

Документ подписан простой электронной подписью

Информация о владельце:

ФИО: Таныгин Максим Олегович

Должность: и.о. декана факультета фундаментальной и прикладной информатики

Дата подписания: 21.09.2023 15:14:04

Уникальный программный ключ:

65ab2a0d1784cfa8480c6c4cf88eddb5475e411a

МИНОБРАЗОВАНИЯ РОССИИ

Федеральное государственное бюджетное образовательное
учреждение высшего образования
«Юго-Западный государственный университет»
(ЮЗГУ)

Кафедра вычислительной техники



УСИЛИТЕЛЬНЫЙ КАСКАД НА БИПОЛЯРНОМ ТРАНЗИСТОРЕ

Методические указания
к лабораторной работе по дисциплинам
«Электротехника электроника и схемотехника» и
«Основы электроники»
для студентов специальностей 09.03.01 и 09.03.04

Курск 2019

Составитель М.В. Бобырь

УДК 681.3

Рецензент

Доктор технических наук, профессор кафедры Информационных систем и технологий *С.В. Дегтярев*

Усилительный каскад на биполярном транзисторе: Методические указания к лабораторной работе по дисциплинам «Электротехника электроника и схемотехника» и «Основы электроники» для студентов специальностей 09.03.01 и 09.03.04 / Юго-Зап. гос. ун-т; Сост. М.В. Бобырь. Курск, 2019. 16 с.

Описывается методика проектирования и исследования однокаскадного усилителя с емкостными связями на биполярном транзисторе; приведены рекомендации по применению программы моделирования электронных схем **Electronics Workbench 5.0** для исследования характеристик усилителя.

Предназначены для студентов специальностей 09.03.01 и 09.03.04.

Текст печатается в авторской редакции

Подписано в печать 30.04.19. Формат 60x84 1/16.
Усл. печ. л. 0,7 Уч.-изд. л. 0,6 Тираж 50 экз. Заказ 443.

Юго-Западный государственный университета.
305040 Курск, ул. 50 лет Октября, 94.

УСИЛИТЕЛЬНЫЙ КАСКАД НА БИПОЛЯРНОМ ТРАНЗИСТОРЕ

1. Цель работы

Изучение схемы и работы однокаскадного усилителя напряжения переменного тока, построенного на биполярном транзисторе по схеме с общим эмиттером, и измерение характеристик усилителя.

2. Объект исследования и основные теоретические положения

Усилительный каскад с емкостными связями на биполярном транзисторе в схеме с общим эмиттером (ОЭ) широко применяется для усиления сигналов переменного тока как в исполнении на дискретных компонентах, так и в составе интегральных микросхем. На рис. 1 приведена схема каскада с ОЭ.

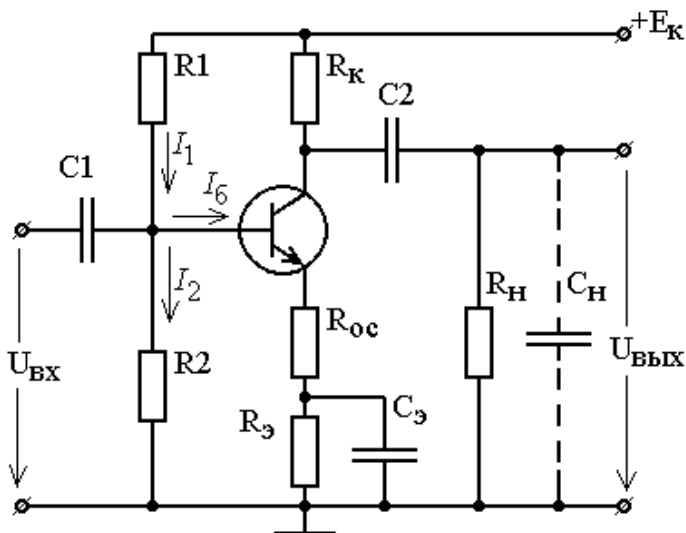


Рис. 1. Схема усилительного каскада с емкостной связью на биполярном транзисторе с общим эмиттером

Резисторный делитель R_1, R_2 в цепи базы обеспечивает ток базы покоя $I_{б.о.}$, который задает требуемую *точку покоя* ($I_{к.о.}$; $U_{кэ.о.}$) в статическом режиме.

