

Документ подписан простой электронной подписью

Информация о владельце:

ФИО: Локтионова Оксана Геннадьевна

Должность: проректор по учебной работе

Дата подписания: 10.02.2022 15:45:00

Уникальный программный ключ:

0b817ca911e6668abb13a5d426d39e5f1c11eabbf73e943df4a4851fda56d089

МИНОБРНАУКИ РОССИИ

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

Кафедра вычислительной техники

УТВЕРЖДАЮ

Проректор по учебной работе

О.Г. Локтионова

« 22 » сентября 2016 г.



ОДНОКАСКАДНЫЙ УСИЛИТЕЛЬ НА БИПОЛЯРНОМ ТРАНЗИСТОРЕ

**Методические указания по выполнению лабораторной работы
по дисциплинам «Электротехника, электроника, схемотехника»
и «Основы электроники»
для студентов специальности 09.03.01 «Информатика
и вычислительная техника»**

Курск 2016

УДК 621.37(075)

Составители: В. И. Иванов, М.В. Бобырь

Рецензент

Кандидат технических наук, доцент *Е.О. Брежнева*

Однокаскадный усилитель на биполярном транзисторе: методические указания по выполнению лабораторной работы по дисциплинам «Электротехника, электроника, схемотехника» и «Основы электроники» / Юго-Зап. гос. ун-т; сост.: В. И. Иванов, М.В. Бобырь. – Курск, 2016. – 14 с.: ил. 4, табл. 1. – Библиогр.: с.13.

Изложена 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.

Методические указания соответствуют требованиям программы дисциплин «Электротехника, электроника, схемотехника» и «Основы электроники».

Предназначены для студентов специальности 09.03.01 «Информатика и вычислительная техника» дневной и заочной форм обучения.

Текст печатается в авторской редакции

Подписано в печать 22.09.16. Формат 60x84 1/16.

Усл.печ. л. 0,8. Уч.-изд. л. 0,7. Тираж 50 экз. Заказ 954. Бесплатно.

Юго-Западный государственный университет.

305040, г. Курск, ул. 50 лет Октября, 94.

ОДНОКАСКАДНЫЙ УСИЛИТЕЛЬ 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.

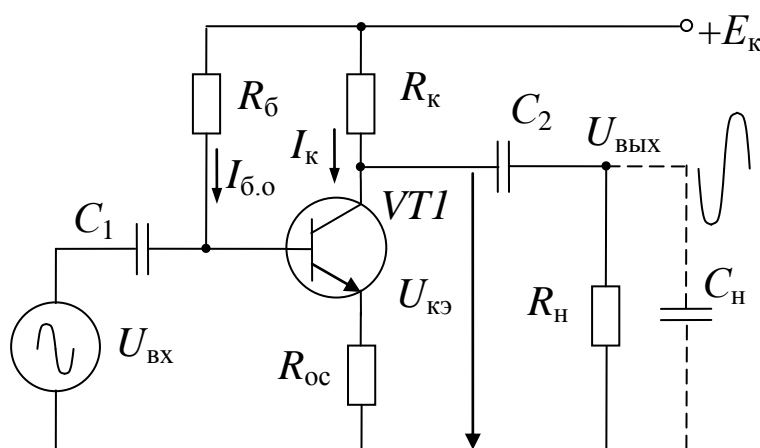


Рис. 1. Схема усилительного каскада с емкостной связью на биполярном транзисторе с общим эмиттером

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

Источником входного сигнала служит генератор синусоидального напряжения. Конденсатор C_1 изолирует цепь базы транзистора от источника сигнала по постоянному току и соединяет базу с источником сигнала по переменному току. Конденсатор C_2 выполняет такую же функцию по отношению к выходу каскада и нагрузке, которая представлена резистивно-емкостной цепью $R_н C_н$.

