

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

Кафедра защиты информации

ФУНКЦИОНАЛЬНЫЕ УСТРОЙСТВА ТЕЛЕКОММУНИКАЦИЙ

Методические указания и контрольные задания
для студентов специальности I-45 01 03 «Сети телекоммуникаций»
заочной формы обучения

Минск 2008

УДК 621.375.4 (075.8)

ББК 32.846.2 я73

Ф 94

С о с т а в и т е л ь

Н. И. Шатило

Функциональные устройства телекоммуникаций : метод. указания Ф 94 и контр. задания для студ. спец. I-45 01 03 «Сети телекоммуникаций» заоч. формы обуч. – Минск : БГУИР, 2008. – 23с.: ил.

Данное издание включает указания по методике анализа и синтеза устройств апериодических усилителей телекоммуникационных систем, а также контрольные задания по расчету указанных устройств. Приведены основные расчетные соотношения и порядок выполнения заданий.

Издание может быть полезно также студентам дневной формы обучения.

УДК 621.375.4 (075.8)

ББК 32.846.2 я73

© Шатило Н. И., составление, 2008
© УО «Белорусский государственный университет информатики и радиоэлектроники», 2008

1 Методические указания по выполнению контрольных заданий

Приступать к выполнению контрольных заданий следует только после изучения в полном объеме теоретического материала по данной дисциплине. Основными пособиями для выполнения контрольных заданий являются настоящие методические указания (разделы 2 и 3), учебник [1] и учебное пособие [2]. В качестве дополнительной литературы могут быть использованы источники, указанные в рабочей программе дисциплины. Задания заключаются в решении задач анализа и синтеза аналоговых электронных усилителей (АЭУ).

Варианты заданий определяются следующим образом. В первом задании номер варианта принципиальной схемы усилителя, подлежащей расчету, соответствует последней цифре номера зачетной книжки. Для определения варианта второго задания суммируются последняя и предпоследняя цифры номера зачетной книжки и последняя цифра суммы указывает номер варианта принципиальной схемы. Тип транзистора соответствует последней цифре номера зачетной книжки.

Первое контрольное задание посвящено синтезу резистивного усилительного каскада АЭУ, работающего на входную цепь следующего аналогичного каскада с тем же транзистором. Транзисторы должны быть включены по схеме с общим эмиттером (ОЭ) и иметь эмиттерную стабилизацию тока покоя.

В пределах первого контрольного задания требуется :

- 1) изобразить полную принципиальную схему предварительного каскада с элементами связи с источником сигнала и последующим каскадом;
- 2) выбрать тип транзистора исходя из заданного режима его работы и частоты верхнего среза усилителя f_B ;
- 3) рассчитать элементы эмиттерной стабилизации тока покоя транзистора;
- 4) распределить частотные искажения в области нижних частот M_H между элементами схемы и определить номиналы емкостей разделительных конденсаторов и заблокированного конденсатора в цепи эмиттера;
- 5) определить в области средних частот коэффициенты передачи каскада по напряжению K_U , сквозной K_E , по току K_I , по мощности K_P , входное R_{BX} и выходное $R_{ВЫХ}$ сопротивления, оценить уровень выходного напряжения при заданной ЭДС входного сигнала E_{BX} ;
- б) определить частоту верхнего среза f_B , оценить частотные искажения в области верхних частот M_B и сравнить их с заданными M .

Исходные данные для расчета первого задания приведены в таблице 2.1.

Второе контрольное задание посвящено расчету основных параметров усилительных устройств (задача анализа).

Во втором контрольном задании требуется :

- 1) изобразить полную принципиальную схему анализируемого каскада из таблицы 2.1, подключив к ней источник сигнала и нагрузку;
- 2) рассчитать режим работы транзисторов по постоянному току;
- 3) по результатам расчетов статического режима и справочным данным определить параметры малосигнальных моделей транзисторов;
- 4) определить коэффициент передачи усилителя по напряжению K_U , сквозной коэффициент передачи по напряжению K_E , входное $R_{ВХ}$ и выходное $R_{ВЫХ}$ сопротивления, оценить уровень выходного напряжения при заданной ЭДС $E_{Г}$ входного сигнала в области средних частот.
- 5) определить частоты нижнего и верхнего среза амплитудно-частотной характеристики.

Исходные данные для расчета второго задания приведены в таблицах 3.1 и 3.2.

2 Порядок выполнения первого контрольного задания

Выписывают согласно своему варианту из таблицы 2.1 исходные данные для расчета: напряжение источника питания $E_{П}$, ток коллектора $I_{0К}$ и напряжение коллектор-эмиттер $U_{0КЭ}$ в рабочей точке, ЭДС $E_{Г}$ и внутреннее сопротивление $R_{Г}$ источника сигнала, нижнюю $f_{Н}$ и верхнюю $f_{В}$ рабочие частоты рассчитываемого каскада, частотные искажения $M = M_{Н} = M_{В}$ на нижних и верхних частотах рабочего диапазона, граничные значения диапазона температур окружающей среды – минимальное $t_{СМИН}$ и максимальное $t_{СМАКС}$ соответственно.

Исходя из заданных параметров $E_{П}$, $I_{0К}$, $f_{В}$, по справочнику [3] выбирают тип транзистора и выписывают его параметры: минимальное и максимальное значения коэффициента передачи тока $h_{21ЭМИН}$, $h_{21ЭМАКС}$, емкость коллекторного перехода $C_{К}$, постоянную времени коллекторного перехода $t_{К}$, модуль коэффициента передачи тока $|h_{21Э}|$ на определенной (высокой) частоте $f_{ИЗМ}$, обратный ток коллектора $I_{КБ0}$, тепловое сопротивление переход-среда $R_{ПС}$ (если оно приведено). Значения параметров приводятся с указанием режима их измерения.

Рассчитывают параметры малосигнальной модели биполярного транзистора [1].

Среднее значение коэффициента передачи тока равно

$$h_{21Э} = \sqrt{h_{21ЭМИН} h_{21ЭМАКС}} \cdot \quad (2.1)$$

Таблица 2.1– Исходные данные для выполнения первого контрольного задания

Номер варианта	0	1	2	3	4	5	6	7	8	9
$E_n, В$	15	9	12	10	9	16	12	16	9	10
$I_{OK}, мА$	5	10	6	8	12	4	15	3	20	7
$U_{OKЭ}, В$	9	5	4	6	4	10	5	8	3	5
$E_{Г}, мВ$	300	80	250	130	50	360	150	100	180	200
$R_{Г}, кОм$	5	0,5	0,8	1	0,6	6	2	1,5	0,3	3
$f_H, Гц$	30	20	50	40	120	100	90	63	25	80
$f_B, кГц$	12	9	15	8	10	18	14	20	16	13
$M, дБ$	2,8	1,4	2	1,8	1	1,6	1,5	2,4	3	0,9
$t_{с мин}, °С$	5	-10	10	-5	0	5	-5	-10	10	-5
$t_{с макс}, °С$	55	40	55	45	35	50	35	45	30	40

Выходная проводимость определяется как

$$h_{22Э} = \frac{I_{OK}}{U_A}. \quad (2.2)$$

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

Предельная частота усиления транзистора по току в схеме с ОЭ $f_{h_{21Э}}$ определяется по единичной частоте усиления f_T :

$$f_{h_{21Э}} = \frac{f_T}{h_{21Э}}. \quad (2.3)$$

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

$$f_T = |h_{21Э}| \cdot f_{ИЗМ}. \quad (2.4)$$

Объемное сопротивление области базы r_B можно определить из постоянной времени t_K коллекторного перехода транзистора, приводимой в справочниках:

$$r_B = \frac{t_K}{C_K}. \quad (2.5)$$

Здесь C_K – емкость коллектора транзистора при измерении t_K .

