину скола вершины Δ импульса) по формулам (1.4), (1.6). При определении скола вершины импульса принять длительность импульса $t_H = 1$ мс.

5.3 Выполнение работы

5.3.1 Изобразить на экране принципиальную схему истокового повторителя, представленную на рисунке 5.3.

5.3.2 Используя мультиметр из панели инструментов, определить постоянные напряжения в узлах принципиальной схемы (статический режим).

5.3.3 Определить влияние сопротивления нагрузки на амплитудную характеристику повторителя.

Подключить мультиметр к нагрузке и измерить амплитудную характеристику повторителя в соответствии с методикой пункта 1.1.2 при сопротивлениях нагрузки $R_{H1} = 300$ Ом и $R_{H2} = 1$ кОм. Рекомендуемые уровни входного сигнала: 10, 20, 50, 100, 200, 500 мВ, 1, 2, 5 В.

5.3.4 Определить влияние сопротивления нагрузки на амплитудно-частотную характеристику повторителя.

Определить параметры амплитудно-частотных характеристик (K_0, f_H, f_B) в сопротивлениях нагрузки $R_{H1} = 300$ Ом и $R_{H2} = 1$ кОм.

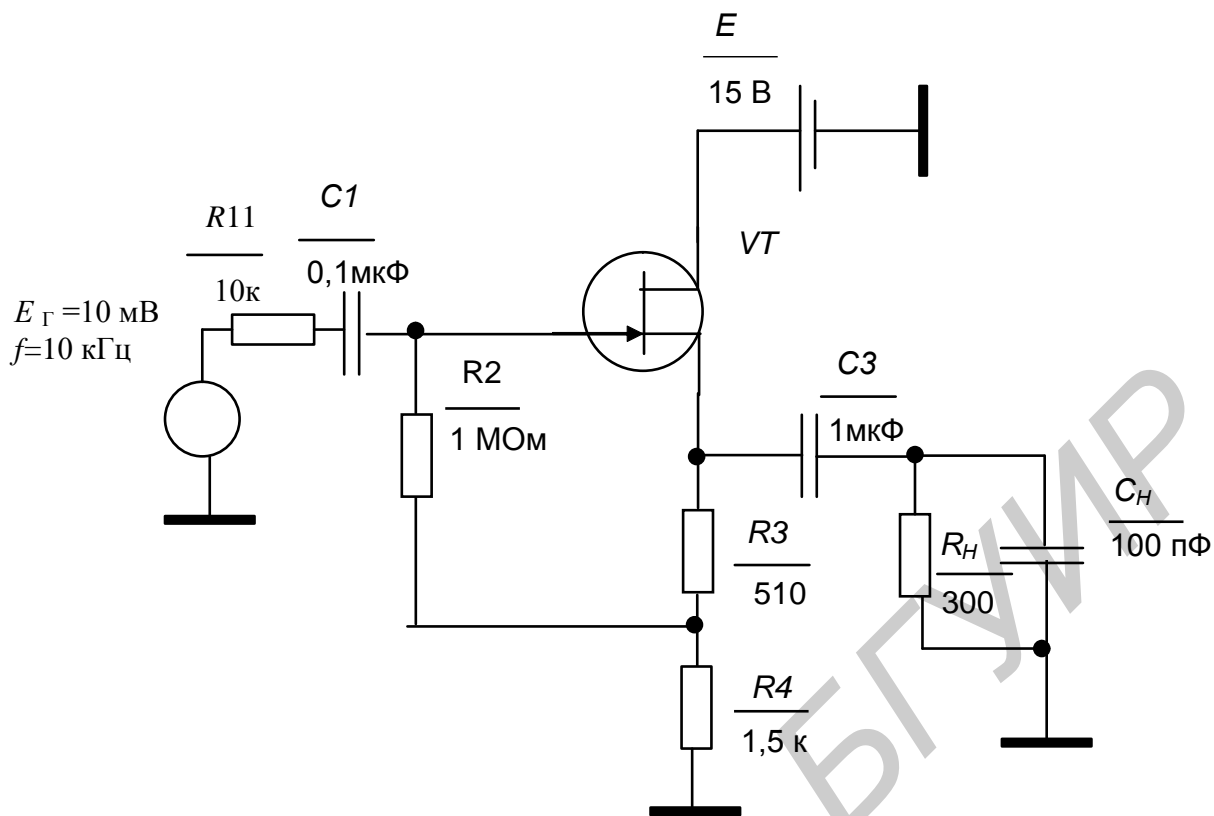


Рисунок 5.3 – Принципиальная схема исследуемого истокового повторителя

5.3.5 Определить влияние емкости нагрузки на амплитудно-частотную характеристику повторителя .

Определить параметры амплитудно-частотных характеристик (K_0, f_H, f_B) при сопротивлении нагрузки $R_{HI} = 300$ Ом и значениях емкости $C_{HI} = 100$ пФ и $C_{H2} = 1000$ пФ .

5.3.6 Определить влияние емкости разделительного конденсатора $C3$ на амплитудно- частотную характеристику повторителя .

Определить параметры амплитудно-частотных характеристик (K_0, f_H, f_B) при нагрузке $R_{HI} = 300$ Ом , $C_H = 100$ пФ и значениях емкости конденсатора $C3 = 0, 1$ мкФ и $C3 = 1$ мкФ .

5.3.7 Определить влияние значения сопротивления источника сигнала ($R1$) на выходное сопротивление повторителя.

Измерить выходное сопротивление повторителя по методике пункта 1.1.5 при значениях сопротивления $R1 = 10$ кОм и $R1 = 500$ кОм.

5.3.8 Определить входное сопротивление повторителя.

Подключить мультиметр к нагрузке. Измерить напряжение на нагрузке при $R1 = 1$ Ом (U_{H1}) и при $R1 = 500$ кОм (U_{H2}).

Рассчитать входное сопротивление каскада по формуле

$$R_{BX} = \frac{U_{H2}}{U_{H1} - U_{H2}} \cdot \Delta R1,$$

где $\Delta R1$ – разность значений сопротивления $R1$.

5.3.9 Отключить резистор R_2 от точки соединения резисторов R_3 и R_4 и соединить освободившийся вывод с общей точкой (рисунок 5.4).

Повторить измерения пунктов 5.3.2 – 5.3.8.