Конденсатор C_1 изолирует вход каскада по постоянному току и соединяет его с источником сигнала по переменному току. Конденсатор C_2 выполняет такую же функцию по отношению к выходу каскада и нагрузке. Оба конденсатора должны иметь достаточно малое сопротивление на частоте сигнала.

В статическом состоянии (в покое) рабочая точка характеризуется током коллектора покоя $I_{к.о.}$ и напряжением коллектор-эмиттер $U_{кэ.о.}$. Эти значения связаны уравнением *статической линии нагрузки*:

$$U_{кэ.о.} = (E_k - U_{э.о.}) - I_{к.о.} \cdot R_k, \quad (1)$$

где $U_{э.о.}$ – падение напряжения на резисторе R_3 в цепи эмиттера, который включен для стабилизации статического режима транзистора за счет отрицательной обратной связи (ООС) по постоянному току.

Для переменного тока (т.е. сигнала) реактивное сопротивление конденсатора C_2 мало и поэтому сопротивления нагрузки и коллектора включены параллельно: $R_{к.н} = R_k // R_H$. Колебания тока коллектора и напряжения на коллекторе связаны *динамической линией нагрузки*, которая проходит через точку покоя O под большим углом к оси $U_{кэ}$, чем статическая:

$$U_{кэ} = E_{к.экв} - I_k \cdot R_{к.н}, \quad (2)$$

где $E_{к.экв}$ – напряжение эквивалентного источника:

$$E_{к.экв} = \frac{(E_k - U_{э.о.}) \cdot R_H + U_{кэ.о.} \cdot R_k}{R_k + R_H}. \quad (3)$$

Статическая и динамическая линии нагрузки показаны на рис. 2.

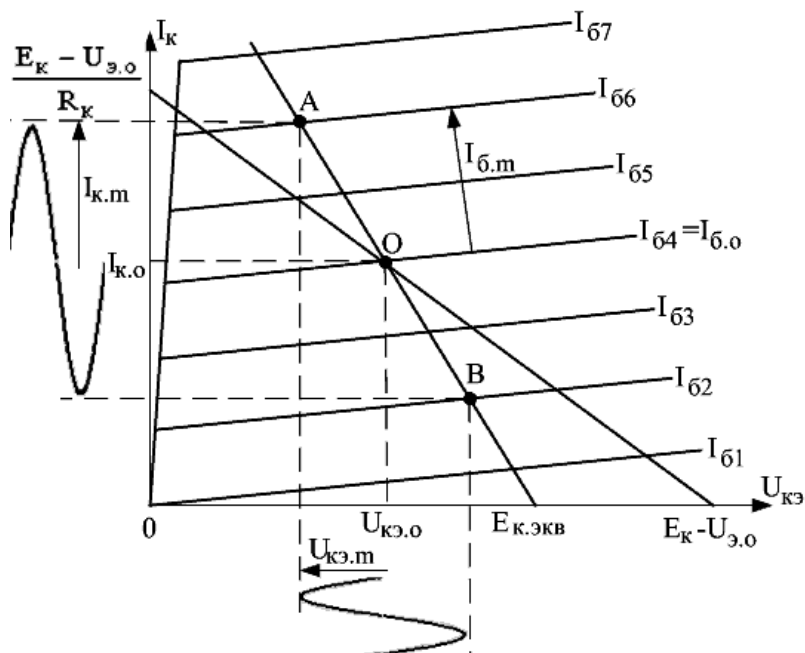


Рис. 2. Графики статической и динамической линий нагрузки

Для малых приращений тока коллектора и напряжения коллектор–эмиттер уравнение динамической линии нагрузки имеет вид

$$\Delta U_{кэ} = - \Delta I_{к} R_{к.н}.$$

При усилении гармонических колебаний амплитуды переменных составляющих напряжения на коллекторе и тока коллектора связаны соотношением

$$U_{кэ.м} = I_{к.м} R_{к.н}.$$

Положение точки покоя ($I_{к.о}$; $U_{кэ.о}$) на статической линии нагрузки удобно определять графо-аналитическим методом, располагая графиками выходных характеристик. Для того, чтобы обеспечить симметричные условия для положительной и отрицательной полуволн колебаний выходного напряжения,

точку покоя ($I_{к.о}$; $U_{кэ.о}$) следует выбирать в середине активного участка динамической линии нагрузки.

