

Лабораторная работа №4

Тема: «Исследование характеристик биполярного транзистора и усилителя на биполярном транзисторе»

Цель работы: Исследование вольт-амперных характеристик биполярного транзистора и усилителя на его основе.

Теоретическая часть

Биполярным транзистором называют полупроводниковый прибор, имеющий два взаимодействующих между собой $p-n$ перехода. В зависимости от последовательности чередования областей с различным типом проводимости различают $n-p-n$ -транзисторы и $p-n-p$ -транзисторы. Транзистор называется биполярным потому, что физические процессы в нем связаны с движением носителей обоих знаков (свободных дырок и электронов). Трехслойная структура $n-p-n$ -транзистора показана на рисунке 4.1,а. На рисунке 4.1,б показано условное обозначение $n-p-n$ -транзистора, на рисунке 4.1,в – условное обозначение $p-n-p$ -транзистора.

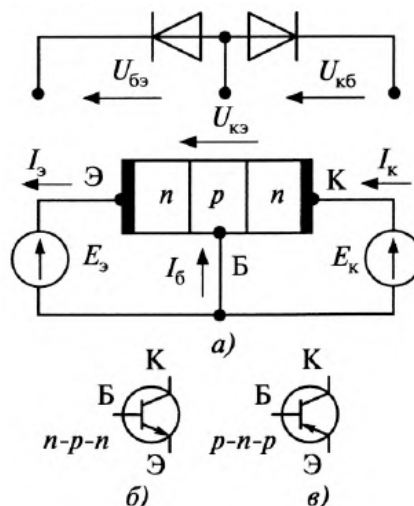


Рисунок 4.1 – Структура $n-p-n$ -транзистора (а) и условные обозначения $n-p-n$ -транзистора (б) и $p-n-p$ -транзистора (в)

Средний слой биполярного транзистора называют базой (Б), один крайний слой называют коллектором (К), другой крайний слой называют эмиттером (Э). В зависимости от полярности напряжений, приложенных к электродам транзистора, различают следующие режимы его работы: линейный (усилительный), насыщения,

отсечки, инверсный. В линейном режиме эмиттерный переход смещен в прямом направлении, а коллекторный – в обратном. В режиме насыщения оба перехода смещены в прямом направлении. В режиме отсечки оба перехода смещены в обратном направлении. В инверсном режиме коллекторный переход смещен в прямом направлении, а эмиттерный – в обратном.

Биполярные транзисторы применяются в схемах усилителей, генераторов и преобразователей электрических сигналов, изготавливаются из кремния, германия или арсенида галлия и делятся на низкочастотные (до 3 МГц), среднечастотные (до 30 МГц), высокочастотные (до 300 МГц) и сверхвысокочастотные (более 300 МГц). По мощности транзисторы бывают маломощные (до 300 мВт), средней мощности (до 1,5 Вт) и большой мощности (более 1,5 Вт). Работа транзистора основана на управлении токами электродов в зависимости от приложенных к его переходам напряжений. В линейном режиме приложенное к базе напряжение $U_{бэ}$ (для $n-p-n$ -транзистора $U_{бэ} > 0$) открывает переход база-эмиттер. Свободные электроны инжектируются из эмиттера в базу, образуя ток эмиттера $I_э$ в цепи эмиттера. Большая часть электронов, инжектированных из эмиттера в базу, втягивается сильным электрическим полем $p-n$ перехода между базой и коллектором, образуя ток коллектора $I_к$ в цепи коллектора. Незначительная часть свободных электронов, инжектированных из эмиттера в базу, образует ток $I_б$.

В схеме (рисунок 4.1,а) база является общим электродом входной и выходной цепи. Такая схема включения биполярного транзистора называется *схемой с общей базой* (ОБ). Для усиления сигналов применяют также схемы включения биполярных транзисторов с *общим коллектором* (ОК) и *общим эмиттером* (ОЭ).

Схема с общим эмиттером наиболее распространена, исследуется в лабораторной работе и показана на рисунке 4.2. В этой работе напряжение на нелинейном переходе база-эмиттер $U_{бэ} = E_б - I_б R_б$. Напряжение на переходе коллектор-эмиттер $U_{кэ} = E_к - I_к R_к$.