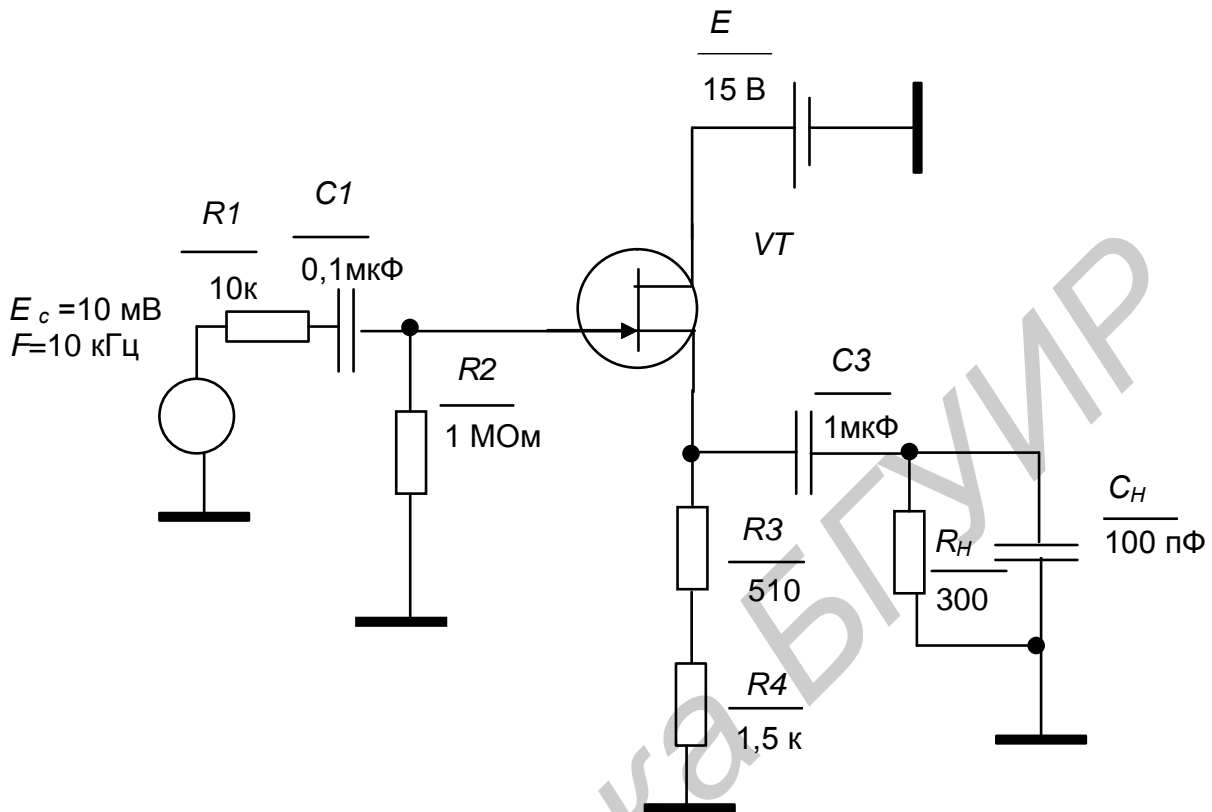


Рисунок 5.4 – Принципиальная схема исследуемого истокового повторителя

5.3.10 Сравните параметры и характеристики двух схем истоковых повторителей.

5.4 Контрольные вопросы

1 Нарисуйте полную и частные эквивалентные схемы истокового повторителя для низкочастотной и высокочастотной областей.

2 Сравните параметры истокового повторителя с параметрами схемы с общим эмиттером.

3 Покажите, как в истоковом повторителе задается режим транзистора по постоянному току и чем определяется входное сопротивление каскада.

4 Каким образом можно повысить входное сопротивление истокового повторителя?

5 Чем определяется выходное сопротивление истокового повторителя?

6 Почему истоковый повторитель обладает более широкой полосой пропускания, чем каскад с общим истоком?

Лабораторная работа №6 ИССЛЕДОВАНИЕ ДИФФЕРЕНЦИАЛЬНОГО КАСКАДА

Цель работы – изучить особенности дифференциального каскада на биполярных транзисторах.

6.1 Краткие теоретические сведения

Дифференциальные каскады (ДК) имеют очень хорошую стабильность режима, их можно соединять последовательно без переходных конденсаторов. Интегральные ДК обладают малыми ошибками усиления постоянной составляющей сигнала, малыми искажениями при воспроизведении высокочастотных и импульсных сигналов. Этот тип каскада является основным схемотехническим элементом для линейных усилительных микросхем с повышенной интеграцией (операционные усилители, компараторы, стабилизаторы).

Основная схема ДК на биполярных транзисторах приведена на рисунке 6.1. Исходный режим транзисторов задается током I_0 в эмиттерной цепи. Величина тока устанавливается резистором $R_Э$ либо генератором стабильного тока (ГСТ) на транзисторах (рисунок 6.2).

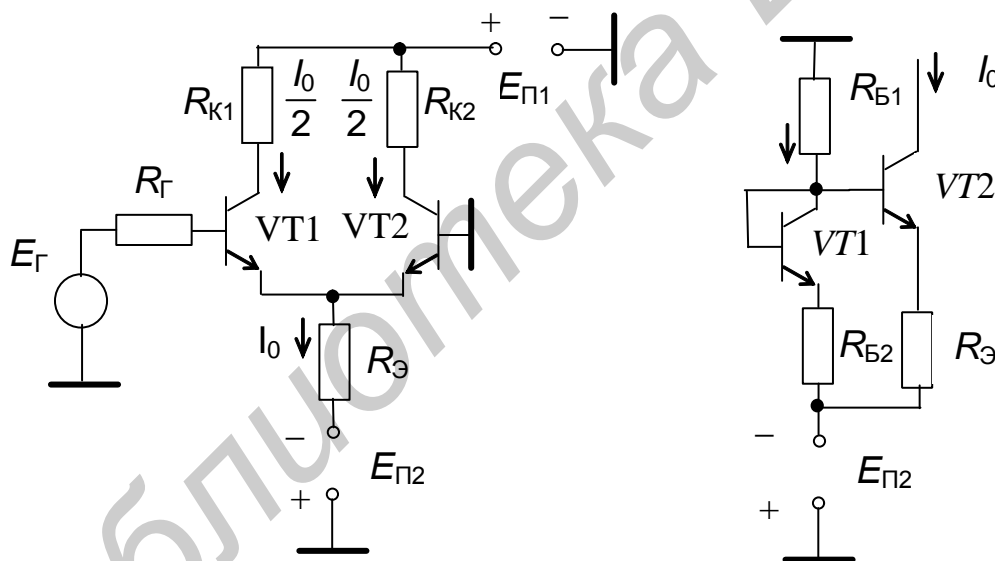


Рисунок 6.1 – Основная схема дифференциального каскада

Рисунок 6.2 – Генератор стабильного тока

Отличительная особенность ДК заключается в том, что он обеспечивает усиление разности сигналов, приложенных к его входам, и ослабляет синфазные для обоих входов составляющие сигналов.

К основным параметрам, характеризующим ДК в режиме малого сигнала, относятся дифференциальный K_D и синфазный K_C коэффициенты передачи, коэффициент ослабления синфазного сигнала $K_{ОСС}$, дифференциальное $R_{ВХД}$ и синфазное $R_{ВХС}$ входные сопротивления, выходное сопротивление $R_{ВЫХ}$.

Дифференциальный коэффициент передачи K_D можно подсчитать, используя эквивалентную схему входной цепи (рисунок 6.3). Для упрощения выкладок примем параметры транзисторов дифференциальной пары идентичными и предположим, что внутреннее сопротивление источника сигнала $R_i \ll h_{11Э}$ ($h_{11Э}$ – входное сопротивление транзистора в схеме с общим эмиттером (ОЭ)), а напряжение сигнала E_C близко к нулю.

По входной цепи усилителя от источника сигнала течет ток

$$I_{CD} = \frac{E_C}{R_i + h_{11Э1} + h_{11Э2} \parallel R_Э(1 + h_{21Э})} \approx \frac{E_C}{2 \cdot h_{11Э}}, \quad (6.1)$$

где $R_Э$ – сопротивление в цепи эмиттеров;

$h_{21Э} = I_K / I_B$ – коэффициент усиления коллекторного тока в схеме с ОЭ;

$h_{11Э2} \parallel R_Э(h_{21Э} + 1)$ – параллельное соединение сопротивлений $h_{11Э2}$ и $R_Э(h_{21Э} + 1)$.

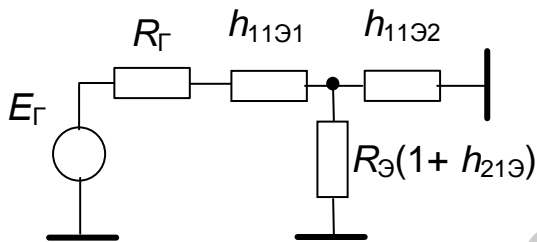


Рисунок 6.3 – Эквивалентная схема входной цепи ДК при дифференциальном несимметричном сигнале

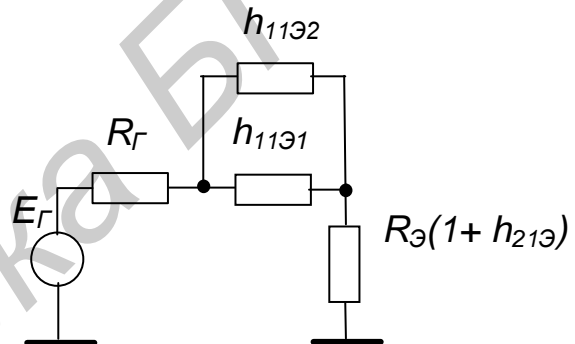


Рисунок 6.4 – Эквивалентная схема входной цепи ДК при синфазном несимметричном сигнале

Приращения выходного сигнала на коллекторных сопротивлениях равны

$$\Delta U_R = \Delta I_K \cdot R_K = I_{CD} \cdot h_{21Э} \cdot R_K. \quad (6.2)$$

Выходной дифференциальный сигнал между коллекторами транзисторов составляет

$$\Delta U_{ВЫХ} = 2\Delta U_R = 2 \frac{E_C}{2h_{11Э}} \cdot h_{21Э} \cdot R_K = E_C \cdot \frac{h_{21Э}}{h_{11Э}} \cdot R_K. \quad (6.3)$$

Дифференциальный коэффициент передачи

$$K_D = \frac{\Delta U_{ВЫХ}}{E_C} = \frac{h_{21Э}}{h_{11Э}} \cdot R_K = S \cdot R_K, \quad (6.4)$$

где $S = h_{21Э} / h_{11Э}$ – крутизна транзистора.