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* (см. рис. 2):

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

Наклон статической линии нагрузки зависит от сопротивления резистора R_k . Ее можно построить по двум точкам на осях координат: $I_k = 0, U_{кэ} = E_k$ на оси напряжения и $U_{кэ} = 0, I_k = E_k / R_k$ на оси тока. Точка покоя находится на пересечении статической линии нагрузки и одной из выходных характеристик транзистора, которые определяются уравнением

$$I_k = \beta I_{б} + h_{22э} U_{кэ}. \quad (2)$$

Коэффициент передачи тока базы β обозначают также $h_{21э}$. Наклон выходных характеристик определяется величиной выходной проводимости $h_{22э}$.

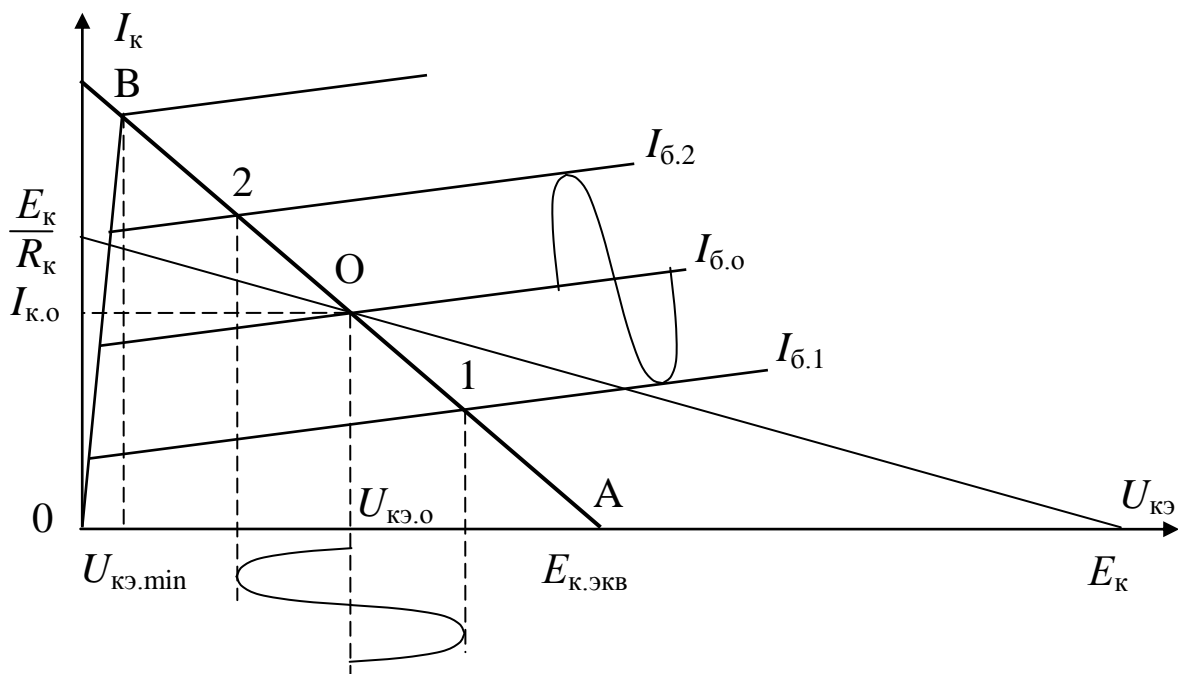


Рис. 2. Статическая и динамическая линии нагрузки

Для переменного тока (т. е. сигнала) реактивное сопротивление конденсатора C_2 мало и поэтому сопротивления нагрузки и коллектора

включены параллельно: $R_{к.н} = R_к // R_н$. Текущие координаты рабочей точки перемещаются по **динамической линии нагрузки**, которая проходит через точку покоя, но более круто, чем статическая линия нагрузки: $\Delta U_{кэ} / \Delta I_к = R_{к.н}$. Например, при колебаниях тока базы относительно тока покоя $I_{б.0}$ в пределах от $I_{б.1}$ до $I_{б.2}$ рабочая точка будет перемещаться между точками 1 и 2. При этом на коллекторе транзистора появляется переменная составляющая напряжения.