Дифференциальное сопротивление эмиттерного перехода $r_{BЭ}$ определяется по формуле

$$r_{B'\text{Э}} = r_{\text{Э}} \cdot (h_{21\text{Э}} + 1) = \frac{mj_T}{I_{0K}} (h_{21\text{Э}} + 1), \quad (2.6)$$

где $r_{\text{Э}} = \frac{mj_T}{I_{0K}}$ – дифференциальное сопротивление эмиттера;

$j_T \approx 0,026$ мВ – температурный потенциал при $T = 300$ К;

m – поправочный коэффициент, принимаемый примерно равным 1 и 1,5 соответственно для германиевых и кремниевых транзисторов.

Входное сопротивление транзистора:

$$h_{11\text{Э}} = r_B + r_{B'\text{Э}}. \quad (2.7)$$

Емкость эмиттерного перехода равна:

$$C_{B'\text{Э}} = \frac{I}{2p \times f_{h_{21\text{Э}}} \times r_{B'\text{Э}}}. \quad (2.8)$$

Проводимость прямой передачи:

$$Y_{21\text{Э}} = \frac{h_{21\text{Э}}}{h_{11\text{Э}}}. \quad (2.9)$$

Рассчитывают параметры эквивалентной схемы биполярного транзистора по дрейфу [1].

Минимальная температура перехода транзистора

$$t_{\text{ПМИН}} = t_{\text{СМИН}} + R_{\text{ПС}} P_K, \quad (2.10)$$

где P_K – мощность, рассеиваемая на коллекторе транзистора;

$$P_K = U_{0K\text{Э}} \cdot I_{0K}. \quad (2.11)$$

При отсутствии в справочнике сведений о тепловом сопротивлении переход–среда выбранного транзистора задаться величиной в пределах от 0,3 до 0,7 [°С/мВт].

Максимальная рабочая температура перехода:

$$t_{\text{ПМИН}} = t_{\text{СМАКС}} + R_{\text{ПС}} P_K. \quad (2.12)$$

Значение параметра $h'_{21\text{Э}}$ транзистора при минимальной температуре перехода:

$$h'_{21\text{Э}} = (0,8h_{21\text{ЭМИН}} + 0,2h_{21\text{ЭМАКС}}) \left(1 - \frac{25^0 - t_{\text{ПМАКС}}}{500} \right). \quad (2.13)$$

Значение параметра $h''_{21\text{Э}}$ транзистора при максимальной рабочей температуре перехода:

$$h''_{21\text{Э}} = (0,2h_{21\text{ЭМИН}} + 0,8h_{21\text{ЭМАКС}}) \left(1 + \frac{t_{\text{ПМАКС}} - 25^0}{275} \right). \quad (2.14)$$

Изменение параметра $\Delta h_{21\text{Э}}$ в диапазоне температур:

$$\Delta h_{21Э} = h'_{21Э} - h''_{21Э}. \quad (2.15)$$

Изменение обратного тока коллектора в диапазоне температур:

$$\Delta I_{КБ0} \approx I_{КБ0} \cdot 10^{\alpha(t_{П\text{МАКС}}^0 - 25^0)}, \quad (2.16)$$

где α – коэффициент, принимаемый для кремниевых транзисторов в интервале 0,02 – 0,025, а для германиевых – 0,03– 0,035.

Эквивалентное изменение тока в цепи базы в диапазоне температур:

$$\Delta I_0 = \Delta I_{КБ0} + \frac{\Delta h_{21Э} \cdot I_{0К}}{h_{21Э}^2}. \quad (2.17)$$

Эквивалентное изменение напряжения в цепи базы, вызванное изменением температуры окружающей среды:

$$\Delta U_0 = [2,2 \cdot 10^{-3}(t_{С\text{МАКС}} - t_{С\text{МИН}}) + 0,04]. \quad (2.18)$$

Составляют принципиальную электрическую схему каскада с ОЭ с указанием источника сигнала, источника питания и нагрузки (входной цепи следующего каскада, аналогичного рассчитываемому).

Задаются падением напряжением на сопротивлении $R_{Э}$ в цепи эмиттера транзистора из условия

$$U_{R_{Э}} = (0,1 - 0,3)E_{П} \quad (2.19)$$

и определяют сопротивление этого резистора:

$$R_{Э} = \frac{U_{R_{Э}}}{I_{0К}}, \quad (2.20)$$

а также сопротивление резистора в цепи коллектора:

$$R_{К} = \frac{E_{П} - U_{0К} - U_{R_{Э}}}{I_{0К}}, \quad (2.21)$$

округляя их значения до ближайших стандартных.

Задаются допустимым изменением тока коллектора в диапазоне температур из условия

$$\Delta I_{0К} = (0,1 \dots 0,5)I_{0К}. \quad (2.22)$$

При этом необходимо учитывать, что меньшее значение изменения этого тока приводит к увеличению тока, потребляемого резистивным делителем в цепи базы, к снижению входного сопротивления и ухудшению КПД каскада.

Исходя из требуемой стабилизации тока покоя каскада, определяют эквивалентное сопротивление в цепи базы транзистора:

$$R_{Б} = \frac{\Delta I_{0К} [h_{21Э} + R_{Э}(h_{21Э} + 1)] - (\Delta U_0 + \Delta I_0 R_{Э})h_{21Э}}{\Delta I_0 h_{21Э} - \Delta I_{0К}}. \quad (2.23)$$

Рассчитывают ток базы в рабочей точке:

$$I_{0Б} = \frac{I_{0К}}{h_{21Э}}, \quad (2.24)$$

и по входной характеристике $I_B = f(U_{БЭ})$ при $U_{0КЭ} = const$ определяют напряжение база–эмиттер транзистора в рабочей точке $U_{0БЭ}$. При отсутствии такой характеристики этим напряжением можно задаться в интервале 0,5– 0,7 В для кремниевых транзисторов и 0,3– 0,4 В для германиевых транзисторов.