Из формулы (6.4) следует, что дифференциальный коэффициент передачи ДК равен коэффициенту усиления одиночного каскада с ОЭ. Это происходит потому, что в режиме, близком к балансу, на каждый транзистор поступает напряжение сигнала $E_c/2$, а приращения сигналов на коллекторах транзисторов суммируются.

Крутизна биполярного транзистора связана с током эмиттера соотношением

$$S \approx I_3 / m\varphi_T = I_0 / 2m\varphi_T, \quad (6.5)$$

где $\varphi_T = k \cdot T / q$ – температурный потенциал ($k = 1,38 \cdot 10^{-23}$ Дж/град – постоянная Больцмана, T – абсолютная температура, $q = 1,6 \cdot 10^{-19}$ Кл – заряд электрона);

I_0 – суммарный ток в эмиттерах транзисторов;

m – поправочный коэффициент.

Из этого соотношения следует, что дифференциальный коэффициент передачи

$$K_D = (I_0 / 2m\varphi_T) \cdot R_K \quad (6.6)$$

прямо пропорционален сопротивлению нагрузки, величине тока I_0 и обратно пропорционален температуре, а также не зависит от коэффициента усиления транзистора по току $h_{21Э}$ (последнее справедливо при $h_{21Э} \gg 1$).

Входное дифференциальное сопротивление ДК, существующее между его входами (см. рисунок 6.3), равно

$$R_{BX Д} \approx 2h_{21Э} = \frac{2m\varphi_T}{I_B} = \frac{2m\varphi_T \cdot (1 + h_{21Э})}{I_Э} = \frac{4m\varphi_T \cdot (1 + h_{21Э})}{I_0}. \quad (6.7)$$

Приведенные выше соотношения справедливы при полной симметрии схемы, когда токи коллекторов транзисторов $VT1$ и $VT2$ равны.

Если же на базу транзистора $VT1$ подать внешний дифференциальный сигнал U_{BX} , то нормированные токи коллекторов будут описываться соотношениями

$$I_{K1H} = \frac{I_{K1}}{I_0} \approx \frac{1}{1 + e^{-U_{BX}/(m\varphi_T)}}, \quad I_{K2H} = \frac{I_{K2}}{I_0} \approx \frac{1}{1 + e^{U_{BX}/(m\varphi_T)}}. \quad (6.8)$$

Эти функции представлены на рисунке 6.5, из которого следует, что при неравенстве токов крутизна транзисторов уменьшается и, следовательно, коэффициент передачи каскада падает. Зависимость нормированной крутизны от внешнего дифференцированного сигнала изображена на рисунке 6.6.

Синфазный коэффициент передачи можно определить из эквивалентной схемы входной цепи (см. рисунок 6.4).

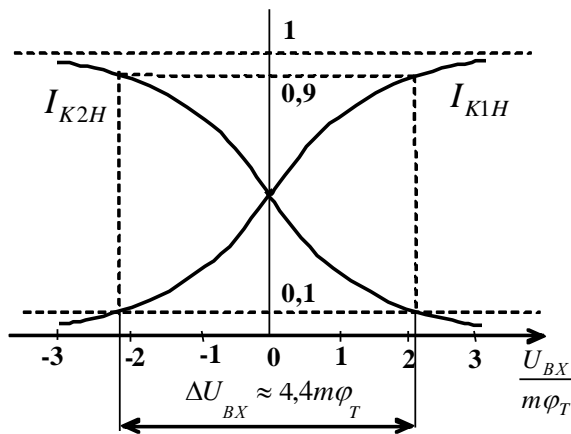


Рисунок 6.5 – Нормированные характеристики токов коллекторов

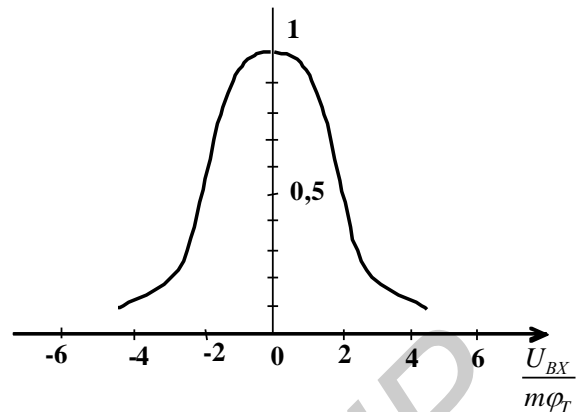


Рисунок 6.6 – Нормированные характеристики крутизны

Ток синфазного сигнала, протекающий по входным цепям транзисторов, равен

$$I_{OC} = \frac{E_{CC}}{h_{11Э}/2 + R_Э \cdot (1 + h_{21Э})} \approx \frac{E_{CC}}{R_Э \cdot (1 + h_{21Э})}, \quad (6.9)$$

где E_{CC} – напряжение источника сигнала.

По каждому из входов ДК протекает ток, вдвое меньший, вызывающий изменение коллекторного тока транзисторов на величину

$$\Delta I_K = (I_{CC}/2) \cdot h_{21Э}, \quad (6.10)$$

а изменение коллекторного напряжения на

$$\Delta U_{ВЫХ C} = \Delta I_K \cdot R_K = \frac{h_{21Э} \cdot E_{CC}}{2R_Э \cdot (1 + h_{21Э})} \cdot R_K \approx E_{CC} \frac{R_K}{2R_Э}. \quad (6.11)$$

Синфазный коэффициент передачи ДК равен

$$K_C = \frac{\Delta U_{ВЫХ C}}{E_{CC}} = \frac{R_K}{2R_Э}. \quad (6.12)$$

Таким образом, абсолютное значение синфазного коэффициента передачи тем меньше, чем больше выбрано соотношение $R_Э$ и R_K . Для увеличения этого соотношения вместо резистора $R_Э$ в цепь эмиттеров транзисторной пары включают генератор стабильного тока на транзисторах (см. рисунок 6.2). Эквивалентное выходное сопротивление по переменному току такого генератора $R_{ЭКВ.} = 1/h_{22Э}$ и составляет десятки – сотни килом.

Если выходной сигнал ДК снимается только с одного выхода, то синфазную ошибку, которая накладывается на выходной дифференциальный сигнал, можно пересчитать во входную цепь через полный дифференциальный коэффициент передачи K_D . Выходные синфазные ошибки передачи, приведенные ко входу, позволяют определить минимальный уровень полезного сигнала между входами, который может быть обнаружен на фоне выходных синфазных ошибок.

Таким образом, напряжение E_{CC} , присутствующее на входах, вызывает между этими входами эквивалентное дифференциальное напряжение ошибок

$$\Delta U_{CЭКВ} = \frac{\Delta U_{ВЫХ.C}}{K_D} = \frac{E_{CC} \cdot K_C}{K_D} = E_{CC} \frac{K_C}{K_D} . \quad (6.13)$$

Качество ДК характеризуется отношением K_C/K , которое с учетом выражений (6.4), (6.5) и (6.12) можно найти через параметры каскада следующим образом:

$$\frac{K_C}{K_D} = \frac{R_K/2R_{Э}}{S \cdot R_K} = \frac{1}{2S \cdot R_{Э}} = \frac{\varphi_T}{2I_{Э} \cdot R_{Э}} , \quad (6.14)$$

где $R_{Э}$ – либо сопротивление в цепи эмиттеров, либо выходное сопротивление генератора тока.