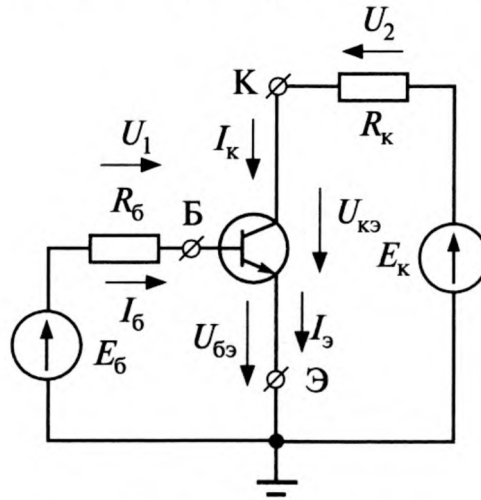


Рисунок 4.2 – Схема включения транзистора с общим эмиттером

Расчет статического режима транзистора для усиления малого сигнала выполняют графически. Сначала на выходных характеристиках (рисунок 4.3,б) проводят нагрузочную прямую для заданных E_k , R_k и находят номинальный ток базы I_6^* , при котором напряжение $U_{кэ}$ примерно составляет $E_k/2$. Затем по входной характеристике для заданного E_6 находят R_6 .

В линейном режиме усиления малого сигнала биполярный транзистор описывают системой уравнений четырехполюсника в H -параметрах:

$$u_{63} = h_{11}i_6 + h_{12}u_{к3};$$

$$i_k = h_{21}i_6 + h_{22}u_{к3},$$

$$h_{11} = \left. \frac{\Delta u_{63}}{\Delta i_6} \right|_{u_{к3}=\text{const}}; \quad h_{12} = \left. \frac{\Delta u_{63}}{\Delta u_{к3}} \right|_{i_6=\text{const}};$$

$$h_{21} = \left. \frac{\Delta i_k}{\Delta i_6} \right|_{u_{к3}=\text{const}}; \quad h_{22} = \left. \frac{\Delta i_k}{\Delta u_{к3}} \right|_{i_6=\text{const}}.$$

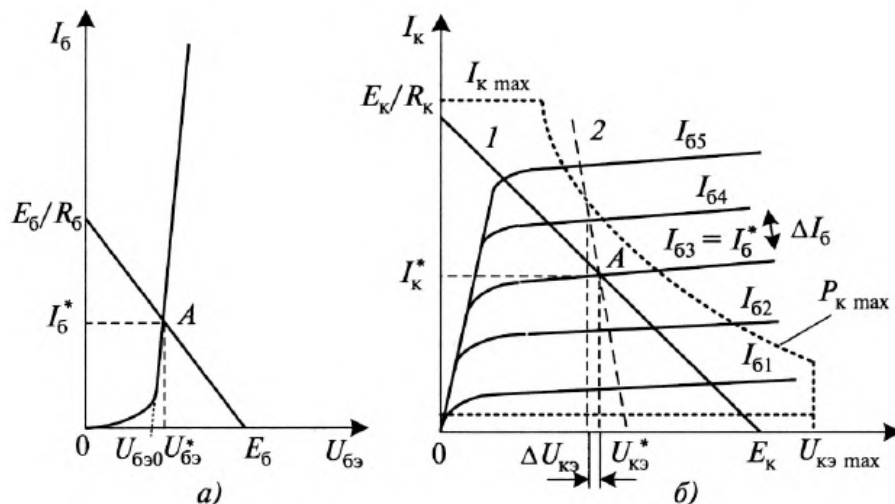


Рисунок 4.3 – Входная (а) и выходные (б) характеристики биполярного транзистора

H -параметры биполярного транзистора можно рассчитать по вольт-амперным характеристикам и определить экспериментально.

Их типовые значения находятся в пределах:

$$h_{11} = 10^3 \dots 10^4; \quad h_{12} = 2 \cdot 10^{-4} \dots 2 \cdot 10^{-3};$$

$$h_{21} = 20 \dots 200; \quad h_{22} = 10^{-5} \dots 10^{-6}.$$

Пренебрегая малым значением параметра h_{12} , получим схему замещения биполярного транзистора (рисунок 4.4), включенного по схеме с ОЭ, в режиме малого сигнала. В этой схеме $h_{11} = R_{вх}$, $1/h_{22} = R_{вых}$ – входное и выходное сопротивления; $h_{21}i_б$ – источник тока, управляемый током базы $i_б$. Таким образом, биполярный транзистор представляет собой источник тока, управляемый током.

Эта схема замещения используется на постоянном токе и нижних частотах, когда инерционность транзистора можно не учитывать. В более общем случае H -параметры транзистора являются комплексными величинами, в схему замещения добавляются емкости между базой и коллектором C_k и базой и эмиттером $C_э$.