Подставив в (3) $U_{кэ.о} = 0,5 \cdot E_{к.экв}$, получаем

$$U_{кэ.о} = \frac{(E_{к} - U_{э.о}) \cdot R_{н}}{R_{к} + 2 \cdot R_{н}}. \quad (4)$$

Из этого условия можно вычислить ток коллектора $I_{к.о}$:

$$I_{к.о} = \frac{E_{к} - U_{э.о} - U_{кэ.о}}{R_{к}} \quad (5)$$

и ток базы $I_{б.о}$:

$$I_{б.о} = \frac{I_{к.о} - h_{22э} U_{кэ.о}}{h_{21э}}, \quad (6)$$

после чего рассчитать сопротивления R_1 и R_2 .

Благодаря резистору R_3 схема рис. 1 имеет высокую стабильность точки покоя и при изменении параметров транзистора (в первую очередь, коэффициента $h_{21э}$) статический режим практически остается неизменным. Для того, чтобы устранить влияние резистора R_3 на переменном токе, он блокируется конденсатором C_3 достаточно большой емкости.

Коэффициент усиления по напряжению усилительного каскада в области средних частот равен

$$K_{u.o} = - \frac{h_{21э} \cdot R_{кн}}{R_{вх.тр} \cdot (1 + h_{22э} \cdot R_{кн})}, \quad (7)$$

где $R_{вх.тр}$ – входное сопротивление транзистора.

Знак “минус” в формуле (7) означает инверсию входного сигнала на выходе усилителя. Без резистора R_{oc} в цепи эмиттера $R_{вх.тр} = h_{11э}$, и усиление максимально. Резистор R_{oc} увеличивает входное сопротивление транзистора $R_{вх.тр}$:

$$R_{вх.тр} = h_{11э} + (h_{21э} + 1)R_{oc} \quad (8)$$

и снижает усиление. Величину R_{oc} выбирают, исходя из заданного коэффициента усиления $K_{u.o}$.

В области низких частот (НЧ) усиление каскада уменьшается из-за влияния разделительных конденсаторов C_1 и C_2 и шунтирующего конденсатора C_3 :

$$K_{у.н.}(f) = \frac{K_{у.о.}}{\sqrt{1 + \left(\frac{1}{2\pi f \tau_n}\right)^2}}, \quad (9)$$

где τ_n – постоянная времени усилителя в области НЧ.

Нижняя граничная частота, на которой усиление уменьшается в $\sqrt{2}$ раз, равна

$$f_n = \frac{1}{2\pi\tau_n}. \quad (10)$$

τ_n определяется постоянными времени трех цепей, в которые входят указанные выше конденсаторы:

$$\frac{1}{\tau_n} = \frac{1}{\tau_{н1}} + \frac{1}{\tau_{н2}} + \frac{1}{\tau_{нэ}}. \quad (11)$$

Здесь постоянная времени входной цепи

$$\tau_{н1} = R_{вх} \cdot C_1, \quad (12)$$

где $R_{вх}$ – входное сопротивление каскада с учетом влияния базового делителя

$$R_{вх} = \frac{1}{\frac{1}{R_{вх.гр}} + \frac{1}{R_1} + \frac{1}{R_2}}; \quad (13)$$

постоянная времени выходной цепи

$$\tau_{н2} = (R_k + R_n) \cdot C_2; \quad (14)$$

постоянная времени цепи эмиттера

$$\tau_{нэ} = \left[\frac{h_{11э}}{h_{21э} + 1} + R_{ос} \right] \cdot C_3. \quad (15)$$

Исходя из заданной нижней частоты усилителя f_n , из (10) можно определить требуемую величину постоянной времени τ_n

и найти значения $\tau_{н1}$, $\tau_{н2}$ и $\tau_{н3}$. Целесообразно принять постоянные времена всех трех цепей одинаковыми:

$$\tau_{н1} = \tau_{н2} = \tau_{н3} = 3 \cdot \tau_{н},$$

после чего рассчитать емкости конденсаторов по формулам (12), (14), (15).

С повышением частоты также происходит уменьшение коэффициента усиления по сравнению с областью средних частот:

$$K_{u.v.b}(f) = \frac{K_{u.o}}{\sqrt{1 + (2\pi f \tau_b)^2}}, \quad (16)$$

где τ_b – постоянная времени усилителя в области высоких частот (ВЧ).