Коэффициент ослабления синфазного сигнала может быть представлен в логарифмической форме

$$K_{CC} = 20 \lg(K_C/K_D), [\text{дБ}]. \quad (6.15)$$

Современные ДК имеют K_{occ} приблизительно – 60...–100 дБ.

Если выходным сигналом является сигнал между выходами 1 и 2 (симметричный выход), то коэффициент ослабления синфазного сигнала зависит не только от отношения $R_{Э}$ и R_K , но и от степени симметрии плеч дифференциального каскада:

$$K_{occ,сим} = 20 \lg \left[\frac{K_0}{K_D} \left[\frac{1}{1+h_{21Э}} \cdot \frac{\Delta h_{21Э}}{h_{21Э}} + \frac{\Delta R_K}{R_K} + \frac{R_i}{R_i + R_B} \cdot \left(\frac{\Delta R_B}{R_B} + \frac{\Delta R_i}{R_i} \right) \right] \right], \quad (6.16)$$

где $h_{21Э} = (h_{21Э1} + h_{21Э2})/2$; $R_K = (R_{K1} + R_{K2})/2$; $R_B = (R_{B1} + R_{B2})/2$;

$R_i = (R_{i1} + R_{i2})/2$ – средние значения коэффициентов усиления транзисторов по току, коллекторных сопротивлений, сопротивлений в цепи базы и сопротивлений источников сигналов соответственно;

$\Delta h_{21Э} = (h_{21Э1} + h_{21Э2})/2$; $\Delta R_K = (R_{K1} - R_{K2})/2$; $\Delta h_{21Э} = (h_{21Э1} + h_{21Э2})/2$;

$\Delta R_B = (R_{B1} - R_{B2})/2$; $\Delta R_i = (R_{i1} - R_{i2})/2$ – отклонения параметров элементов каждого плеча каскада от среднего значения.

Из анализа выражения (6.15) можно сделать следующие выводы:

во-первых, при полной симметрии схемы, т. е. при отклонениях параметров элементов от среднего значения, равных нулю, коэффициент подавления синфазной составляющей равен бесконечности;

во-вторых, поскольку указанные отклонения могут иметь различные знаки, аналогичный результат можно получить, управляя отклонениями элементов от среднего значения таким образом, чтобы модуль в выражении (6.15) стал равным нулю.

Последний вывод является очень важным, т. к. показывает возможность подавления синфазной составляющей при реально существующих отклонениях параметров элементов ДК. На практике наиболее часто используется симметрирование схем путем регулирования отклонений R_K – сопротивлений в цепях коллекторов, например, в интегральных операционных усилителях.

Синфазное входное сопротивление в соответствии с эквивалентной схемой, представленной на рисунке 6.4, можно определить по формуле

$$R_{BX C} = \frac{h_{11Э}}{2} + R_{Э} \cdot (1 + h_{21Э}) \approx R_{Э} \cdot (1 + h_{21Э}). \quad (6.17)$$

В связи с большим значением синфазного входного сопротивления измерение его имеет некоторые особенности. Для исключения влияния входного сопротивления вольтметра на результаты измерения он подключается к одному из выходов ДК. Затем измеряются два значения выходного напряжения: U_{1C} – при подаче входного синфазного сигнала непосредственно на входы ДК и U_{2C} – при подаче этого же сигнала на входы ДК через последовательно включенное сопротивление R .

Результат измерений вычисляется по формуле

$$R_{BX C} = \frac{R}{U_{1C}/U_{2C} - 1}. \quad (6.18)$$

Выходное сопротивление ДК, действующее между его выходами, определяется последовательным включением выходных сопротивлений каждого из выходов по отношению к общей точке ДК

$$R_{ВЫХ} = \frac{1}{h_{22Э1} + 1/R_{K1}} + \frac{1}{h_{22Э2} + 1/R_{K2}} = \frac{2}{h_{22Э} + 1/R_K} \approx 2R_K, \quad (6.19)$$

где $h_{22Э1}, h_{22Э2}$ – выходные проводимости транзисторов дифференциальной пары.

Обобщенные эквивалентные схемы входной и выходной цепей ДК при симметричном входе и выходе представлены на рисунках 6.7 и 6.8 соответственно.

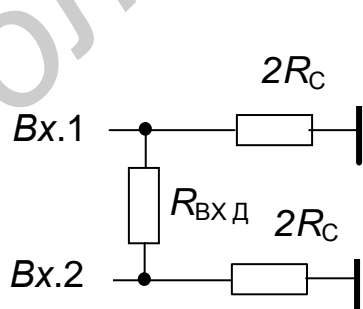


Рисунок 6.7 – Эквивалентная схема входной цепи ДК при симметричном входе

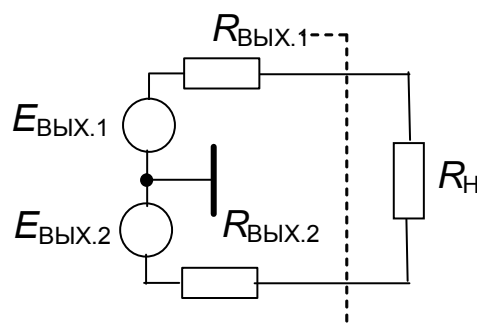


Рисунок 6.8 – Эквивалентная схема выходной цепи ДК при симметричном выходе

6.2 Подготовка к работе

6.2.1 Изучить соответствующие разделы рекомендованной литературы.

6.2.2 Изучить схему исследуемого каскада, представленную на рисунке 6.9.

6.2.3 Рассчитать по формулам (6.6), (6.7), (6.11), (6.16), (6.14) дифференциальный K_d и синфазный K_c коэффициенты усиления, дифференциальное $R_{вхд}$, синфазное $R_{вхс}$ входные сопротивления, а также коэффициент ослабления синфазного сигнала $K_{осс}$ для двух значений тока эмиттеров $I_0=0.1$ мА и $I_0=1$ мА при включении в цепь эмиттеров резисторов $R5$ и $R6$.

При расчётах использовать справочные данные транзистора BC107BP ($h_{21Э} = 400$; $|h_{21Э}| = 2,5$ на частоте $f_{изм} = 100$ МГц; $C_{к0} = 4$ пФ; $\tau_k = 2$ пс; $m=1,6$; $n=0,33$).

6.2.4 Повторить расчёты по пункту 6.2.3 для случая использования генератора стабильного тока. При этом выходное сопротивление генератора принять равным $R_{Э} \approx 1/h_{22Э}$, где $h_{22Э} = 15 \cdot 10^{-6}$ см.