Точка покоя O должна находиться в центре рабочего участка динамической линии нагрузки, ограниченного точками A и B . Точка B соответствует границе активной области и области насыщения. $U_{кэ.min}$ – минимальное напряжение на транзисторе, оно составляет около 0,5 В. Для нахождения координат точки покоя составим уравнения. Напряжение $U_{кэ.0}$ должно удовлетворять двум условиям – располагаться на статической линии нагрузки и делить участок AB на равные части:

$$U_{кэ.0} = E_к - I_{к.0} R_к ;$$

$$U_{кэ.0} = U_{кэ.min} + I_{к.0} (R_к \parallel R_н) .$$

Решением этой системы уравнений являются координаты точки покоя:

$$U_{кэ.0} = \frac{E_к R_н}{2R_н + R_к} + \frac{U_{кэ.min} (R_н + R_к)}{2R_н + R_к} ; \quad (3)$$

$$I_{к.0} = \frac{E_к - U_{кэ.0}}{R_к} . \quad (4)$$

В реальных схемах напряжение коллектор-эмиттер $U_{кэ.0} = (0,25 \div 0,3) E_к$. Из (2) можно вычислить ток базы в статическом режиме

$$I_{б.0} = \frac{I_{к.0} - h_{22э} \cdot U_{кэ.0}}{h_{21э}} , \quad (5)$$

после чего рассчитать сопротивления $R_б$:

$$R_б = \frac{E_к - U_{бэ.0}}{I_{б.0}} . \quad (6)$$

Выходную проводимость $h_{22э}$ принять равной 0,02 мСм.

Резистор $R_{ос}$, как правило, имеет небольшое сопротивление и не влияет на статический режим. Но он оказывает заметное влияние на

переменном токе, так как является элементом отрицательной обратной связи.

Для переменного тока (т. е. сигнала) сопротивление нагрузки R_H и резистор R_K включены параллельно: $R_{K.H} = R_K // R_H$. Коэффициент усиления по напряжению усилительного каскада в области средних частот равен

$$K_u = \frac{h_{21э} R_{K.H}}{R_{вх.тр} (1 + h_{22э} R_{K.H})}. \quad (7)$$

Без резистора R_{oc} в цепи эмиттера входное сопротивление транзистора минимально и равно $R_{вх.тр} = h_{11э}$, и усиление максимально. Резистор R_{oc} увеличивает $R_{вх.тр}$ в $[1 + (h_{21э} + 1)R_{oc} / h_{11э}]$ раз:

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

и во столько же раз снижает усиление:

$$K_{u.ос} = \frac{h_{21э} R_{K.H}}{R_{вх.тр.ос} (1 + h_{22э} R_{K.H})}. \quad (9)$$

Величину R_{oc} выбирают, исходя из заданного коэффициента усиления $K_{u.ос}$.

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

$$K_{u.нч}(f) = \frac{K_{u.о}}{\sqrt{1 + \left(\frac{1}{2\pi f \tau_H}\right)^2}},$$

где τ_H – постоянная времени усилителя в области НЧ.

Нижняя граничная частота, на которой усиление уменьшается в $\sqrt{2}$ раз по сравнению с областью средних частот, равна

$$f_H = \frac{1}{2\pi\tau_H}. \quad (10)$$

Величина τ_H определяется постоянными времени двух цепей, в которые входят указанные выше конденсаторы:

$$\frac{1}{\tau_H} = \frac{1}{\tau_{H1}} + \frac{1}{\tau_{H2}}. \quad (11)$$

Здесь постоянная времени входной цепи равна

$$\tau_{H1} = R_{вх.тр.ос} \cdot C_1, \quad (12)$$

где $R_{\text{вх.тр.оос}}$ – входное сопротивление каскада с учетом влияния ООС, постоянная времени выходной цепи равна

$$\tau_{\text{н2}} = (R_{\text{к}} + R_{\text{н}}) \cdot C_2. \quad (13)$$

Исходя из заданной нижней частоты усилителя $f_{\text{н}}$, из (10) можно определить требуемую величину постоянной времени $\tau_{\text{н}}$ и найти значения $\tau_{\text{н1}}$ и $\tau_{\text{н2}}$. Целесообразно принять постоянные времени обеих цепей одинаковыми: $\tau_{\text{н1}} = \tau_{\text{н2}} = 2 \tau_{\text{н}}$, после чего рассчитать емкости конденсаторов по формулам (12) и (13).