Напряжение на нижнем плече резистивного делителя в цепи базы:

$$U_{R_{Б2}} = U_{R_{Э}} + U_{0Б}. \quad (2.25)$$

Сопротивление верхнего плеча резистивного делителя в цепи базы:

$$R_{Б1} = \frac{E_{П} R_{Б}}{I_{0Б} R_{Б} + U_{R_{Б2}}}. \quad (2.26)$$

Сопротивление нижнего плеча делителя в цепи базы:

$$R_{Б2} = \frac{R_{Б1} R_{Б}}{R_{Б1} - R_{Б}}. \quad (2.27)$$

Полученные значения округляют до ближайших стандартных величин.

Входные сопротивления рассчитываемого $R_{ВХ}$ и последующего $R_{ВХ2} = R_{Н}$ каскадов:

$$R_{ВХ1} = R_{Н} = \frac{h_{21Э} R_{Б}}{h_{21Э} + R_{Б}}. \quad (2.28)$$

Выходное сопротивление каскада:

$$R_{ВЫХ} = \frac{1}{h_{22Э} + \frac{1}{R_{К}}} = \frac{R_{К}}{h_{22Э} R_{К} + 1}. \quad (2.29)$$

Определяют емкости разделительных (C_{P1} и C_{P2}) и блокировочного ($C_{Э}$) конденсаторов. Эти конденсаторы вносят частотные искажения в области нижних частот примерно в равной степени. В связи с этим заданные на каскад частотные искажения $M_{Н}$ (дБ) в децибелах целесообразно распределить поровну между данными элементами:

$$M_{Н} \text{ (дБ)} = M_{НСП1} \text{ (дБ)} + M_{НСП2} \text{ (дБ)} + M_{НСЭ} \text{ (дБ)}.$$

В расчетных формулах используются значения искажений в относительных единицах:

$$M_{Н} = 10^{\frac{M_{Н} \text{ (дБ)}}{20}}. \quad (2.30)$$

Ёмкость первого разделительного конденсатора:

$$C_{P1} = \frac{1}{2p \cdot f_{Н} (R_{Г} + R_{ВХ}) \sqrt{M_{НСП1}^2 - 1}}. \quad (2.31)$$

Ёмкость второго разделительного конденсатора:

$$C_{P2} = \frac{1}{2p \cdot f_H (R_{BЫX} + R_H) \sqrt{M_{HCP2}^2 - 1}}. \quad (2.32)$$

Емкость блокировочного конденсатора в цепи эмиттера:

$$C_{Э} = \frac{1}{2p f_H R_{Э}} \sqrt{\frac{M_0^2 - M_{HCP2}^2}{M_{HCP2}^2 - 1}}, \quad (2.33)$$

где

$$M_0 = 1 + \frac{R_{Э}(h_{21Э} + 1)}{R_{Г} + R_{BХ1}}. \quad (2.34)$$

Получаемые расчетные величины емкостей конденсаторов округляют в большую сторону до ближайших стандартных номиналов.

Сопrotивление нагрузки каскада по переменному току:

$$R_{H\sim} = \frac{R_K R_H}{R_K + R_H}. \quad (2.35)$$

Коэффициент передачи каскада по напряжению:

$$K_U = \frac{Y_{21Э}}{h_{22Э} + \frac{1}{R_{H\sim}}} = \frac{Y_{21Э} R_{H\sim}}{h_{22Э} R_{H\sim} + 1} \gg Y_{21Э} R_{H\sim}. \quad (2.36)$$

Сквозной коэффициент передачи по напряжению:

$$K_E = \frac{K_U}{1 + R_{Г}/R_{BХ1}}. \quad (2.37)$$

Выходное напряжение каскада:

$$U_{BЫX} = E_{Г} K_E < U_{0KЭ}. \quad (2.38)$$

В случае если не будет выполняться это неравенство, т.е. $U_{BЫX} > U_{0KЭ}$, то необходимо уменьшить величину $E_{Г}$, уточнив тем самым исходные данные по данному параметру.

Коэффициент передачи тока:

$$K_i = K_U \frac{R_{BХ1}}{R_H}. \quad (2.39)$$

Коэффициент передачи мощности:

$$K_P = K_U K_I. \quad (2.40)$$

Верхняя граничная частота каскада определяется по формуле

$$f_B = \frac{1}{2pt_B}, \quad (2.41)$$

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

Постоянную времени t_B можно определить из выражения

$$t_B = \sqrt{t_{B1}^2 + t_{B2}^2}, \quad (2.42)$$

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

Эти постоянные времени определяются по формулам

$$t_{B1} = C_0 \frac{R_{\Gamma} \cdot R_{BX}}{R_{\Gamma} + R_{BX}}, \quad (2.43)$$

$$t_{B2} = C_H \frac{R_H \cdot R_{BЫX}}{R_H + R_{BЫX}}, \quad (2.44)$$

где C_0 – эквивалентная входная емкость каскада,

C_H – емкость нагрузки.

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

$$C_0 = C_{B'Э} + C_K (1 + K_U). \quad (2.45)$$

Определяют частотные искажения в области верхних частот

$$M_B (\text{дБ}) = 10 \lg \left[1 + \left(\frac{f_C}{f_B} \right)^2 \right] \quad (2.46)$$

и сравнивают их с заданным значением M . В случае невыполнения условия $M_B (\text{дБ}) \leq M (\text{дБ})$ необходимо заменить транзистор на более высокочастотный и произвести расчет заново, или применить высокочастотную коррекцию АЧХ, или ввести в каскад ООС глубиной

$$F = \frac{M_B}{M} \quad (2.47)$$

путем использования полного резистора в цепи эмиттера $R_{Э}$ или его части $R_{Э}^*$, не зашунтированного конденсатором $C_{Э}$, величину которого рассчитывают по формуле

$$R_{Э}^* = \frac{h_{11Э} + \frac{R_K R_B}{R_K + R_B}}{h_{21Э} + 1} (F - 1). \quad (2.48)$$

Такая ООС в F раз снизит частотные искажения и в области нижних частот, а также снизит коэффициент передачи каскада и в несколько меньшее число раз (из-за невыполнения режима идеального короткого замыкания по входу и выходу каскада) реально повысит входное и выходное сопротивления каскада.