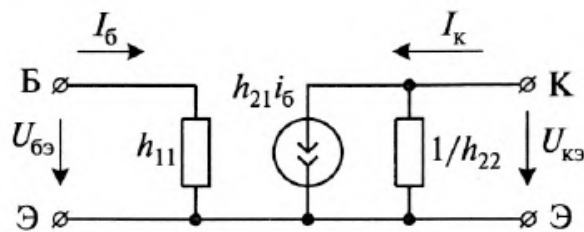


Рисунок 4.4 – Схема замещения биполярного транзистора на постоянном токе и нижних частотах

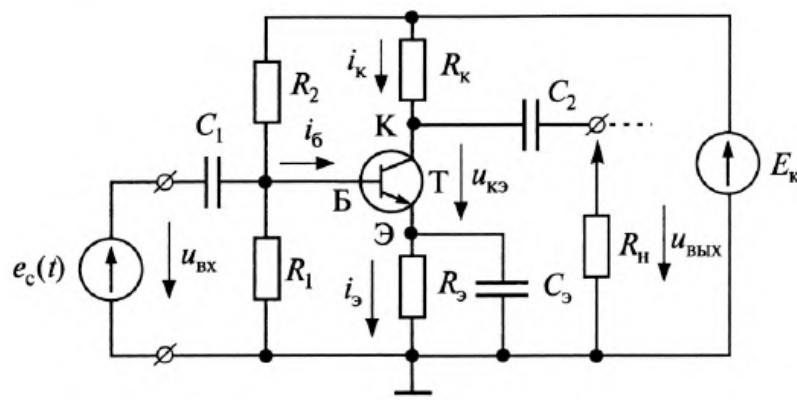


Рисунок 4.5 – Схема усилительного транзисторного каскада с общим эмиттером

Для работы в линейном режиме на выходных характеристиках транзистора (рис. 4.3,б) в режиме покоя выбирают рабочую точку А в центре линии нагрузки 1

цепи коллектора. В рабочей точке по выходным характеристикам находят ток коллектора I_k^* и ток базы I_b^* . Область рабочих режимов транзистора на рисунке 4.3,6 отмечена пунктирными линиями и ограничивается максимальными допустимыми значениями тока коллектора $I_{k \max}$, напряжения $U_{k \max}$, мощности рассеяния $P_{k \max} \approx U_{kэ} I_{kэ}$ и нелинейными искажениями при малых значениях тока коллектора.

Для стабилизации рабочей точки в линейных усилительных каскадах обычно применяют схему с общим эмиттером и отрицательной обратной связью (рисунок 4.5). Резисторы $R1$, $R2$ задают номинальный ток базы. Резистор $R_э$ создает отрицательную обратную связь по постоянному току и служит для стабилизации режима транзистора. Емкость $C_э$ называется блокировочной, устраняет отрицательную обратную связь по переменной составляющей и увеличивает усиление. Входной переменный сигнал через разделительную емкость $C1$ поступает на базу транзистора и усиливается. Усиленный выходной сигнал с резистора R_k через разделительную емкость $C2$ поступает на нагрузку R_n , которой может быть следующий усилительный каскад.

Если напряжение входного сигнала $u_{вх}$ невелико, то работу усилительного транзисторного каскада можно представить в виде наложения режима покоя с постоянным источником ЭДС E_k и с постоянными составляющими тока базы I_b^* , тока коллектора I_k^* и тока эмиттера $I_э^*$, соответствующими точке А на рабочей характеристике, и режима малого сигнала с переменными составляющими i_b , i_k , $u_{вх}$, $u_{вых}$.

В режиме покоя рабочая точка находится на пересечении нагрузочной прямой $I_k = (E - U_{кэ}) / (R_k + R_э)$ с выходной ВАХ, соответствующей номинальному току базы I_b^* .

Схема замещения режима малого сигнала на низких частотах показана на рисунке 4.6. В этой схеме сопротивления $R1$ и $R2$ схемы (рисунок 4.5) не учитываются, емкости для переменного сигнала сначала считаются короткозамкнутыми.

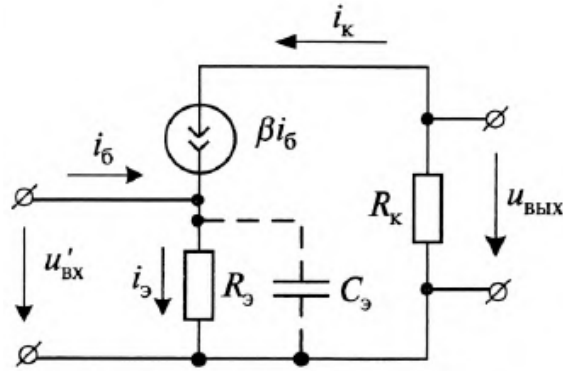


Рисунок 4.6 – Схема замещения усилительного транзисторного каскада для малого переменного сигнала

Для схемы замещения без учета емкостей коэффициент усиления по напряжению в режиме холостого хода

$$K'_{Ux} = \frac{u_{\text{ВЫХ}}}{u_{\text{ВХ}}} = -\frac{R_K}{R_э + r_э},$$

где $r_э = 25 \text{ мВ}/I_э$ – дифференциальное сопротивление перехода база-эмиттер; $I_э$ – постоянный ток эмиттера.