Снижение усиления на ВЧ обусловлено двумя факторами:

- 1) уменьшением модуля дифференциального коэффициента передачи тока по сравнению с $h_{21э}$;
- 2) влиянием выходной емкости транзистора $C_{вых}$ и емкости нагрузки C_n , шунтирующих выходную цепь усилителя.

Поэтому τ_b определяется и частотными свойствами транзистора (с учетом ООС), и паразитными емкостями:

$$\tau_b = \frac{\tau_\beta}{1 + h_{21э} \cdot \gamma_{oc}} + (C_{вых} + C_n) \cdot R_{кн}, \quad (17)$$

где τ_β – постоянная времени транзистора в схеме с общим эмиттером, которая равна

$$\tau_\beta = (h_{21э} + 1) \cdot \tau_F. \quad (18)$$

Постоянная времени транзистора τ_F задана в модели как **Forward transit time**.

γ_{oc} – коэффициент обратной связи, равный

$$\gamma_{oc} = \frac{R_{oc}}{R_{oc} + h_{11э}}; \quad (19)$$

$C_{вых}$ – выходная емкость транзистора в схеме с общим эмиттером, которая равна

$$C_{\text{вых}} = C_{\text{к}} \frac{h_{21\text{э}} + 1}{h_{21\text{э}} \cdot \gamma_{\text{ос}} + 1}, \quad (20)$$

где $C_{\text{к}}$ – емкость коллекторного перехода при известном напряжении коллектор-эмиттер $U_{\text{кэ.о.}}$.

Верхняя частота усилителя $f_{\text{в}}$, на которой усиление уменьшается в $\sqrt{2}$ раз по сравнению с областью средних частот, равна

$$f_{\text{в}} = \frac{1}{2\pi\tau_{\text{в}}}. \quad (21)$$

3. Программа исследований

1. Расчет и настройка статического режима

Работа выполняется путем моделирования схемы усилителя с помощью программы **Electronics Workbench 5.0c**. Используя заданные в табл.1 параметры транзистора и компонентов схемы: модель транзистора из библиотеки *nationl2*, **Forward current gain coefficient** (β_{F}), **Forward transit time** (τ_{F}), **Zero-bias B-C junction capacitance** (C_{C}), напряжение питания $E_{\text{к}}$, сопротивления $R_{\text{к}}$ и $R_{\text{н}}$, емкость нагрузки $C_{\text{н}}$, нижнюю частоту усилителя $f_{\text{н}}$ и требуемое усиление $K_{\text{и.о.}}$, – рассчитать “координаты” рабочей точки $U_{\text{кэ.о}}$ и $I_{\text{кэ.о}}$. Вычислить ток базы $I_{\text{б.о}}$ и сопротивления резисторов R_1 и R_2 .

Таблица 1

Вариант	Модель транзистора	β_{F}	τ_{F} , нс	C_{C} , пФ	$E_{\text{к}}$, В	$R_{\text{к}}$, кОм	$R_{\text{н}}$, кОм	$C_{\text{н}}$, пФ	$f_{\text{н}}$, Гц	$K_{\text{и.о}}$
1	2N 3417	60	65	300	12	6	3	80	50	15
2	2N 3416	55	80	250	10	5	2,4	90	35	13
3	2N 3415	50	90	275	15	7	3,3	75	40	12
4	2N 3414	65	85	330	18	8	4	70	45	15

Вариант	Модель транзистора	β_F	τ_F , нс	C_C , пФ	E_K , В	$R_{K, КОМ}$	$R_{H, КОМ}$	C_H , пФ	f_H , Гц	$K_{u.o}$
5	2N 3394	70	75	310	12	6	2,5	85	60	10
6	2N 3393	45	95	280	10	5	2,3	90	55	14
7	2N 3392	50	90	250	15	7	3	80	45	10
8	2N 3391	60	75	300	12	6	2,7	85	65	15
9	2N 3390	55	85	280	15	8	3,6	75	30	12
10	2N 2925	65	80	240	18	9	4	70	40	15
11	2N 2924	45	95	225	10	5	2,5	90	55	11
12	2N 2923	70	90	310	15	7	3,5	85	50	13
13	2N 2714	50	90	260	12	5	2,2	80	70	10
14	2N 2712	60	85	275	10	4	2	95	55	12

Собрать схему каскада на рабочем столе программы схемотехнического моделирования **Electronics Workbench 5.0c** (рис. 3).