При этом входное сопротивление транзистора (2.7) с последовательной по току ООС

$$h_{11Э}^* = h_{11Э} + R_{Э}^* (h_{21Э} + 1). \quad (2.49)$$

Проводимость прямой передачи (2.10) с ООС:

$$Y_{219}^* = \frac{Y_{219} h_{119}}{h_{119} + R_3^* (h_{219} + 1)} \quad (2.50)$$

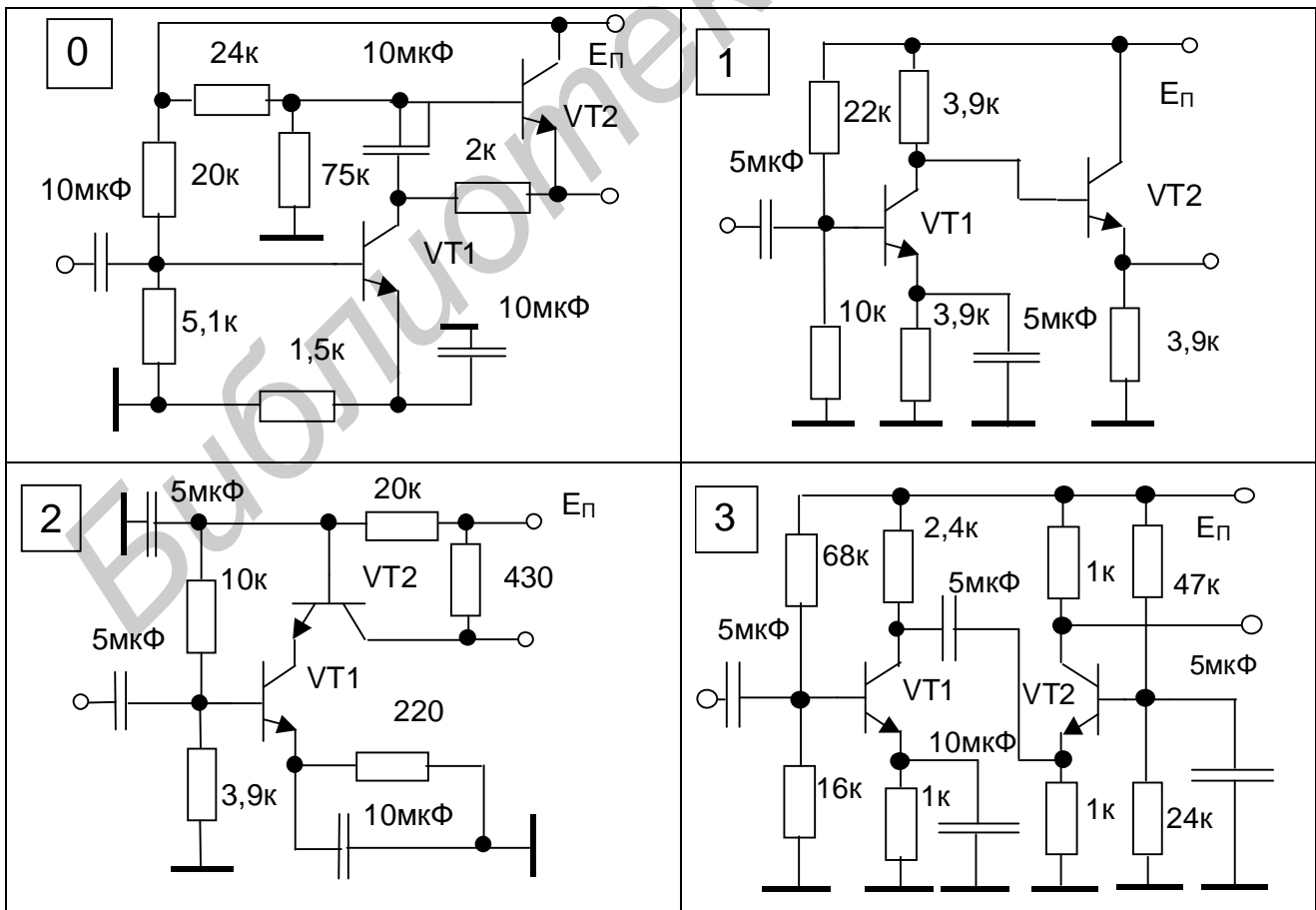
С учетом новых значений параметров транзистора (2.49) и (2.50) можно при желании уточнить выполненные выше расчеты прежде всего тех показателей каскада, в расчетных формулах которых данные параметры содержатся.

3 Порядок выполнения второго контрольного задания

Изобразить полную принципиальную схему анализируемого каскада из таблицы 3.1, подключив к ней источник сигнала и нагрузку.

Источник сигнала представляет источник переменной ЭДС с амплитудой $E_T = 1\text{ мВ}$, частотой $f = 10\text{ кГц}$ и внутренним сопротивлением $R_T = 1\text{ кОм}$. Нагрузка состоит из параллельно включенных резистора $R_H = 1\text{ кОм}$ и конденсатора $C_H = 100\text{ пФ}$. Нагрузка подключается к выходу усилителя через разделительный конденсатор $C_P = 10\text{ мкФ}$. Указать на схеме позиционные обозначения всех элементов и их номинальные значения, например $\frac{R1}{10\text{к}}, \frac{C3}{5\text{мкФ}}$.