Отрицательное значение комплексного коэффициента усиления напряжения отражает изменение фаз выходного напряжения на 180° относительно входного напряжения. Если в схеме учесть емкость $C_э$, то коэффициент усиления в режиме холостого хода станет равным

$$K_{Ux} = -\frac{R_K}{R_э + r_э} \sqrt{1 + (\omega C_э R_э)^2}.$$

Входное сопротивление по переменному току определяется как параллельное соединение входного сопротивления транзистора $r_{бэ} = h_{11} = \beta r_э$ и сопротивления R_6 , которое служит для установки рабочей точки каскада.

В схеме (рисунок 4.5)

$$R_6 = \frac{R_1 R_2}{R_1 + R_2}; \quad R_{\text{ВХ}} = \frac{r_{бэ} R_6}{r_{бэ} + R_6}.$$

Входная разделительная емкость C_1 образует с входным сопротивлением $R_{\text{ВХ}}$ делитель напряжения, и коэффициент передачи входной цепи составит

$$K_{\text{ВЦ}} = \frac{R_{\text{ВХ}} \omega C_1}{\sqrt{1 + (R_{\text{ВХ}} \omega C_1)^2}}.$$

Коэффициент усиления транзисторного каскада с общим эмиттером на низких частотах можно рассчитать по формуле

$$K_{U_{xHЧ}} = K_{Ux} K_{BЦ}.$$

С учетом сопротивления нагрузки R_H на высокой частоте для малого переменного сигнала соответствует нагрузочная прямая 2, показанная на рисунке 4.3 пунктирной линией и определяемая уравнением.

$$u_{кэ} = -\frac{R_K R_H}{R_H + R_K} i_K.$$

Ток в цепи нагрузки

$$i_H = -\frac{R_K}{R_H + R_K} i_K.$$

На высоких частотах применяют более точные модели транзисторов. Наиболее распространенными являются модели, основанные на схеме замещения Джаколетто (рисунок 4.7), в которой сопротивление r_6 – распределенное сопротивление базы, $g_э$ и $C_э$ отражают полную проводимость эмиттерного перехода, $g_к$ и $C_к$ учитывают влияние коллекторного перехода, проводимость $g_{кэ}$ учитывает связь между эмиттером и коллектором. Усижительные свойства транзистора учтены крутизной S .

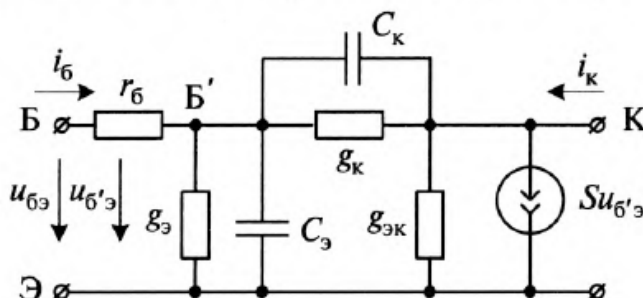


Рисунок 4.6 – Схема замещения транзистора на высокой частоте

Практическая часть

Задание 1. Исследование входной характеристики биполярного транзистора в схеме с общим эмиттером и определение статического коэффициента передачи тока.

1. Собрать схему, показанную на рисунке 4.8. В компьютерной модели (рисунок 4.8) использован транзистор BC140 (аналог отечественного транзистора КТ630). Модель транзистора может быть задана преподавателем. Транзистор работает в усилительном режиме: эмиттерный переход смещён в прямом направлении, а коллекторный переход в обратном направлении (на эмиттер

поступает отрицательный потенциал, а на базу и коллектор положительный). В этом режиме транзистор обеспечивает максимальное усиление сигнала по току, напряжению и мощности.

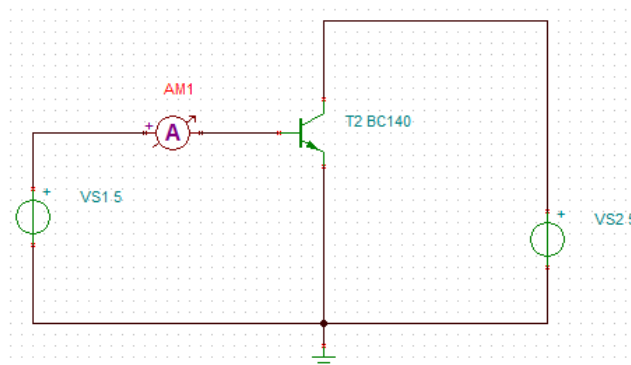


Рисунок 4.8 – Схема компьютерного моделирования биполярного транзистора

Для размещения на схеме транзистор выберите во вкладке *Полупроводники* - *NPN биполярный транзистор – Тип BC140*.

2. В схеме установить $VS1 = VS2 = 5$ В. Ток базы транзистора измеряется амперметром *AM1*.

3. Для снятия входных характеристик транзистора при различных значениях $U_{кэ}$ воспользуйтесь командой *Выбор объекта управления* и выделите *VS2 – Выбрать* – и установите параметры *Начальное значение* = 5, *Конечное значение* = 15, *Количество случаев* = 3 (рисунок 4.9).