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

$$K_{\text{у.вч}}(f) = \frac{K_{\text{у.о}}}{\sqrt{1 + (2\pi f \tau_{\text{в}})^2}},$$

где $\tau_{\text{в}}$ – 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 $C_{\text{вых}}$ и емкости нагрузки $C_{\text{н}}$, шунтирующих выходную цепь усилителя.

Поэтому $\tau_{\text{в}}$ определяется и частотными свойствами транзистора (с учетом ООС), и паразитными емкостями.

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

$$f_{\text{в}} = \frac{1}{2\pi\tau_{\text{в}}}.$$

3. Программа исследований

1. Расчет и настройка статического режима

Работа выполняется путем моделирования схемы усилителя с помощью программы **Electronics Workbench 5.0c**. Собрать схему каскада на рабочем столе программы схемотехнического моделирования **Electronics Workbench 5.0c** (рис. 3).

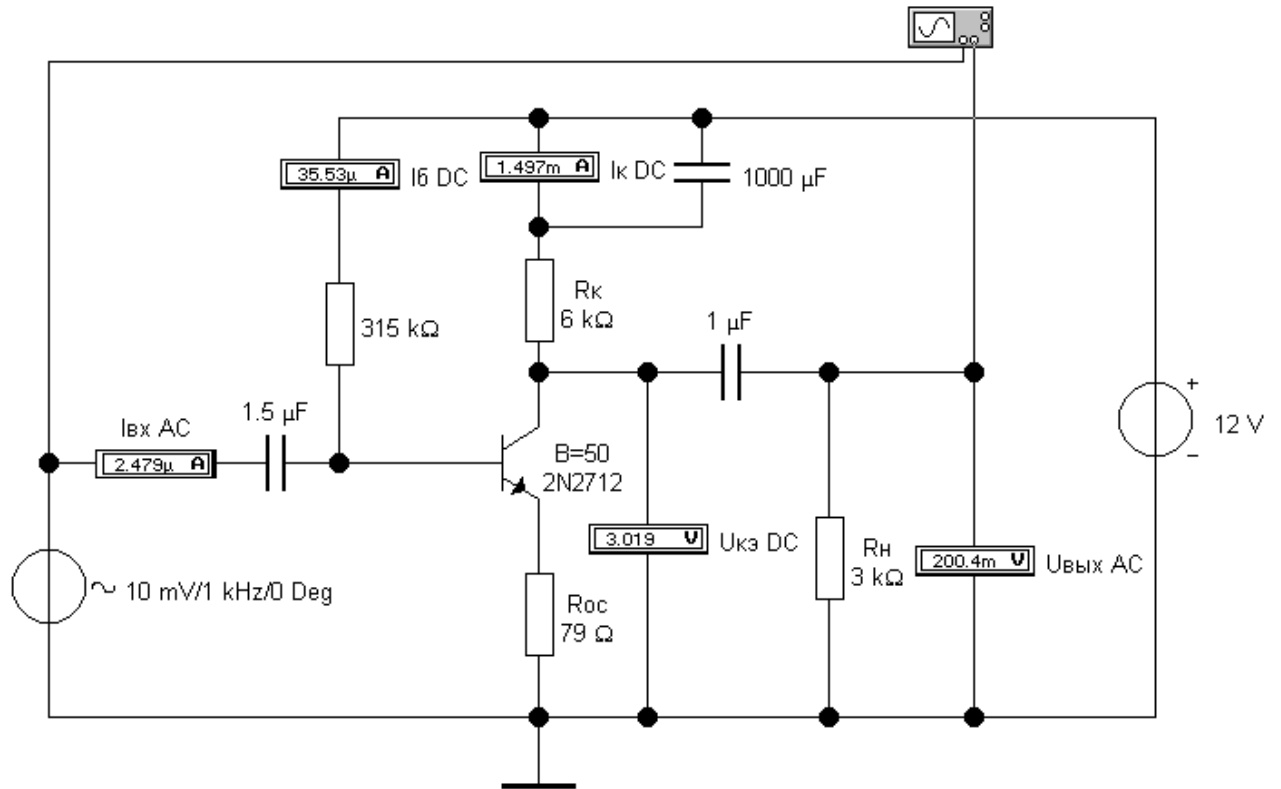


Рис. 3. Схема для исследования усилительного каскада

В таблице вариантов заданы параметры транзистора и компонентов схемы. Модель транзистора выбрать из библиотеки *nationl2*, установить в меню **Properties** – **Edit** значение коэффициента β (*Forward current gain coefficient (F)*). Установить напряжение питания E_K , сопротивления R_K и R_H , емкость нагрузки C_H согласно таблице вариантов.

Вариант	Модель транзистора	β_F	C_H , пФ	E_K , В	R_K , кОм	R_H , кОм	f_H , Гц	$K_{u.ос}$
1	2N 3417	60	600	12	6	3	50	15
2	2N 3416	55	500	10	5	2,4	35	13
3	2N 3415	50	550	15	7	3,3	40	12
4	2N 3414	65	660	18	8	4	45	15
5	2N 3394	70	630	12	6	2,5	60	10
6	2N 3393	45	560	10	5	2,3	55	14

Вариант	Модель транзистора	β_F	C_H , пФ	E_K , В	R_K , кОм	R_H , кОм	f_H , Гц	$K_{u.OC}$
7	2N 3392	50	500	15	7	3	45	10
8	2N 3391	60	600	12	6	2,7	65	15
9	2N 3390	55	550	15	8	3,6	30	12
10	2N 2925	65	480	18	9	4	40	15
11	2N 2924	45	450	10	5	2,5	55	11
12	2N 2923	70	620	15	7	3,5	50	13
13	2N 2714	50	520	12	5	2,2	70	10
14	2N 2712	60	570	10	4	2	55	12