Таблица 3.1 – Принципиальные схемы усилителей



Продолжение таблицы 3.1

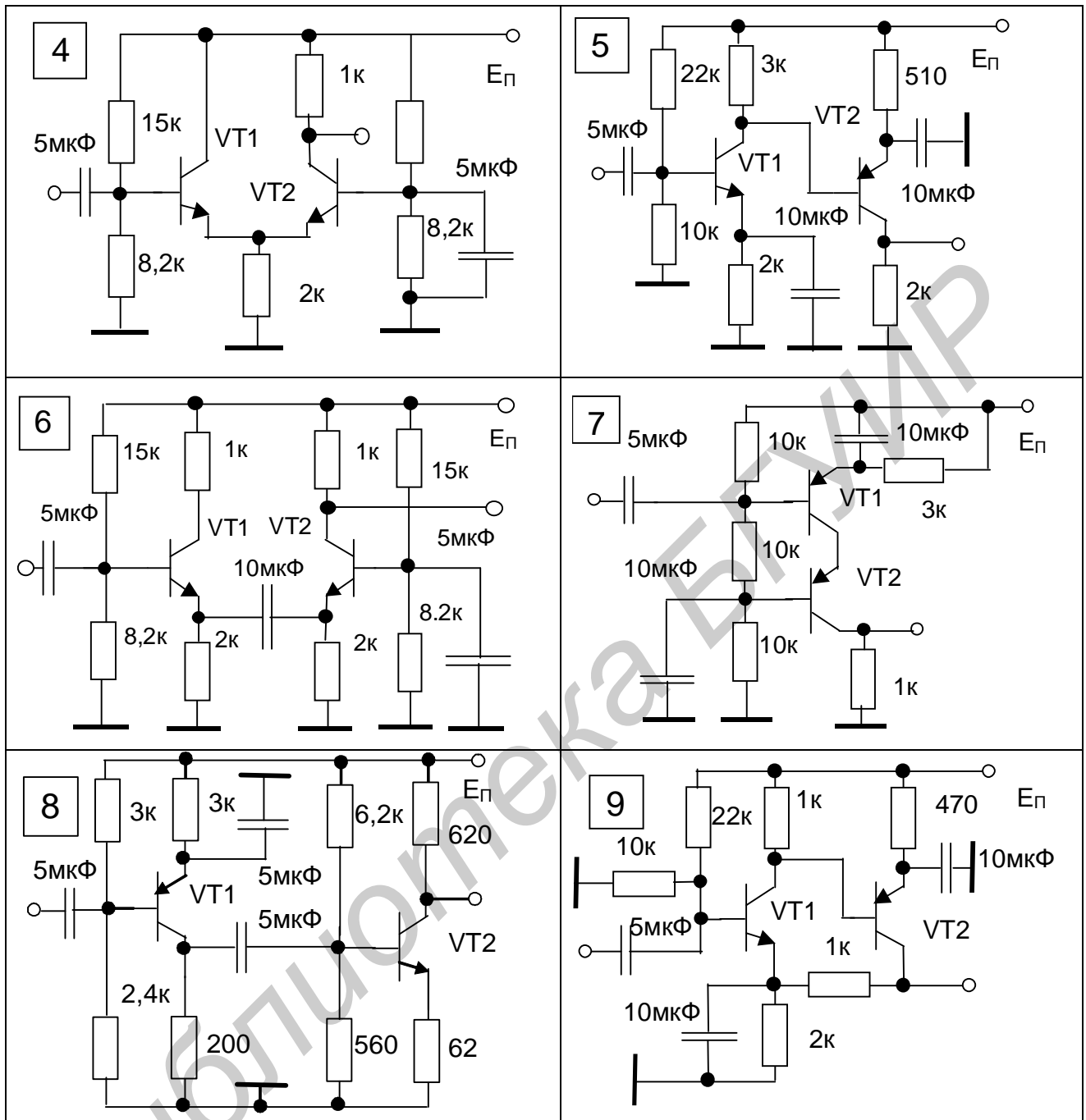


Таблица 3.2 – Типы используемых транзисторов

Номер варианта	0	1	2	3	4
Транзистор n-p-n	КТ315А	КТ315В	КТ3102А	КТ316А	КТ355А
Транзистор p-n-p	КТ361А	КТ361В	КТ3107А	КТ363А	КТ363Б

Продолжение таблицы 3.2

Номер варианта	5	6	7	8	9
Транзистор n-p-n	КТ316Б	КТ325Б	КТ3108А	КТ3127А	КТ3102А
Транзистор p-n-p	КТ363Б	КТ363В	КТ3107В	КТ3126А	КТ3126А

Расчет схемы по постоянному току проводится в следующем порядке.
 Рассчитать ток делителя в базовых цепях транзисторов:

$$I_D = \frac{E_{II}}{\Sigma R}. \quad (3.1)$$

Здесь ΣR – сумма сопротивлений последовательно включенных резисторов в базовой цепи.

Определить потенциалы баз транзисторов по формуле

$$U_{0B} = I_D \times R_{B2}, \quad (3.2)$$

где R_{B2} – суммарное сопротивление резисторов, включенных между базой и общим проводом.

Найти потенциалы эмиттеров транзисторов по формуле

$$U_{0Э} = U_{0B} - U_{0БЭ}. \quad (3.3)$$

Напряжение $U_{0БЭ}$ выбирается в интервале 0,5...0,7 В для кремниевых транзисторов и 0,3...0,4 В для германиевых транзисторов.

Рассчитать ток в резисторе, подключенном к эмиттеру транзистора:

$$I_{RЭ} = \frac{U_{0Э}}{RЭ}, \quad (3.4)$$

где $RЭ$ – сопротивление в цепи эмиттера.

Рассчитать ток коллектора в рабочей точке:

$$I_{0K} = I_{RЭ} \frac{h^{21Э}}{1 + h_{21Э}}. \quad (3.5)$$

Определить напряжение на коллекторе в рабочей точке

$$U_{0K} = E_{II} - I_{0K} \cdot R_K. \quad (3.6)$$

Если в схеме имеются обратные связи по постоянному току, то составляются системы уравнений, связывающие базовые (или коллекторные) токи входного и оконечного каскадов. Решив систему уравнений, находят значения этих токов. По значениям токов рассчитываются потенциалы электродов транзисторов.

По результатам расчета статического режима определяются параметры моделей первого и второго транзисторов по формулам (2.1) – (2.9).

Используя соотношения, приведенные в таблицах 3.3 – 3.5, определяют коэффициент передачи по напряжению, входное и выходное сопротивление оконечного каскада.

По тем же соотношениям определяют коэффициент передачи по напряжению, сквозной коэффициент передачи по напряжению, входное и выходное сопротивления входного каскада. При этом необходимо учитывать, что нагрузкой входного каскада является входное сопротивление окончного каскада.

Коэффициент передачи по напряжению всего усилителя определяется по формуле

$$K_U = K_{U1} \cdot K_{U2}, \quad (3.7)$$

где K_{U1} и K_{U2} – коэффициенты передачи по напряжению входного и окончного каскада соответственно.

Сквозной коэффициент передачи по напряжению K_E всего усилителя определяется аналогично:

$$K_E = K_{E1} \times K_{U2}, \quad (3.8)$$

где K_{E1} – сквозной коэффициент передачи по напряжению входного каскада;

K_{U2} – коэффициент передачи по напряжению окончного каскада.

Входное сопротивление усилителя определяется входным сопротивлением входного каскада, а выходное – выходным сопротивлением окончного каскада.

Нижняя и верхняя граничные частоты определяются по формулам, приведенным в таблицах 3.6 и 3.7.

Таблица 3.3 – Расчетные соотношения для схемы с общим эмиттером

Параметр	Расчетное соотношение
Входное сопротивление транзистора	$h_{11Э} = r_B + r_{B'Э}$
Входное сопротивление каскада	$R_{BX} = \frac{h_{11Э} R_B}{h_{11Э} + R_B}$, где $R_B = R_{B1} \parallel R_{B2}$ – сопротивление делителя в цепи базы
Выходное сопротивление каскада	$R_{ВЫХ} = \frac{R_K}{h_{22Э} R_K + 1}$
Сопротивление нагрузки каскада по переменному току	$R_{H \sim} = \frac{R_{ВЫХ} R_H}{R_{ВЫХ} + R_H}$
Коэффициент передачи каскада по напряжению	$K_U = \frac{h_{21Э} R_{H \sim}}{h_{11Э}}$

Продолжение таблицы 3.3

Параметр	Расчетное соотношение
Сквозной коэффициент передачи по напряжению	$K_E = \frac{K_U}{1 + R_\Gamma / R_{BX}}$

Таблица 3.4 – Расчетные соотношения для схемы с общей базой

Параметр	Расчетное соотношение
Входное сопротивление транзистора	$h_{11B} = r_\varepsilon + r_B / (1 + h_{21\varepsilon})$
Входное сопротивление каскада	$R_{BX} = \frac{h_{11B} R_\varepsilon}{h_{11B} + R_\varepsilon}$
Выходное сопротивление каскада	$R_{BЫX} \approx R_K$
Сопротивление нагрузки каскада по переменному току	$R_{H\sim} = \frac{R_{BЫX} R_H}{R_{BЫX} + R_H}$
Коэффициент передачи каскада по напряжению	$K_U = \frac{h_{21\varepsilon} R_{H\sim}}{h_{11B} \cdot (1 + h_{21\varepsilon})}$
Сквозной коэффициент передачи по напряжению	$K_E = \frac{K_U}{1 + R_\Gamma / R_{BX}}$