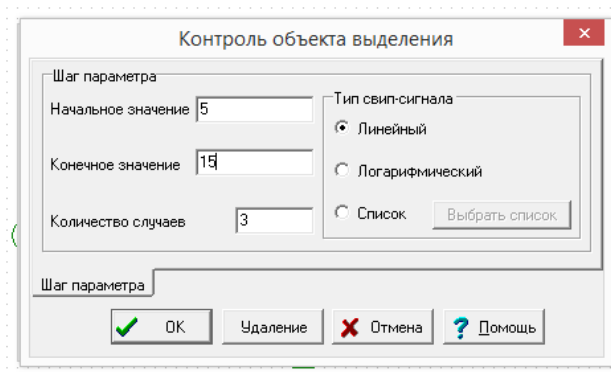


Рисунок 4.9 – Окно настройки многовариантного задания

4. В строке меню выберите *Анализ – Анализ постоянного тока – Переходные характеристики постоянного тока*. В диалоговом окне (рисунок 4.10) установите начальное значение анализа *Начальное значение* = 0 В, *Конечное значение* = 1 В, входная переменная *Ввод VS1*. Нажмите *OK*.

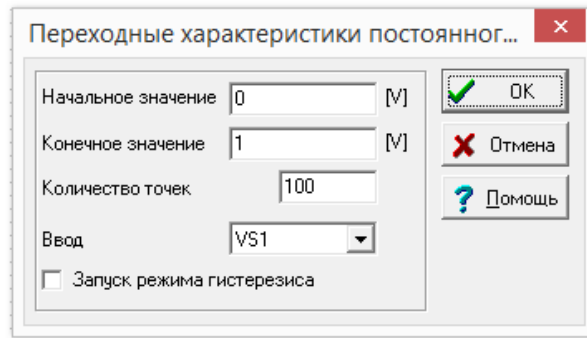


Рисунок 4.10 – Окно переходных характеристик постоянного тока

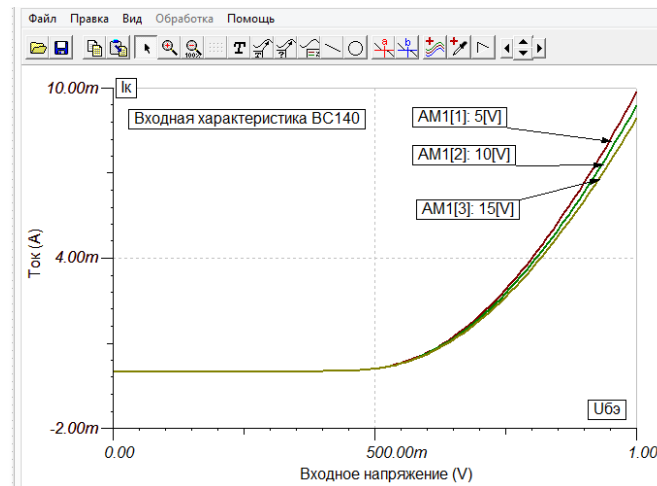


Рисунок 4.11 – Входные вольт-амперные характеристики транзистора

5. Откроется окно результатов (рисунок 4.11) с тремя графиками. Для идентификации графиков выберите *Авто метка* и укажите на интересующий график.

Задание 2. Исследование выходных характеристик биполярного транзистора в схеме с общим эмиттером.

6. Схема для снятия выходных характеристик биполярного транзистора показана на рисунке 4.12. К базе транзистора подключается источник тока.

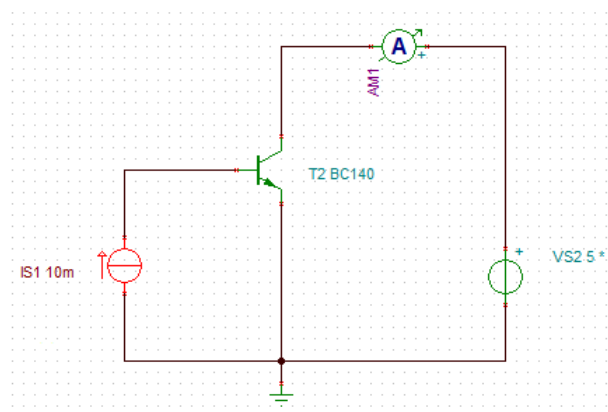


Рисунок 4.12 – Схема исследования выходных характеристик транзистора

7. Для снятия выходной характеристики при различных значениях тока базы нужно сделать источник тока $IS1$ управляемым объектом, используя команду *Выбор объекта управления*. Задать начальное значение тока 250 мкА, конечное значение 2 мА, число вариантов 8 (рисунок 4.13). В строке меню выберите *Анализ – Анализ постоянного тока – Переходные характеристики постоянного тока*, изменяя $VS2$ от 0 до 10 В и зафиксируйте полученные характеристики (рисунок 4.14).