Рассчитать по формулам (3), (4) “координаты” рабочей точки $U_{кэ.о}$ и $I_{к.о}$. Используя формулы (5), (6), найти требуемый ток базы покоя $I_{б.о}$ и сопротивление резистора $R_б$. Принять для расчета статического режима каскада напряжение база-эмиттер $U_{бэ.о} = 0,6$ В, значение выходной проводимости $h_{22э} = 0,02$ мСм.

Установить напряжение источника сигнала $U_{вх} = 0$, сопротивление обратной связи $R_{oc} = 1$ Ом, режим миллиамперметров J2 и J3 и вольтметра V1 – **ДС** (постоянного тока), а миллиамперметра J1 и вольтметра V2 – **АС** (переменного тока).

Установить полученное значение сопротивления $R_б$ и включить моделирование. Проверить, соответствуют ли показания измерительных приборов расчетным значениям $I_{к.о}$, $U_{кэ.о}$. 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

Установить в схеме емкости C_1 и C_2 , равные 1,5 мкФ и 1 мкФ, и параметры источника сигнала (генератора переменного напряжения): напряжение $U_{вх} = 10$ мВ; частоту 1 000 Гц.

Включить моделирование. Зафиксировать показания приборов J1 (переменную составляющую входного тока базы $I_{вх}$) и вольтметра V2

(выходное напряжение усилителя $U_{\text{ВЫХ}}$). Определить входное сопротивление транзистора $h_{11э}$:

$$h_{11э} = U_{\text{ВХ}} / I_{\text{ВХ}}$$

и сравнить это значение с величиной, полученной по приближенной формуле:

$$h_{11э} = 26 \text{ (мВ)} / I_{\text{б.о.}}$$

Измерить коэффициент усиления каскада по напряжению без обратной связи:

$$K_u = U_{\text{ВЫХ}} / U_{\text{ВХ}}$$

Рассчитать по формулам (7) и (8) требуемые значения входного сопротивления транзистора $R_{\text{вх.тр.ос}}$ и сопротивления обратной связи $R_{\text{ос}}$ для получения заданного значения коэффициента усиления $K_{\text{у.ос}}$. Установить полученное значение $R_{\text{ос}}$. Включить моделирование. Проверить, соответствует ли измеренное значение $K_{\text{у.ос}}$ заданной величине. Если расхождение составляет более 5 %, уточнить сопротивление $R_{\text{ос}}$.