Таблица 3.5 – Расчетные соотношения для схемы с общим коллектором

Параметр	Расчетное соотношение
Входное сопротивление транзистора	$h_{11K} = (r_\varepsilon + R_{H\sim}) \cdot (1 + h_{21\varepsilon})$
Входное сопротивление каскада	$R_{BX} = \frac{h_{11K} R_B}{h_{11K} + R_B}$
Выходное сопротивление каскада	$R_{BЫX} = r_\varepsilon + (r_\delta + R'_\Gamma) / (1 + h_{21\varepsilon}),$ где $R'_\Gamma = R_\Gamma \parallel R_B$ – эквивалентное сопротивление генератора
Сопротивление нагрузки каскада по переменному току	$R_{H\sim} = \frac{R_\varepsilon R_H}{R_\varepsilon + R_H}$
Коэффициент передачи каскада по напряжению	$K_U = \frac{R_{H\sim}}{r_\varepsilon + R_{H\sim}}$
Сквозной коэффициент передачи по напряжению	$K_E = \frac{K_U}{1 + R_\Gamma / R_{BX}}$

Таблица 3.6 – Расчетные соотношения для определения нижней и верхней частоты среза каскада

Параметр	Расчетное соотношение
Нижняя частота среза	$f_H = \frac{1}{2pt_H},$ <p>где t_H – эквивалентная постоянная времени каскада в области нижних частот</p>
Эквивалентная постоянная времени каскада в области нижних частот	$t_H = 1 / \sqrt{\sum_{i=1}^n (1/t_{Hi})^2 + \sum_{j=1}^m (1/t_{Hj})^2},$ <p>где t_{Hi} и t_{Hj} – эквивалентные постоянные времени каскада в области нижних частот связанные с i-м разделительным и j-м блокировочным и конденсаторами соответственно</p>
Постоянная времени, связанная с i -м разделительным конденсатором	$t_{Hi} = C_{Pi}(R_{Gi} + R_{BXi}),$ <p>где C_{Pi} – значение емкости i-го разделительного конденсатора, R_{Gi} – внутреннее сопротивление цепи, являющейся источником сигнала, R_{BXi} – сопротивление цепи, являющейся приемником сигнала</p>
Постоянная времени, связанная с j -м блокировочным конденсатором	$t_{Hj} = C_{БЛj} \cdot R_j,$ <p>где $C_{БЛj}$ – значение емкости j-го блокировочного конденсатора, R_j – эквивалентное сопротивление цепи, включенной параллельно j-му блокировочному конденсатору</p>
Верхняя частота среза	$f_B = \frac{1}{2pt_B},$
Эквивалентная постоянная времени каскада в области верхних частот	$t_B = \sqrt{\sum_{i=1}^n t_{Bi}^2},$ <p>где t_{Bi} – постоянная времени в области верхних частот i-й цепи каскада</p>

Продолжение таблицы 3.6

Параметр	Расчетное соотношение
Постоянная времени в области верхних частот i -й цепи каскада	$t_{Bi} = C_i \cdot R_i,$ <p>где C_i – емкость i-го узла относительно общего провода, R_i – эквивалентное сопротивление i-го узла относительно общего провода</p>

Таблица 3.7 – Расчетные соотношения для определения емкостей усилительных каскадов

Параметр	Расчетное соотношение
Входная емкость транзистора в схеме с общей базой	$C_{B'\text{Э}} = \frac{1}{2\rho \times f_{h_{21Э}} \times h_{11Э}},$ <p>где $f_{h_{21Э}}$ – предельная частота усиления транзистора по току в схеме с ОЭ</p>
Входная емкость транзистора в схеме с общим эмиттером	$C_0 = C_{B'\text{Э}} + C_K (1 + K_U)$
Входная емкость транзистора в схеме с общим коллектором	$C_0 = C_K + C_{B'\text{Э}} (1 - K_U)$

В качестве примера приведем расчет двухкаскадного усилителя, представленного на рисунке 3.1.

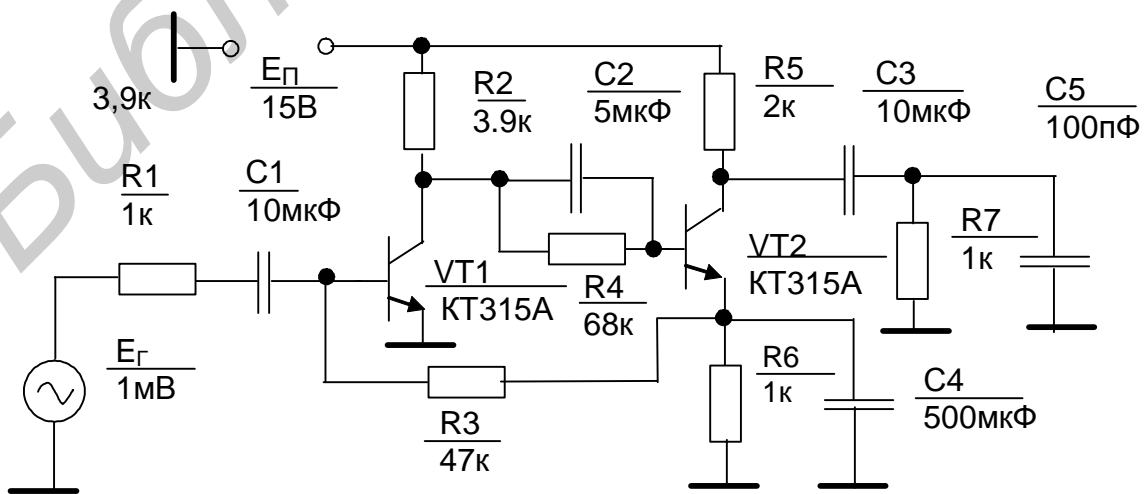


Рисунок 3.1 – Принципиальная схема двухкаскадного усилителя

Для сокращения объема таблица со справочными параметрами транзисторов в примере не приводится, а в контрольном задании такая таблица должна быть обязательно.