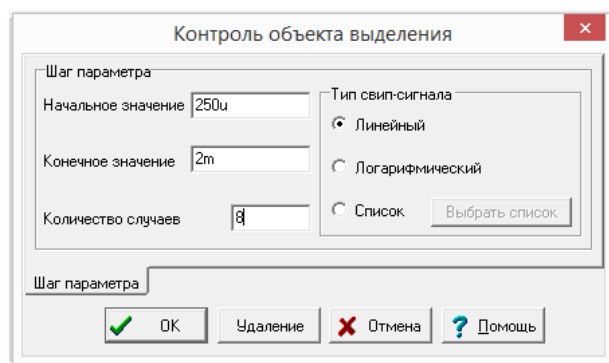


Рисунок 4.13 – Окно настройки многовариантного задания

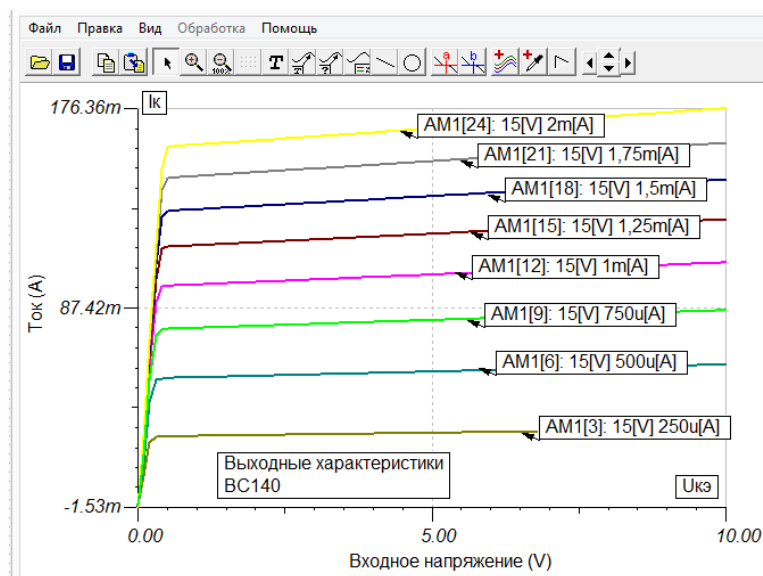


Рисунок 4.14 – Выходные вольт-амперные характеристики транзистора

При увеличении тока базы транзистора уменьшается высота потенциального барьера эмиттерного перехода, что обуславливает увеличение инжекции носителей заряда, а, следовательно, и увеличение тока через коллектор.

Задание 3. Выбор рабочей точки транзисторного каскада с общим эмиттером.

8. Собрать схему транзисторного усилителя (рисунок 4.15). Установить напряжение питания $VS1 = 10$ В. Напряжение питания $VS1$ и номиналы резисторов могут быть заданы преподавателем. Переменный входной сигнал не подключать, ключ 1 должен быть разомкнут.

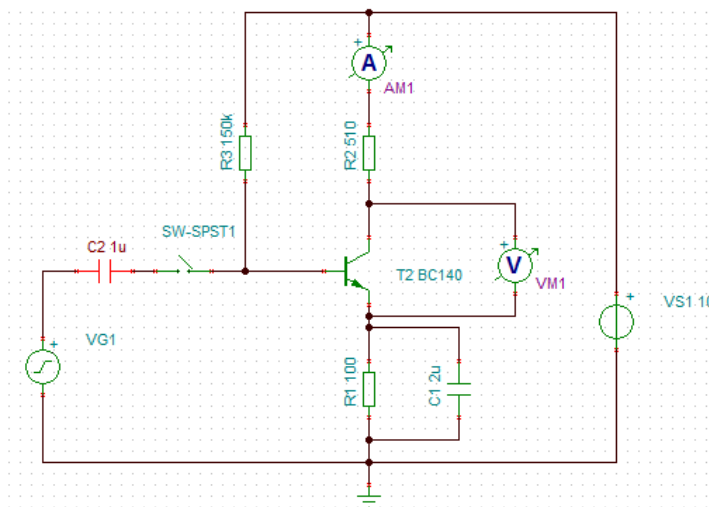


Рисунок 4.15 – Схема усилительного транзисторного каскада с общим эмиттером

9. Измерить и записать значения постоянной составляющей тока коллектора I_k ($AM1$) и напряжения $U_{кэ}$ ($VM1$). Измерение напряжений и токов в схеме можно выполнить и без включения измерительных приборов. Чтобы получить полный отчёт обо всех напряжениях и токах в схеме, выберите в главном меню *Анализ – Анализ постоянного тока – Таблица результатов постоянного тока* (рисунок 4.16).