Установить напряжение источника сигнала $U_T = 0$, сопротивление обратной связи $R_{oc} = 1$ Ом, режим амперметров A1 и A3 и вольтметров V1 и V2 – **DC** (постоянного тока), а амперметра A2 и вольтметра V3 – **AC** (переменного тока).

Индуктивность L_1 (1 Гн) и резистор R_3 (10 Ом) установлены для разделения постоянной и переменной составляющих тока базы через соответствующие амперметры.

Принять для расчета статического режима каскада напряжение $U_{э.о} = 0,1 \cdot E_K$, напряжение база-эмиттер $U_{бэ.о} = 0,6$ В, ток I_2 через резистор R_2 равным $5 \cdot I_{б.о}$, а ток I_1 через резистор R_1 равным $6 \cdot I_{б.о}$.

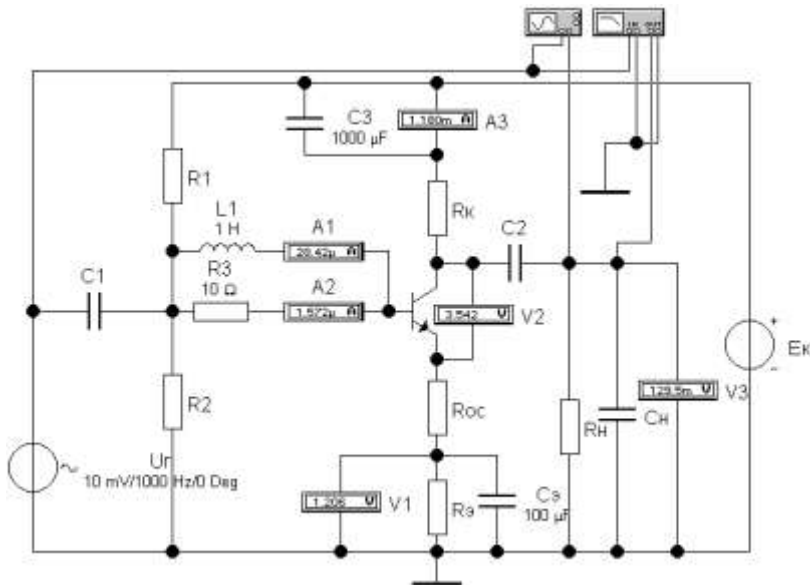


Рис. 3. Схема для исследования каскада с ОЭ

Используя формулы (4), (5), (6), найти требуемый ток базы покоя $I_{б.о.}$, сопротивления резисторного делителя R_1 , R_2

$$R_2 = \frac{U_{э.о.} + U_{бэ.о.}}{I_2}; \quad R_1 = \frac{E_k - (U_{э.о.} + U_{бэ.о.})}{I_1},$$

и резистора R_3

$$R_3 = \frac{U_{э.о.}}{I_{к.о.} + I_{б.о.}}.$$

Установить полученные значения сопротивлений R_1 , R_2 и R_3 и включить моделирование. Проверить, соответствуют ли показания измерительных приборов расчетным значениям $U_{э.о.}$, $I_{к.о.}$, $U_{кэ.о.}$. Если экспериментальные данные отличаются от расчетных значений более, чем на 5 %, следует уточнить расчеты и повторить опыт.

2. Исследование усилителя в режиме малого сигнала в области средних частот

Выполнить в схеме следующие установки:

- параметры источника сигнала (генератора переменного напряжения): напряжение $U_{Г} = 10$ мВ; частоту 1 000 Гц;
- емкость конденсатора $C_{3} = 100$ мкФ.

Включить моделирование. Зафиксировать показания приборов А2 (переменную составляющую тока базы $I_{б}$) и вольтметра V3 (выходное напряжение усилителя $U_{\text{ВЫХ}}$). Определить входное сопротивление транзистора $h_{11э}$:

$$h_{11э} = U_{Г} / I_{б}$$

и коэффициент усиления каскада по напряжению без обратной связи:

$$K_{\text{н}} = U_{\text{ВЫХ}} / U_{Г}$$

Рассчитать по формулам (7) и (8) требуемые значения входного сопротивления транзистора $R_{\text{вх.тр}}$ и сопротивления обратной связи $R_{\text{ос}}$ для получения заданного значения коэффициента усиления $K_{\text{н.о}}$. При расчетах принять значение выходной проводимости $h_{22э}$ равным 0,03 мСм.