Коэффициент передачи по току транзистора КТ315А равен

$$h_{21Э} = \sqrt{h_{21ЭМИН} h_{21ЭМАКС}} = \sqrt{20 \times 90} = 42.$$

В данном усилителе имеется отрицательная обратная связь по постоянному току, поэтому статический режим схемы определим из системы уравнений:

$$\begin{cases} I_{B2} = \frac{U_{K1} - U_{B2}}{R_4} = \frac{E_{II} - (I_{K1} + I_{B2}) \cdot R_2 - U_{BЭ2} - (I_{K1} + I_{B2}) \cdot R_6}{R_4}; \\ I_{B1} = \frac{U_{Э2} - U_{B1}}{R_3} = \frac{(I_{K1} + I_{B2}) \cdot R_6 - U_{BЭ1}}{R_3}. \end{cases} \quad (3.9)$$

Здесь U_K , U_B , $U_Э$ – потенциалы коллектора, базы и эмиттера относительно общего провода соответственно, $U_{BЭ}$ – напряжение база–эмиттер, I_K , I_B – ток коллектора и базы, причем индекс 1 относится к входному транзистору VT1, а индекс 2 – к выходному транзистору VT2.

В современных транзисторах выполняется соотношение $I_K \gg I_B$, поэтому систему (3.9) можно упростить без существенной потери в точности:

$$\begin{cases} I_{B2} = \frac{E_{II} - h_{21Э1} \cdot I_{B1} \cdot R_2 - 0,6 - h_{21Э2} \cdot I_{B2} \cdot R_6}{R_4}; \\ I_{B1} = \frac{h_{21Э2} \cdot I_{B2} \cdot R_6 - 0,6}{R_3}. \end{cases} \quad (3.10)$$

Здесь принято $U_{BЭ2} = U_{BЭ1} = 0,6$ В – напряжение на открытых переходах кремниевых транзисторов.

Подставив значение тока I_{B1} в первое уравнение системы (3.10) получаем

$$I_{B2} = \frac{E_{II} - 0,6}{R_4} + \frac{0,6 \times h_{21Э1} \times R_2}{R_3 R_4}. \quad (3.11)$$

Подставив все значения в уравнение (3.11), находим величину базового тока второго транзистора $I_{B2} = 64$ мкА.

Из второго уравнения системы (3.10) определяем значение базового тока первого транзистора $I_{B1} = 45$ мкА.

Токи коллекторов транзисторов:

$$I_{K1} = h_{21Э} \times I_{B1} = 42 \times 45 \times 10^{-6} = 1,9 \text{ мА},$$

$$I_{K2} = h_{21Э} \times I_{B2} = 42 \times 64 \times 10^{-6} = 2,7 \text{ мА}.$$

Потенциалы коллекторов транзисторов:

$$U_{K1} = E_{II} - I_{K1} \times R_{K1} = 15 - 1,9 \times 10^{-3} = 7,7 \text{ В},$$

$$U_{K2} = E_{II} - I_{K2} \times R_{K2} = 15 - 2,7 \times 10^{-3} = 9,6 \text{ В.}$$

Напряжения коллектор–эмиттер транзисторов:

$$U_{KЭ1} = U_{K1} = 7,7 \text{ В, } U_{KЭ2} = U_{K2} - U_{Э2} = 9,6 - 2,7 \times 10^{-3} \times 1 \times 10^3 = 6,9 \text{ В.}$$

Для обоих транзисторов выполняется условие $U_{KЭ} > U_{БЭ}$, следовательно, транзисторы работают в активном режиме.

Находим параметры моделей транзисторов.

Выходные проводимости определяются как

$$h_{22Э1} = \frac{I_{OK}}{U_A} = \frac{1,6 \times 10^{-3}}{100} = 1,6 \times 10^{-5} \text{ См,}$$

$$h_{22Э2} = \frac{I_{OK}}{U_A} = \frac{2,7 \times 10^{-3}}{100} = 2,7 \times 10^{-5} \text{ См.}$$

Здесь $U_A = 100 \text{ В}$ – принятое значение напряжения Эрли.

Определяем граничную частоту f_T :

$$f_{T1} = f_{T2} = |h_{21Э}| \times f_{ИЗМ} = 2,5 \times 100 \times 10^6 = 250 \text{ МГц.}$$

Предельная частота усиления транзистора по току в схеме с общим эмиттером $f_{h_{21Э}}$ равна

$$f_{h_{21Э1}} = f_{h_{21Э2}} = \frac{f_T}{h_{21Э}} = \frac{250 \times 10^6}{42} \gg 6 \text{ МГц.}$$

Объемное сопротивление области базы r_B определяем из постоянной времени t_K коллекторного перехода транзистора:

$$r_B = \frac{t_K}{C_K} = \frac{500 \times 10^{-12}}{7 \times 10^{-12}} = 71 \text{ Ом.}$$

Здесь $C_K = 7 \text{ пФ}$ – емкость коллектора транзистора при измерении t_K .

Дифференциальное сопротивление эмиттеров найдем по формулам

$$r_{Э1} = \frac{m j_T}{I_{OK1}} = \frac{1,6 \times 26 \times 10^{-3}}{1,6 \times 10^{-3}} = 26 \text{ Ом, } r_{Э2} = \frac{m j_T}{I_{OK2}} = \frac{1,6 \cdot 26 \cdot 10^{-3}}{2,7 \cdot 10^{-3}} = 15,4 \text{ Ом.}$$

Дифференциальное сопротивление эмиттерных переходов $r_{Б'Э}$ определим по формулам

$$r_{Б'Э1} = r_{Э1} \times (h_{21Э} + 1) = 26 \times (42 + 1) = 1120 \text{ Ом,}$$

$$r_{Б'Э2} = r_{Э2} \times (h_{21Э} + 1) = 15,4 \times (42 + 1) = 660 \text{ Ом.}$$

Входные сопротивления транзисторов равны

$$h_{11Э1} = r_{Б1} + r_{Б'Э1} = 71 + 1120 \approx 1190 \text{ Ом,}$$

$$h_{11Э2} = r_{Б2} + r_{Б'Э2} = 71 + 660 \approx 730 \text{ Ом.}$$

Емкости эмиттерных переходов находим по формулам

$$C_{B'\Delta 1} = \frac{1}{2p \cdot f_{h_{21\Delta}} \cdot r_{B'\Delta 1}} = \frac{1}{6,28 \cdot 6 \cdot 10^6 \cdot 1120} = 23,7 \text{ пФ},$$

$$C_{B'\Delta 2} = \frac{1}{2p \cdot f_{h_{21\Delta}} \cdot r_{B'\Delta 2}} = \frac{1}{6,28 \cdot 6 \cdot 10^6 \cdot 660} = 40 \text{ пФ}.$$

Выходные сопротивления каскадов находим по формулам

$$R_{ВЫХ1} = \frac{R_2}{h_{22\Delta 1} R_2 + 1} = \frac{3,9 \times 10^3}{1,6 \times 10^{-5} \times 3,9 \times 10^3 + 1} = 3,68 \text{ кОм},$$

$$R_{ВЫХ2} = \frac{R_5}{h_{22\Delta 1} R_5 + 1} = \frac{2 \times 10^3}{2,7 \times 10^{-5} \times 2 \times 10^3 + 1} = 1,9 \times 10^3 \text{ кОм}.$$