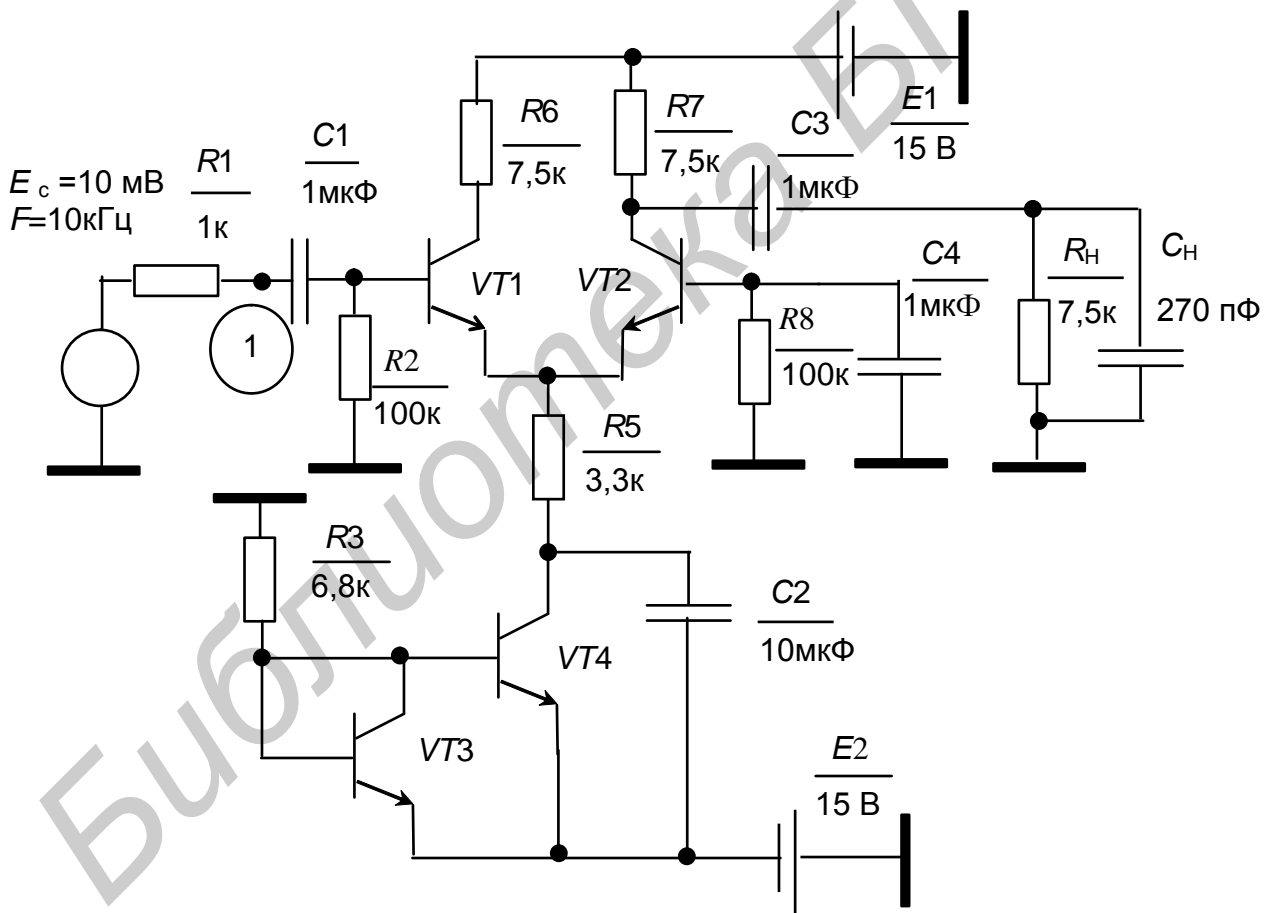


Рисунок 6.9 – Принципиальная схема исследуемого усилителя

6.3 Порядок выполнения работы

Исследование ДУ с несимметричным выходом

6.3.1 Включить компьютер и запустить программу Electronic Workbench.

6.3.2 Изобразить на экране схему, представленную на рисунке 6.7.

6.3.3 Определить статический режим каскада с помощью мультиметра из панели инструментов.

6.3.4 Определить влияние сопротивления нагрузки на амплитудную характеристику усилителя.

Подключить мультиметр к нагрузке и измерить амплитудную характеристику повторителя в соответствии с методикой пункта 1.1.2 при сопротивлениях нагрузки $R_{H1} = 7,5$ кОм и $R_{H2} = 15$ кОм. Рекомендуемые уровни входного сигнала: 1, 2, 5, 10, 20, 50, 110, 200, 500 мВ.

6.3.5 Определить влияние сопротивления нагрузки на амплитудно-частотную характеристику повторителя.

6.3.6 Определить параметры амплитудно-частотных характеристик (K_0, f_H, f_B) с помощью характериографа из панели инструментов при сопротивлениях нагрузки $R_{H1} = 7,5$ кОм и $R_{H2} = 15$ кОм.

6.3.7 Измерить выходное сопротивление каскада. Установить значение входного сигнала $U_{BX} = 1$ мВ. Измерить значения напряжений на нагрузке U_{H1}, U_{H2} при сопротивлениях нагрузки $R_{H1} = 7,5$ кОм и $R_{H2} = 15$ кОм соответственно. Рассчитать выходное сопротивление каскада по формуле

$$R_{ВЫХ} = \frac{U_{H2} - U_{H1}}{\frac{U_{H1}}{R_{H1}} - \frac{U_{H2}}{R_{H2}}}.$$

6.3.8 Измерить дифференциальное входное сопротивление каскада. Установить сопротивление измерительного резистора $R1 = 2$ кОм и измерить значения напряжений на выходе источника сигнала E и на входе усилителя U_{BX} при $R_{H1} = 7,5$ кОм и $R_{H2} = 15$ кОм.

Рассчитать входные сопротивления каскада по формуле

$$R_{BX} = \frac{U_{BX}}{E - U_{BX}} R_1.$$

6.3.9 Измерить входное синфазное сопротивление каскада. Для этого отключить конденсатор $C4$, резисторы $R2$ и $R8$ от общего провода и подключить их к точке 1. Подключить мультиметр к нагрузке. Установить значение входного сигнала $U_{BX} = 1$ В. Установить сопротивление измерительного резистора $R1 = 10$ Ом. Определить напряжение на нагрузке U_{H1} . Исключить конденсаторы $C1$ и $C4$ из схемы. Определить напряжение на нагрузке U_{H2} . Рассчитать входное синфазное сопротивление каскада по формуле

$$R_{BX} = \frac{U_{H2}}{U_{H1} - U_{H2}} \cdot \Delta R1,$$

где $\Delta R_1 = 50 \cdot 10^3 - 1 \approx 50$ кОм.

6.3.10 Рассчитать синфазный коэффициент передачи по напряжению по формуле $K_C = \frac{U_{H1}}{U_{BX}}$.

6.3.11 Определить влияние несимметрии схемы на параметры каскада. Восстановить на экране исходную схему (см. рисунок 6.9). Установить сопротивление $R_8=30$ кОм. Повторить измерения по пунктам 6.3.3 – 6.3.10.

6.3.12 Определить влияние сопротивления в цепи эмиттеров на параметры каскада. Установить сопротивление резистора $R_8=100$ кОм, конденсатор C_2 из схемы исключить. Повторить измерения по пунктам 6.3.3 – 6.3.11.

Исследование ДУ с симметричным выходом

6.3.13 Восстановить на экране исходную схему (см. рисунок 6.9). Отключить сопротивление R_H и емкость C_H от общего провода и подключить освобожденные точки к коллектору транзистора VT_1 .

6.3.14 Повторить измерения по пунктам 6.3.3 – 6.3.12.

6.4 Контрольные вопросы

1 Почему коэффициент передачи ДК при несимметричном выходе в два раза меньше, чем у каскада с общим эмиттером?

2 Почему дифференциальное входное сопротивление ДК меньше, чем синфазное?

3 Каким образом можно осуществить симметрирование ДК?

4 Запишите выражения для дифференциального коэффициента передачи ДК с симметричным и несимметричным выходами.

5 Запишите выражение для синфазного коэффициента передачи ДК с симметричным и несимметричным выходами.

6 Изобразите принципиальную электрическую схему ДК с генератором тока в эмиттерных цепях при однополярном питании, несимметричном источнике сигнала и несимметричной нагрузке.

Лабораторная работа N7

ИССЛЕДОВАНИЕ БЕСТРАНСФОРМАТОРНОГО УСИЛИТЕЛЯ МОЩНОСТИ

Цель работы – изучить основные характеристики бестрансформаторных усилителей мощности на примере схемы с оконечным каскадом на квазикомплементарной паре транзисторов.

7.1 Краткие теоретические сведения

Бестрансформаторные схемы усилителей мощности получили наибольшее распространение в современной усилительной технике. Они широкополосны, обеспечивают малые нелинейные искажения сигнала, дают существенный выигрыш в габаритах, массе и более просты в исполнении по сравнению с трансформаторными схемами.

Принципы построения бестрансформаторных усилителей соответствуют требованиям интегральной технологии и широко используются в микросхемах.

Бестрансформаторный усилитель мощности содержит оконечный и предоконечный каскады, а также часто и входной усилительный каскад, охваченные общей отрицательной обратной связью как по постоянному, так и по переменному току.

Оконечный каскад выполняется обычно по двухтактной схеме, обеспечивающей работу транзистора в режиме *B* либо близком к нему *AB* с высоким КПД. Наиболее широко применяется каскад с параллельным возбуждением однофазным напряжением на комплементарной паре транзисторов *p-n-p*- и *r-n-r*-типа, включенных по схеме с общим коллектором. Вариант с двухполярным питанием (рисунок 7.1) позволяет подключить нагрузку к выходу каскада непосредственно. При однополярном питании нагрузка подключается через разделительную ёмкость C_p (рисунок 7.2).