Измерить входное сопротивление транзистора $R_{\text{вх.тр.ос}}$ 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* можно отключить опцию **“Generate time steps automatically”** и установить в графе **“Minimum number of time points”** количество точек от 500 до 1000.

3. Исследование частотных характеристик усилителя

Исходя из заданной нижней частоты f_n , рассчитать по формулам (10) – (13) емкости конденсаторов C_1 и C_2 ; установить в схеме усилителя полученные значения. Включить измеритель частотных характеристик (**Bode Plotter**).

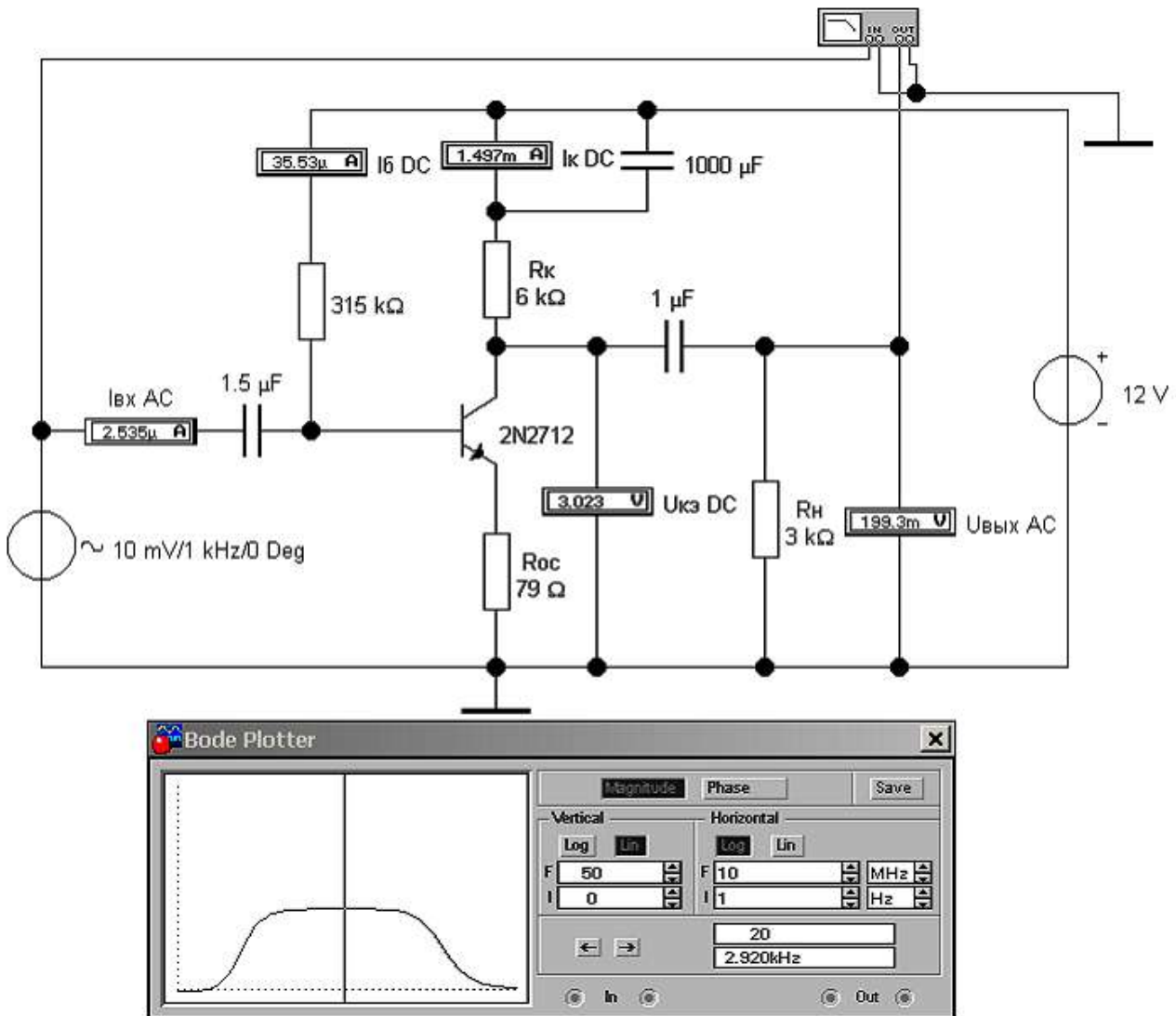


Рис. 4. Вид амплитудно-частотной характеристики усилителя

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.

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.

4. Контрольные вопросы

1. Из каких соображений выбираются координаты рабочей точки (точки покоя) транзисторного усилительного каскада $I_{к.о.}$ и $U_{кэ.о.}$?
2. На чем основан эффект усиления колебаний напряжения в каскаде на транзисторе с ОЭ?
3. Объясните назначение разделительных конденсаторов на входе и выходе усилительного каскада. Какому условию должна удовлетворять емкость каждого конденсатора?
4. Что такое динамическая линия нагрузки? Какому соотношению соответствует угол наклона этой линии?
5. Укажите связь между мгновенными значениями 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.
6. Укажите связь между амплитудными значениями переменных составляющих напряжения $U_{бэ.м.}$, токов $I_{б.м.}$ и $I_{к.м.}$, напряжения $U_{кэ.м.}$.
7. Чем определяется входное сопротивление усилительного каскада? Почему величина $h_{11э}$ зависит от тока покоя? Как влияет ООС на входное сопротивление транзистора $R_{вх.тр.}$?
8. От каких параметров транзистора зависит коэффициент усиления каскада с ОЭ? Почему на усиление влияет сопротивление нагрузки?