Их входные сопротивления равны

$$R_{ВХ1} = \frac{h_{11\Delta 1} R_3}{h_{11\Delta 1} + R_3} = \frac{1190 \times 47 \times 10^3}{1190 + 47 \times 10^3} = 1160 \text{ Ом}, \quad R_{ВХ2} = h_{11\Delta 2} = 660 \text{ Ом}.$$

Эквивалентные сопротивления нагрузки по переменному току:

$$R_{H1\sim} = \frac{R_{ВЫХ1} \cdot R_{ВХ2}}{R_{ВЫХ1} + R_{ВХ2}} = \frac{3,68 \cdot 0,66}{3,68 + 0,66} = 0,56 \text{ кОм},$$

$$R_{H2\sim} = \frac{R_{ВЫХ2} R_7}{R_{ВЫХ2} + R_7} = \frac{1,9 \cdot 1}{1,9 + 1} = 0,66 \text{ кОм}.$$

Коэффициенты передачи по напряжению:

$$K_{U1} = \frac{h_{21\Delta 1} \times R_{H1\sim}}{h_{11\Delta 1}} = \frac{42 \times 560}{1190} = 19,7, \quad K_{U2} = \frac{h_{21\Delta 2} \times R_{H2\sim}}{h_{11\Delta 2}} = \frac{42 \times 660}{730} = 38.$$

Сквозной коэффициент передачи по напряжению первого каскада и всего усилителя в целом:

$$K_{E1} = \frac{K_{U1}}{1 + R_1/R_{ВХ1}} = \frac{19,7}{1 + 1000/1160} = 10,6, \quad K_E = K_{E1} \times K_{U2} = 10,6 \times 38 = 400.$$

Постоянные времени в области нижних частот, связанные с разделительными конденсаторами С1, С2 и С4, определяются по формулам

$$t_{H1} = C_1 (R_{\Gamma} + R_{ВХ1}) = 10 \times 10^{-6} (1000 + 1160) = 21,6 \text{ мс},$$

$$t_{H2} = C_2 ((R_{ВЫХ1} + R_{ВХ2}) \parallel R_4) = 5 \times 10^{-6} \frac{(3680 + 660) \times 68000}{3680 + 660 + 68000} = 20,4 \text{ мс},$$

$$t_{H3} = C_4 (R_{ВЫХ2} + R_7) = 10 \times 10^{-6} (1900 + 1000) = 29 \text{ мс}.$$

Эквивалентное сопротивление второго транзистора по цепи эмиттера:

$$R_{\Delta Вых2} = R_6 \parallel \left(r_{\Delta 2} + \frac{R_{ВЫХ1}}{1 + h_{21\Delta 2}} \right) =$$

$$= 1000 \cdot \left(15,4 + \frac{3680}{1 + 42} \right) \parallel \left(1000 + 15,4 + \frac{3680}{1 + 42} \right) = 92 \text{ Ом}.$$

Постоянная времени в области нижних частот, связанная с блокировочным конденсатором СЗ, определяется по формуле

$$t_{H4} = C_3 \times R_{Э Вых2} = 500 \times 10^{-6} \times 92 = 4,6 \text{ мс.}$$

Эквивалентная постоянная времени в области нижних частот равна

$$t_H = 1 / \sqrt{(1/t_{H1})^2 + (1/t_{H2})^2 + (1/t_{H3})^2 + (1/t_{H4})^2} = \\ = 1 / \sqrt{(1/21,6)^2 + (1/20,4)^2 + (1/29)^2 + (1/4,6)^2} = 4,35 \text{ мс.}$$

Нижняя частота среза определяется по формуле

$$f_H = \frac{1}{2pt_H} = \frac{1}{6,28 \times 4,35 \times 10^{-3}} = 37 \text{ Гц.}$$

В усилителе имеются три постоянных времени в области верхних частот, связанные с входными цепями входного и оконечного транзисторов и емкостью нагрузки:

$$t_{B1} = (C_{БЭ1} + C_{K1}(1 + K_{U1})) \times (R_{BX1} \parallel R_1) = \\ = (23,7 \times 10^{-12} + 7 \times 10^{-12}(1 + 19,7)) \times \frac{1160 \times 1000}{1160 + 1000} = 90 \text{ нс,}$$

$$t_{B2} = (C_{БЭ2} + C_{K2}(1 + K_{U2})) \times (R_{BX2} \parallel R_{Вых1}) = \\ = (40 \times 10^{-12} + 7 \times 10^{-12}(1 + 38)) \times \frac{660 \times 3680}{660 + 3680} = 175 \text{ нс,}$$

$$t_{B3} = C_5 \times (R_{Вых2} \parallel R_7) = 100 \times 10^{-12} \times \frac{1900 \times 1000}{1990 + 1000} = 65 \text{ нс.}$$

Эквивалентная постоянная времени в области нижних частот равна

$$t_B = \sqrt{t_{B1}^2 + t_{B2}^2 + t_{B3}^2} = \sqrt{90^2 + 175^2 + 65^2} = 207 \text{ нс.}$$

Верхняя частота среза определяется по формуле

$$f_B = \frac{1}{2pt_B} = \frac{1}{6,28 \cdot 207 \cdot 10^{-9}} = 770 \text{ кГц.}$$

Литература

- 1 Войшвилло, Г. В. Усилительные устройства / Г. В. Войшвилло. – М. : Радио и связь, 1983.
- 2 Титце, У. Полупроводниковая схемотехника. / У. Титце, К. Шенк. – М. : Мир, 1982.
- 3 Галкин, В. И. Полупроводниковые приборы : справочник / В. И. Галкин, А. Л. Булычев, В. А. Прохоров. – 2-е изд. – Минск : Беларусь, 1987.

Содержание

1	Методические рекомендации по выполнению контрольных заданий.....	3
2	Порядок выполнения первого контрольного задания.....	4
3	Порядок выполнения второго контрольного задания.....	11
	Литература.....	21

Библиотека БГУИР

Учебное издание

ФУНКЦИОНАЛЬНЫЕ УСТРОЙСТВА ТЕЛЕКОММУНИКАЦИЙ

Методические указания и контрольные задания
для студентов специальности I- 45 01 03 «Сети телекоммуникаций»
заочной формы обучения

Составитель

Шатило Николай Иванович

Редактор М. В. Тезина

Корректор Е. Н. Батурчик

Подписано в печать 30.05.2008.
Гарнитура «Таймс».
Уч.-изд. л. 1,2.

Формат 60×84 1/16.
Печать ризографическая.
Тираж 75 экз.

Бумага офсетная.
Усл. печ. л. 1,51.
Заказ 40.

Издатель и полиграфическое исполнение: Учреждение образования
«Белорусский государственный университет информатики и радиоэлектроники»
ЛИ №02330/0056964 от 01.04.2004. ЛП №02330/0131666 от 30.04.2004.
220013, Минск, П. Бровки, 6