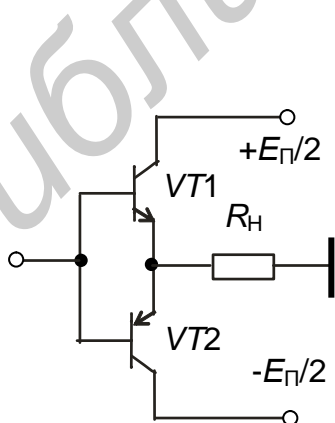


Рисунок 7.1 – Усилитель с двухполярным питанием

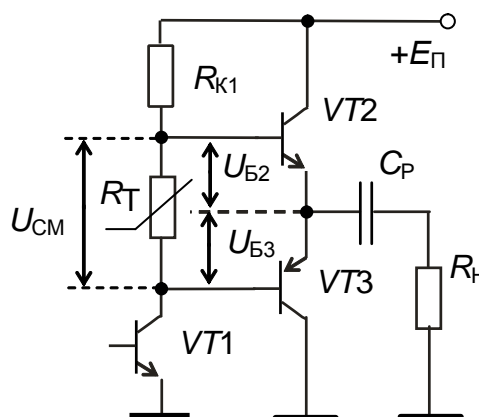


Рисунок 7.2 – Подача смещения при помощи терморезистора

Эта ёмкость одновременно является накопительной, обеспечивая за счет своего заряда работу транзистора $VT3$ в ту половину периода сигнала, когда транзистор $VT2$ закрыт.

Максимальная мощность, которую двухтактный каскад способен отдать в нагрузку при заданном напряжении питания E_0 и сопротивлении нагрузки R_H , равна

$$P_{H \max} = \frac{(E_0 - 2U_{OCT})^2}{8R_H}, \quad (7.1)$$

где $U_{OCT} = 1...2B$ – остаточное напряжение на открытом транзисторе выходного каскада.

Для возбуждения оконечного каскада используется обычный резистивный каскад на транзисторе, включенном по схеме с общим эмиттером и работающем в режиме A (см. рисунок 7.2). С целью уменьшения нелинейных искажений сигнала на базы транзисторов оконечного каскада подается напряжение смещения U_{CM} , задающее положение рабочей точки на сгибе входной характеристики транзисторов, что соответствует реальному режиму B либо режиму AB . Напряжение смещения U_{CM} образуется на резисторе R_T при прохождении по нему постоянной составляющей коллекторного тока транзистора $VT1$:

$$U_{CM} = U_{БЭ2} + U_{БЭ3} = I_{K1} \cdot R_T.$$

Для обеспечения стабильности положения рабочей точки при изменении температурного режима транзисторов оконечного каскада в качестве R_T применяют терморезистор с отрицательным температурным коэффициентом сопротивления, причем размещают его на радиаторах этих транзисторов. Лучшие результаты даёт использование в качестве элемента термостабилизации полупроводниковых приборов (рисунок 7.3).

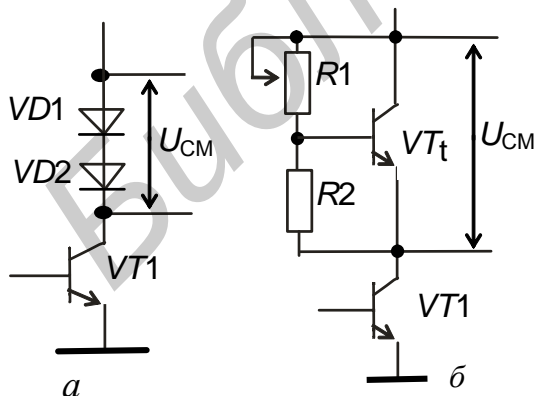


Рисунок 7.3 – Термостабилизация напряжения смещения

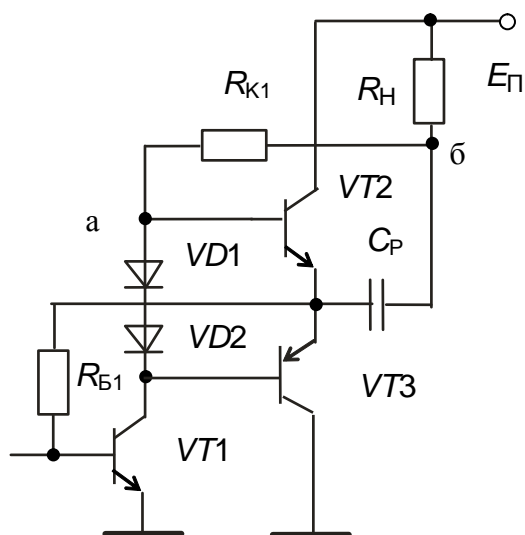


Рисунок 7.4 – Усилитель мощности с положительной обратной связью

В основе лежит температурная зависимость прямой ветви вольт-амперной характеристики р-п-перехода, которая характеризуется отрицательным температурным коэффициентом (около $-2,2 \text{ мВ}/^\circ\text{С}$ для кремниевых приборов) и позволяет в идеальном случае осуществить полную компенсацию температурного дрейфа тока покоя оконечных транзисторов

Кроме того, малое динамическое сопротивление открытого р-п-перехода обеспечивает одинаковые условия возбуждения транзисторов.

Требуемую величину U_{CM} получают, используя последовательное соединение диодов (рисунок 7.3, а) либо применяя схему с транзистором (рисунок 7.3, б), в которой

$$U_{CM} = U_{БЭТ} \cdot \left(1 + \frac{R_1}{R_2}\right) , \quad (7.2)$$

где $U_{БЭТ} = 0,6 \dots 0,7 \text{ В}$ – падение напряжения на переходе база–эмиттер транзистора VT_t .

Работа транзистора предоконечного каскада в режиме А с большой амплитудой сигнала (оконечный каскад не усиливает по напряжению) связана с большими затратами мощности и ухудшением линейности. Для исключения бесполезных потерь мощности на резисторе связи R_K используют решение, показанное на рисунке 7.4. Подключение R_K к выходу усилителя (точка «б») соответствует положительной обратной связи, охватывающей оконечный каскад. Так как мгновенные значения напряжения сигнала в точках «а» и «б» совпадают по фазе и близки по амплитуде, то переменная составляющая тока коллектора предоконечного каскада практически не протекает по резистору R_K . Это эквивалентно увеличению его сопротивления до значения

$$R_{K \text{ экв}} = \frac{R_K}{1 - K_{OK}} , \quad (7.3)$$

где $K_{OK} < 1$ – коэффициент усиления оконечного каскада по напряжению.

В результате нагрузкой каскада по сигналу являются непосредственно базовые цепи выходных транзисторов. Общая стабилизация режима усиления осуществляется гальванической ООС Y-типа, подаваемой на базу VT_1 через резистор R_B . Недостатком связи данного типа является существенное уменьшение входного сопротивления усилителя.

В усилителях большой мощности, а также при интегральном исполнении усилителя возникают трудности в подборе комплементарной пары мощных транзисторов оконечного каскада. В этих случаях используют составные транзисторы, образующие так называемую «квазикомплементарную пару» (рисунок 7.5).