9. Объясните действие последовательной ООС по току в однокаскадном усилителе на биполярном транзисторе. От чего зависит глубина ООС?
10. Какими факторами обусловлено снижение коэффициента усиления в области нижних частот в усилителе напряжения переменного тока? От каких параметров компонентов усилителя зависит нижняя граничная частота?
11. Какими факторами обусловлено уменьшение коэффициента усиления в области верхних частот? От каких параметров

компонентов схемы усилительного каскада зависит верхняя граничная частота?

12. Чему равен фазовый сдвиг сигнала в области средних частот в усилительном каскаде с ОЭ? Поясните ответ диаграммами напряжений и токов.
13. Чем обусловлен дополнительный фазовый сдвиг в усилительном каскаде в области нижних частот? Каково направление этого сдвига?
14. 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 $U_{кэ.о}$; $I_{к.о}$; $I_{б.о}$; $R_б$ и результаты моделирования статического режима;
- 5) результаты исследования работы каскада на переменном токе: измерение $h_{11э}$, расчет $R_{ос}$, измерение коэффициента усиления $K_{и.ос}$ и $R_{вх.тр.ос}$; построение временных диаграмм напряжений в усилителе;
- 6) результаты измерения частотных характеристик усилителя: расчет C_1 и C_2 , график АЧХ и значения f_H и f_V .

Библиографический список

1. Электротехника и электроника: Учебное пособие / М.В. Бобырь, В.И. Иванов, В.С. Титов, А.С. Ястребов. В 2 кн. – Курск: Курск. гос. тех. ун-т. – 2009. Кн. 2. – Электроника. – 240 с.
2. Гусев, В.Г. Электроника и микропроцессорная техника: Учебник для вузов. / В.Г. Гусев, Ю.М. Гусев. Изд. 3-е. – М.: Высш. шк., 2004. – 790 с.
3. Опадчий, Ю.Ф. 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.

4. Лачин, В.И. Электроника: Учебное пособие / В.И. Лачин, Н.С. Савелов. Изд. 6-е. – Ростов н / Д: Изд-во “Феникс”, 2007. – 703 с.