Установить полученное значение $R_{\text{ос}}$ и уменьшить сопротивление R_{3} на эту же величину. Включить моделирование. Проверить, соответствует ли измеренное значение $K_{\text{н.о}}$ заданной величине. Если расхождение составляет более 5 %, уточнить сопротивление $R_{\text{ос}}$.

Измерить входное сопротивление транзистора $R_{\text{вх.тр}}$ с учетом действия отрицательной обратной связи.

Включить осциллограф. Выбрать удобные масштабы по осям времени и напряжений в каждом канале и снять осциллограммы напряжений на входе усилителя и на нагрузке. Для получения качественного изображения диаграмм в меню *Analysis / Analysis Options... / Instruments* отключить **“Generate time steps automatically”** и установить в графе **“Minimum number of time points”** количество точек 1 000.

3. Исследование частотных характеристик усилителя

Исходя из заданной нижней частоты f_n , рассчитать по формулам (10) – (15) емкости конденсаторов C_1 , C_2 , C_3 и установить в схеме усилителя полученные значения. Включить измеритель частотных характеристик (**Bode Plotter**).

Построить амплитудно-частотную характеристику (АЧХ) усилителя в линейно-логарифмическом масштабе: по оси частот – в логарифмическом, по оси коэффициента усиления (**Magnitude**) – в линейном. На рис. 4 показан примерный вид АЧХ и установок пределов по обеим осям на панели измерителя частотных характеристик.

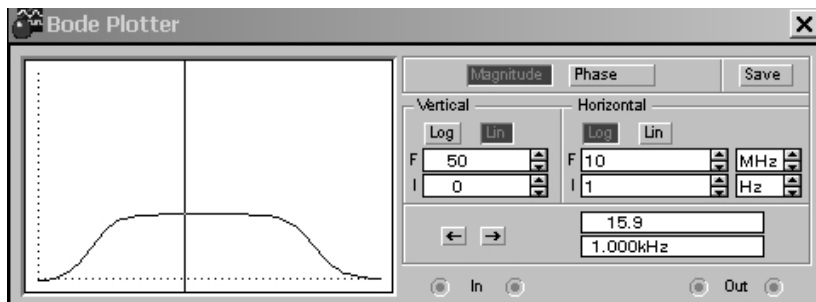


Рис. 4. Вид амплитудно-частотной характеристики усилителя

С помощью вертикальной визирной линейки определить точки на АЧХ, соответствующие нижней и верхней частотам усилителя (f_n и f_v), на которых коэффициент усиления в $\sqrt{2}$ раз меньше, чем в области средних частот. Проверить, удовлетворяет ли полученное значение f_n заданной величине.

Построить фазо-частотную характеристику (ФЧХ) усилителя в линейно-логарифмическом масштабе: по оси частот – в логарифмическом, по оси фазового сдвига (**Phase**) – в линейном. На рис. 5 показан примерный вид ФЧХ и установок пределов по обеим осям на панели измерителя частотных характеристик.

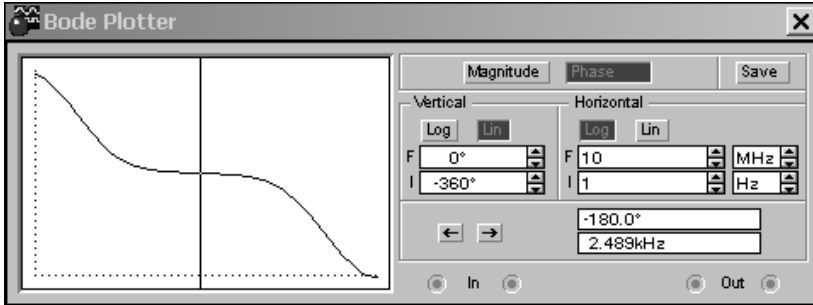


Рис. 5. Вид фазо-частотной характеристики усилителя

С помощью вертикальной визирной линейки определить величину фазового сдвига на нижней частоте f_n , в области средних частот и на верхней частоте f_b усилителя.