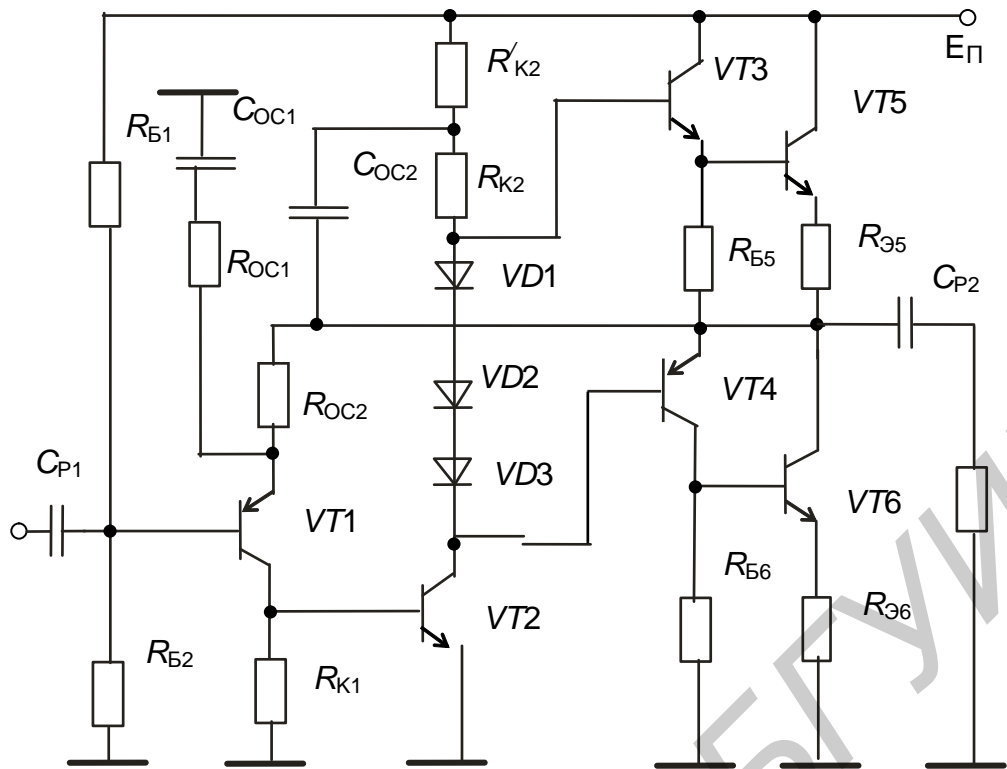


Рисунок 7.5 – Усилитель мощности с квазикомплементарной парой выходных транзисторов

Здесь ведущие маломощные транзисторы $VT3$ и $VT4$ – разной структуры, а ведомые мощные $VT5$ и $VT6$ – одинаковой структуры. В целом $VT3$ и $VT5$ образуют составной транзистор структуры $n-p-n$ -типа, а $VT4$ и $VT6$ – структуры $p-n-p$ -типа.

Резисторы R_{B5}, R_{B6} и $R_{Э5}, R_{Э6}$ улучшают частотные свойства составных транзисторов, снижают асимметрию плеч оконечного каскада при разбросе параметров транзисторов, а также повышают температурную стабильность режима. Эффективность их действия возрастает с увеличением $R_{Э5}, R_{Э6}$, однако при этом ухудшается КПД каскада. В схемах с низковольтным питанием (переносная аппаратура) эти резисторы, как правило, не ставятся.

Предоконечный каскад выполнен на транзисторе $VT2$. Для снижения потерь на резисторе связи R_{K2} он разделен на две части ($R_H \ll R_{K2} < R'_{K2}$) и в точку их соединения через конденсатор C_{OC2} подано напряжение положительной ОС с выхода усилителя. Принцип действия положительной ОС аналогичен схеме, представленной на рисунке 7.4, однако здесь исключено прохождение постоянной составляющей тока коллектора $VT2$ через нагрузку. В цепь общей ООС H -типа включен входной каскад на транзисторе $VT1$. Обратная связь по постоянному току здесь 100%-ная, что обеспечивает высокую стабильность режима схемы, а глубина ООС по переменному току, определяющая коэффициент усиления и входное сопротивление усилителя, задается соотношением резисторов R_{OC1} и R_{OC2} .

7.2.2 Изучить принципиальную схему исследуемого усилителя мощности, представленную на рисунке 7.7.

7.2.3 Выполнить энергетический расчёт оконечного каскада по следующим исходным данным:

– мощность, выделяемая в нагрузке, $P_H = 0.5 \dots 5$ Вт;*

– сопротивление нагрузки из ряда 2; 4; 8; 16 Ом;*

– остаточное напряжение на транзисторе выходного каскада – $U_{ост} = 1,5 \dots 2$ В.

Рассчитать :

– напряжение питания усилителя $E_{II} \geq 2(\sqrt{P_H \cdot R_H} + U_{ост})$;

– амплитуду выходного напряжения $U_{KM} = (E_{II}/2) - U_{ост}$;

– амплитуду выходного тока $I_{KM} = 2P_H / U_{KM}$;

– средний ток за период $I_0 = I_{KM} / \pi$;

– мощность, потребляемую от источника питания $P_0 = I_0 \cdot E_0$;

– мощность, рассеиваемую на коллекторе каждого транзистора выходного каскада $P_K = (P_0 - P_H) / 2$;

– максимальную мощность, рассеиваемую на коллекторе транзистора $P_{K \max} = E_{II}^2 / (4\pi^2 \cdot R_H)$;

– коэффициент полезного действия $\eta = P_H / P_0$;

*Примечание – Конкретные величины P_H и R_H задаются преподавателем каждой бригаде студентов.

7.3 Выполнение работы

7.3.1 Включить компьютер и запустить программу Electronic Workbench.

7.3.2 Изобразить на экране принципиальную схему повторителя, представленную на рисунке 7.7. Значения E_{II} и R_H установить в соответствии с результатами расчетов по подразделу 7.2. Между источником питания E_{II} и коллектором транзистора VT7 включить амперметр.

7.3.3 Изменяя сопротивление резистора R8, установить ток покоя в транзисторах VT7 и VT8, равный $\approx 0,04 \dots 0,06 I_0$. Значение I_0 определяется результатами расчетов по подразделу 7.2.

7.3.4 Соединить коллекторы транзисторов VT5 и VT7, а амперметр включить между источником питания E_{II} и схемой.

7.3.5 Используя мультиметр, определить постоянные напряжения в узлах принципиальной схемы (статический режим).

7.3.6 Определить зависимости параметров усилителя мощности от уровня входного сигнала.

Подключить к входу усилителя мультиметр, а к нагрузке – осциллограф. Определить значение напряжения $U_{BX \max}$, соответствующее появлению видимых искажений сигнала на выходе усилителя. Подключить мультиметр к