AM1	6,74mA
I_R1[0,1]	-6,8mA
I_R2[6,5]	-6,74mA
I_R3[4,2]	-58,95uA
I_VG1[3,0]	0A
I_VS1[2,0]	-6,8mA
V_AM1[2,5]	0V
V_C1[0,1]	-679,99mV
V_C2[3,7]	-1,16V
V_R1[0,1]	-679,99mV
V_R2[6,5]	-3,44V
V_R3[4,2]	-8,84V
V_SW-SPST1[7,4]	-2,22E-16V
V_VG1[3,0]	0V
V_VM1[6,1]	5,88V
V_VS1[2,0]	10V
VM1	5,88V
VP_1	679,99mV
VP_2	10V
VP_3	0V
VP_4	1,16V
VP_5	10V
VP_6	6,56V
VP_7	1,16V

Показать

☒ Узловые напряжения ☒ Токи

☒ Другие напряжения ☒ Выводы

Отмена Помощь

Рисунок 4.16 – Таблица результатов анализа схемы на постоянном токе

10. Регулируя сопротивление $R3$ необходимо установить напряжение $U_{кэ} = 5$ В. И повторно измерить напряжения и токи в схеме (рисунок 4.17).

AM1	8,19mA
L_R1[0,1]	-8,26mA
L_R2[6,5]	-8,19mA
L_R3[4,3]	-70,12uA
L_VG1[2,0]	0A
L_VS1[3,0]	-8,26mA
V_AM1[3,5]	0V
V_C1[0,1]	-825,56mV
V_C2[2,7]	-1,31V
V_R1[0,1]	-825,56mV
V_R2[6,5]	-4,17V
V_R3[4,3]	-8,69V
V_SW-SPST1[7,4]	-2,22E-16V
V_VG1[2,0]	0V
V_VM1[6,1]	5V
V_VS1[3,0]	10V
VM1	5V
VP_1	825,56mV
VP_2	0V
VP_3	10V
VP_4	1,31V
VP_5	10V
VP_6	5,83V
VP_7	1,31V

Показать

☒ Узловые напряжения ☒ Токи

☒ Другие напряжения ☒ Выводы

Рисунок 4.17 – Таблица результатов анализа схемы после изменения сопротивления

Задание 4. Исследование работы транзисторного усилителя с общим эмиттером в режиме малого сигнала.

11. Необходимо собрать схему (рисунок 4.18). Подключить источник переменного сигнала, замкнув ключ 1. Установить параметры генератора напряжения: Амплитуда генератора – DC уровень = 0, параметр *сигнал* установить *синусоидальный* с амплитудой 50 мВ и частотой 1 кГц.

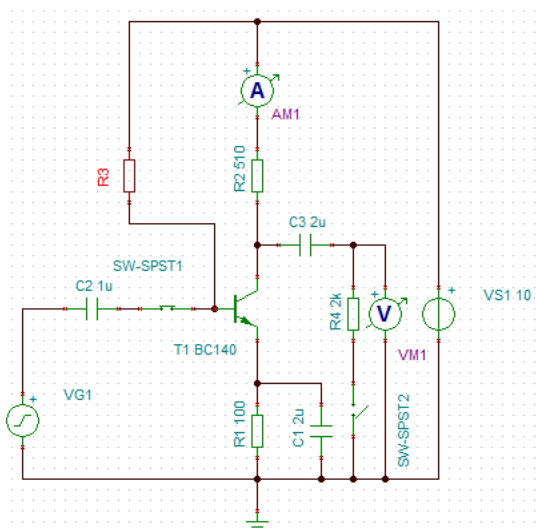


Рисунок 4.18 – Схема исследования транзисторного усилителя в режиме малого сигнала

12. Исследовать амплитудно-частотные и фазо-частотные характеристики транзисторного усилителя в режиме холостого хода. Ключ 2 разомкнуть. В главном меню выбираем *Анализ – Анализ переменного тока – Переходные характеристики переменного тока*. Частота меняется от 10 Гц до 100 кГц, масштаб логарифмический (рисунок 4.19). В меню *Диаграмма* установить метку *Амплитуда и фаза*. Получим искомые амплитудно-частотные и фазо-частотные характеристики транзисторного усилителя в режиме холостого хода (рисунок 4.20).