4. Контрольные вопросы

1. Из каких соображений выбираются координаты рабочей точки (точки покоя) транзисторного усилительного каскада $I_{к.о.}$ и $U_{кэ.о.}$?
2. Какое схемное решение обеспечивает термостабилизацию тока покоя коллектора? Для чего резистор R_3 в цепи эмиттера шунтируют конденсатором?
3. На чем основан эффект усиления колебаний напряжения в каскаде на транзисторе с ОЭ?
4. Назначение разделительных конденсаторов на входе и выходе усилительного каскада. Какому условию должна удовлетворять емкость каждого конденсатора?
5. Что такое динамическая линия нагрузки? Какому соотношению соответствует угол наклона этой линии?
6. Укажите связь мгновенных значений напряжения база-эмиттер, токов базы и коллектора и напряжения коллектор-эмиттер для транзистора типа $n-p-n$ при синусоидальном входном сигнале. Изобразите временные диаграммы указанных величин.
7. Укажите связь амплитудных значений переменных составляющих напряжения $U_{бэ.м.}$, токов $I_{б.м.}$ и $I_{к.м.}$, напряжения $U_{кэ.м.}$.

8. Чем определяется входное сопротивление усилительного каскада? Почему величина h_{11} зависит от тока покоя? Как влияет ООС на входное сопротивление транзистора $R_{вх.тр}$?
9. От каких параметров транзистора зависит коэффициент усиления каскада с ОЭ? Почему на усиление влияет сопротивление нагрузки?
10. В каких пределах может изменяться входное напряжение? Чем оно ограничено? Что является причиной искажений формы выходного сигнала при перегрузке усилителя?
11. Объясните действие последовательной ООС по току в однокаскадном усилителе на биполярном транзисторе. От чего зависит глубина ООС?
12. Какими факторами обусловлено снижение коэффициента усиления в области нижних частот в усилителе напряжения переменного тока? От каких параметров компонентов усилителя зависит нижняя граничная частота?
13. Какими факторами обусловлено уменьшение коэффициента усиления в области верхних частот? От каких параметров компонентов схемы усилительного каскада зависит верхняя граничная частота?
14. Чему равен фазовый сдвиг сигнала в области средних частот в усилительном каскаде с ОЭ? Поясните ответ диаграммами напряжений и токов.
15. Чем обусловлен дополнительный фазовый сдвиг в усилительном каскаде в области нижних частот? Каково направление этого сдвига?
16. Какими факторами обусловлен дополнительный фазовый сдвиг в усилительном каскаде в области верхних частот? Каково направление этого сдвига?

5. Содержание отчета

Отчет о лабораторной работе должен содержать:

- 1) титульный лист;
- 2) цель исследований;
- 3) схему установки для проведения измерений;

- 4) результаты расчета статического режима усилительного каскада $U_{э.о}$; $U_{кэ.о}$; $I_{к.о}$; $I_{б.о}$; I_1 ; I_2 ; R_1 ; R_2 ; $R_э$ и результаты моделирования статического режима;
- 5) результаты исследования работы каскада на переменном токе: измерение $h_{11э}$, расчет $R_{ос}$, измерение коэффициента усиления $K_{и.о}$ и $R_{вх.тр}$; построение временных диаграмм напряжений в усилителе;
- 6) результаты измерения частотных характеристик усилителя: расчет C_1 , C_3 и $C_э$, графики АЧХ и ФЧХ, значения f_H и f_B и фазовых сдвигов.

Литература

1. Опадчий Ю.Ф. и др. Аналоговая и цифровая электроника (Полный курс): Учебник для вузов / Ю.Ф. Опадчий, О.П. Глудкин, А.И. Гуров; Под ред. О.П. Глудкина. – М.: Горячая Линия – Телеком, 2002. – 768 с.
2. Гусев В.Г., Гусев Ю.М. Электроника: Учеб. пособие. – 2-е изд. – М.: Высш. шк., 1991. – 622 с.
3. Лачин В.И., Савелов Н.С. Электроника: Учебн. пособие. – Ростов н / Д: изд-во “Феникс”, 1998. – 448 с.
4. Горбачев Г.Н., Чаплыгин Е.Е. Промышленная электроника: Учебник для вузов / Под ред. В.А. Лабунцова. – М.: Энергоатомиздат, 1988. – 320 с.