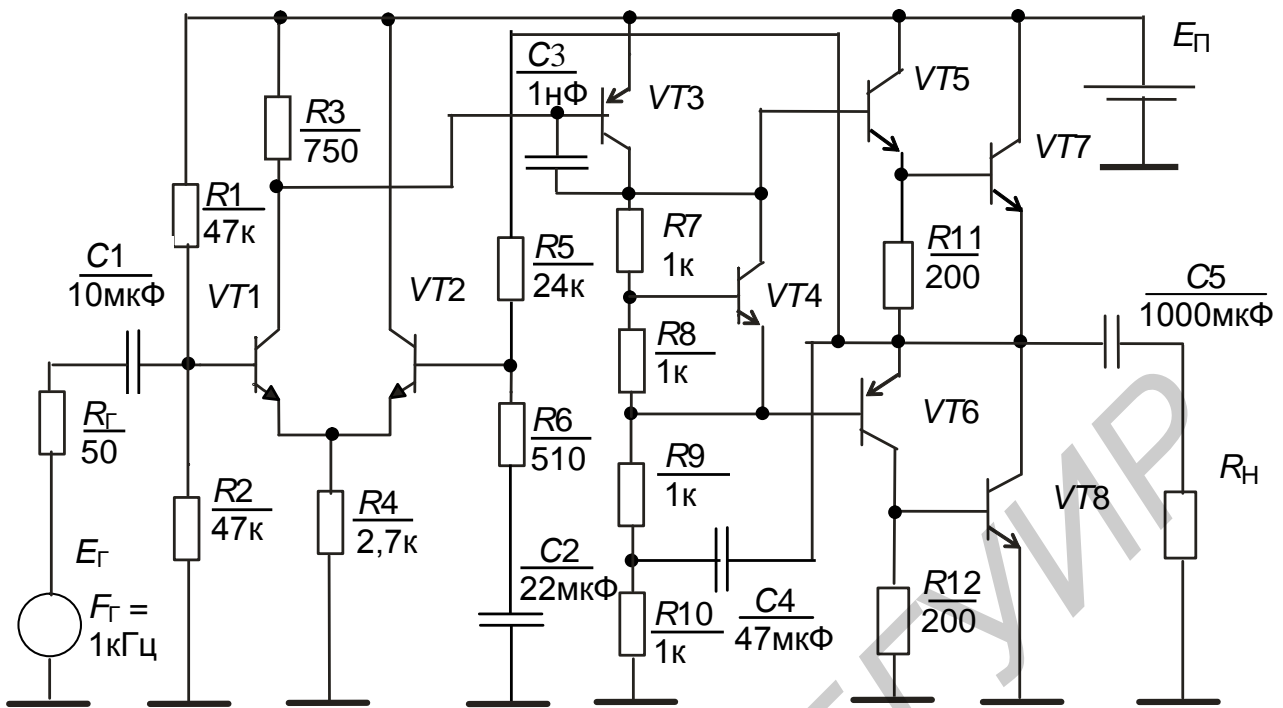


Рисунок 7.7 – Исследуемый усилитель мощности

нагрузке. Изменяя значение входного напряжения в пределах от $0,1 U_{BX \max}$ до $1,5 U_{BX \max}$, через $0,1 U_{BX \max}$ снять амплитудную характеристику $U_{ВЫХ} = f(U_{BX})$. Одновременно фиксировать значения потребляемого усилителем тока источника I_0 с помощью амперметра, включенного в соответствии с пунктом 7.3.4. По результатам измерений вычислить и занести в таблицу значения I_0 , P_H , P_0 , P_K для всех уровней входного сигнала. Построить графики зависимостей $U_{ВЫХ} = f(U_{BX})$, $I_0 = f(U_{BX})$, $P_H = f(U_{BX})$, $P_0 = f(U_{BX})$, $P_K = f(U_{BX})$. Сравнить расчетные и измеренные значения.

7.3.7 Определить зависимости параметров усилителя мощности от сопротивления нагрузки.

Установить сопротивление нагрузки $R_H = 20$ Ом. Подключить измерительные приборы в соответствии с пунктом 7.3.6. Определить значение напряжения $U_{BX \max}$, соответствующее появлению видимых искажений сигнала на выходе усилителя. Подключить мультиметр к нагрузке. Поддерживая значение входного сигнала $U_{BX} = U_{BX \max}$ последовательно устанавливать значения сопротивления нагрузки 16, 12, 8, 6, 4 Ом. Для каждого значения сопротивления определить уровень выходного сигнала $U_{ВЫХ}$ и значение потребляемого тока I_0 . Рассчитать значения P_H , P_0 , P_K , η . Занести данные в таблицу и построить графики $U_{ВЫХ} = f(R_H)$, $I_0 = f(R_H)$, $P_H = f(R_H)$, $P_0 = f(R_H)$, $P_K = f(R_H)$, $\eta = f(R_H)$.

7.3.8 Определить амплитудно-частотную характеристику усилителя.

С помощью характериографа определить параметры амплитудно-частотных характеристик (K_0 , f_H , f_B) при нагрузке 20, 16, 12, 8, 6, 4 Ом.

7.3.9 Определить влияние конденсатора C_4 на КПД каскада.

Исключить конденсатор C_4 из схемы. Установить расчетное значение сопротивления нагрузки. Установить значение напряжения $U_{BX \max}$. Определить значение напряжения на нагрузке $U_{ВЫХ}$ и ток, потребляемый усилителем. Включить в схему конденсатор C_4 . Определить значение напряжения на нагрузке $U_{ВЫХ}$ и ток, потребляемый усилителем. Рассчитать КПД для обоих случаев.

7.3.10 Определить зависимость коэффициента нелинейных искажений $K_{НИ}$ усилителя от уровня выходной мощности.

Установить значение сопротивления нагрузки, равное расчетному значению $R_H = R_{H \text{ PAC}}$. Подключить к нагрузке измеритель нелинейных искажений из панели инструментов. Изменяя значение входного напряжения в пределах от $0,2 U_{BX \max}$ до $1,4 U_{BX \max}$, через $0,2 U_{BX \max}$ определить $K_{НИ}$ на частоте 1кГц. Одновременно фиксировать значения $U_{ВЫХ}$.

7.3.11 Определить зависимость коэффициента нелинейных искажений $K_{НИ}$ усилителя от уровня выходной мощности при увеличенной глубине обратной связи.

Установить значение сопротивления резистора $R_6=2$ кОм. Повторить измерения коэффициента нелинейных искажений, устанавливая с помощью входного генератора уровни сигналов на нагрузке, приблизительно равные уровням $U_{ВЫХ}$ в пункте 7.3.10.

7.4 Контрольные вопросы

1 В каком режиме работают транзисторы в оконечных каскадах в бестрансформаторных усилителях мощности и почему?

2 С какой целью в бестрансформаторных усилителях мощности используются комплементарные пары транзисторов?

3 Какие способы стабилизации рабочей точки используются в бестрансформаторных усилителях мощности?

4 Зачем в таких усилителях используется коррекция амплитудно-частотной характеристики?

5 Как влияет положительная обратная связь на параметры усилителя? Почему эта связь не приводит к самовозбуждению усилителя?

6 Как устанавливается коэффициент передачи в бестрансформаторных усилителях мощности?

Литература

- 1 Попов, Э. Г. Основы аналоговой техники : учеб.-метод. пособие для студ. радиотех. спец. / Э. Г. Попов. – Минск : БГУИР, 2006. – 276 с.
- 2 Быстров, Ю. А. Электронные цепи и микросхемотехника : учебник для вузов / Ю. А. Быстров, И. Г. Мироненко. – М. : Высш. шк., 2002.
- 3 Ткаченко, Ф. А. Техническая электроника : учеб. пособие для вузов / Ф. А. Ткаченко. – Минск : Дизайн ПРО, 2000.
- 4 Нефедов, В. И. Основы радиоэлектроники : учебник для вузов / В. И. Нефедов. – М. : Высш. шк., 2000.
- 5 Гусев, В. Г. Электроника / В. Г. Гусев, Г. М. Гусев. – 2-е изд. – М. : Высш. шк., 1991.
- 6 Алексеев, А. Г. Усилительные устройства. Сборник задач и упражнений : учеб. пособие для вузов / А. Г. Алексеев, Г. В. Войшвилло, И. А. Трискало; под ред. Г. В. Войшвилло. – М. : Радио и связь, 1986.
- 7 Корис, Р. Справочник инженера-схемотехника / Р. Корис, Х. Шмидт-Вольтер. – М. : Техносфера, 2006. – 608 с.

Содержание

Лабораторная работа №1. Методика измерения основных параметров и характеристик устройств телекоммуникаций	3
Лабораторная работа №2. Исследование резисторного каскада предварительного усиления на биполярном транзисторе	11
Лабораторная работа №3. Исследование резисторного каскада предварительного усиления на полевом транзисторе.....	18
Лабораторная работа №4. Исследование эмиттерного повторителя	24
Лабораторная работа №5. Исследование истокового повторителя.....	31
Лабораторная работа №6. Исследование дифференциального каскада.....	37
Лабораторная работа №7. Исследование бестрансформаторного усилителя мощности	46
Литература.....	54

Учебное издание

Шатило Николай Иванович
Машара Георгий Георгиевич

**ФУНКЦИОНАЛЬНЫЕ УСТРОЙСТВА И ЭЛЕКТРОПИТАНИЕ
СИСТЕМ ТЕЛЕКОММУНИКАЦИЙ.
ЛАБОРАТОРНЫЙ ПРАКТИКУМ**

Учебно-методическое пособие
В 4-х частях
Часть 1

Редактор *Н. В. Гриневич*
Корректор *Е. Н. Батурчик*

Подписано в печать 14.12.2011. Формат 60×84 1/16. Бумага офсетная. Гарнитура «Таймс».
Отпечатано на ризографе. Усл. печ. л. 3,37. Уч.-изд. л. 3,3. Тираж 100 экз. Заказ 41.

Издатель и полиграфическое исполнение: учреждение образования
«Белорусский государственный университет информатики и радиоэлектроники»
ЛИ №02330/494371 от 16.02.2009. ЛП №02330/494175 от 03.04.2009.
220013, Минск, П. Бровки, 6