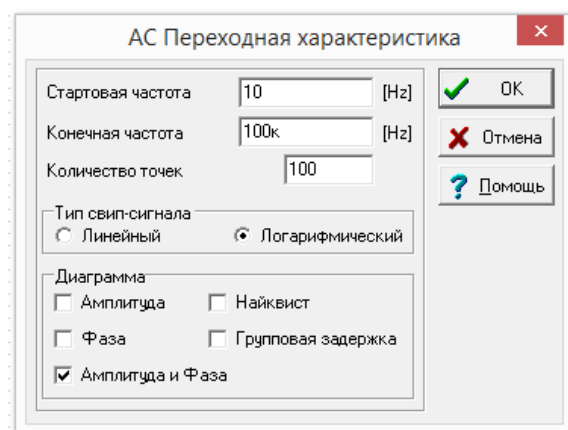


Рисунок 4.19 – Окно настройки многовариантного задания

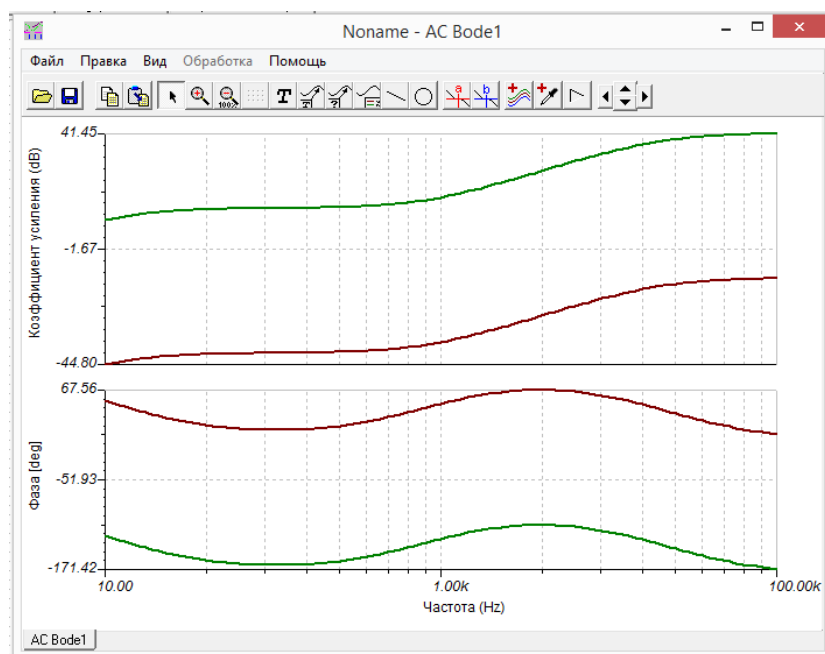


Рисунок 4.20 – Амплитудно-частотные и фазо-частотные характеристики транзисторного усилителя в режиме холостого хода

13. Подключить к транзисторному усилителю нагрузку $R_4 = 2 \text{ кОм}$. Для этого необходимо замкнуть нужно ключ 2 и повторить измерения по п. 12. Зафиксировать полученные амплитудно-частотные и фазо-частотные характеристики с подключенной нагрузкой.

Задание 5. Исследование искажений выходного сигнала.

14. В схеме (рисунок 4.18) с подключенной нагрузкой установить частоту сигнала 20 кГц. Амплитуду сигнала генератора V_{G1} сделать управляемым параметром и задать 10 значений от 10 до 100 мВ. В режиме *Анализ – Анализ переходных процессов* получить графики выходного сигнала на интервале 200...300 мкс (рисунок 4.21).

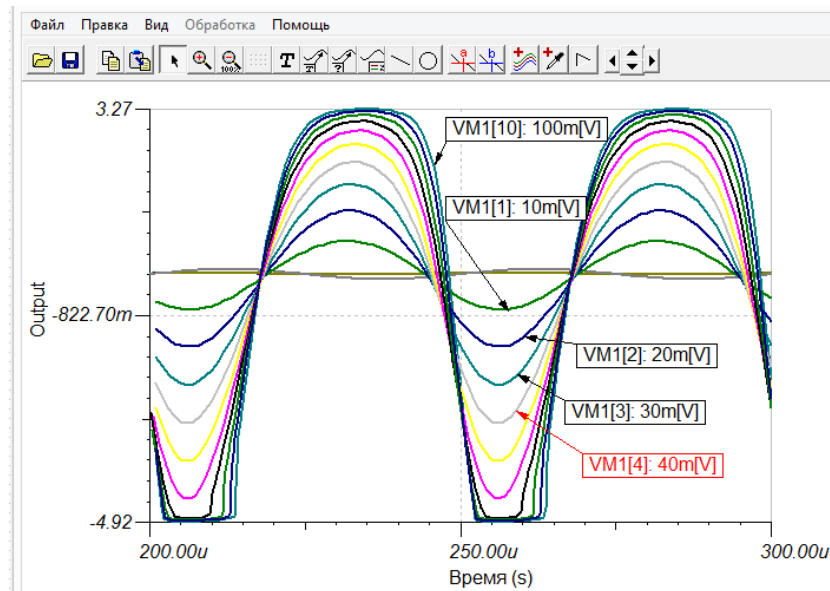


Рисунок 4.20 – Графики искажений выходного сигнала

Оформить отчет и сделать выводы.