

МИНИСТЕРСТВО ОБРАЗОВАНИЯ И НАУКИ РОССИЙСКОЙ ФЕДЕРАЦИИ

ФЕДЕРАЛЬНОЕ ГОСУДАРСТВЕННОЕ АВТОНОМНОЕ
ОБРАЗОВАТЕЛЬНОЕ УЧРЕЖДЕНИЕ ВЫСШЕГО ОБРАЗОВАНИЯ
«САМАРСКИЙ ГОСУДАРСТВЕННЫЙ АЭРОКОСМИЧЕСКИЙ
УНИВЕРСИТЕТ имени академика С.П.КОРОЛЕВА
(НАЦИОНАЛЬНЫЙ ИССЛЕДОВАТЕЛЬСКИЙ УНИВЕРСИТЕТ)» (СГАУ)

РАЗРАБОТКА И ИССЛЕДОВАНИЕ МОДЕЛИ БИПОЛЯРНОГО ТРАНЗИСТОРА В ПАКЕТЕ САПР

Рекомендовано редакционно-издательским советом федерального государственного автономного образовательного учреждения высшего образования «Самарский государственный аэрокосмический университет имени академика С.П. Королева (национальный исследовательский университет)» в качестве методических указаний

САМАРА
Издательство СГАУ
2015

УДК 621.373.8(075)

Составитель *А.Н. Муравьев*

Рецензент канд. техн. наук, доц. И. В. Л о ф и ц к и й

Разработка и исследование модели биполярного транзистора в пакете САПР: метод. указания / сост. *А.Н. Муравьев*. – Самара: Изд-во СГАУ, 2015. – 28 с.

В методических указаниях изложена методика разработки и исследования модели биполярного транзистора в пакете САПР OrCAD-PSpice. Приведены методы оценки точности модели и тестирование в реальной схеме.

Предназначены для студентов, обучающихся по специальности 210601 «Радиоэлектронные системы и комплексы» по направлениям подготовки бакалавров 210400 «Радиотехника», 200500 «Лазерная техника и лазерные технологии» по дисциплине «Прикладная информатика» и по специальности 201000 «Биотехнические системы и технологии» и выполняющих лабораторные работы по дисциплине «Основы компьютерного проектирования радиоэлектронных медицинских аппаратов».

Разработаны на кафедре радиотехники.

УДК 621.373.8(075)

1. КРАТКИЕ СВЕДЕНИЯ ИЗ ТЕОРИИ

Биполярный транзистор (БТ) – трёхполюсный полупроводниковый прибор с двумя $p-n$ -переходами. Он состоит из чередующихся областей полупроводника, имеющих электропроводность различных типов.

В зависимости от последовательности чередования n - и p -областей различают транзисторы $n-p-n$ - и $p-n-p$ -типов. На практике используются транзисторы обоих типов; принцип действия их одинаков. Основными носителями заряда в транзисторе $n-p-n$ -типа являются электроны, а в $p-n-p$ -транзисторе – дырки. Так как в кремнии электроны обладают большей подвижностью, чем дырки, то чаще используют транзисторы $n-p-n$ -типа.

На рис. 1 *а* изображена идеализированная структура биполярного $n-p-n$ -транзистора. На рис. 1 *б* приведено его условное графическое обозначение.

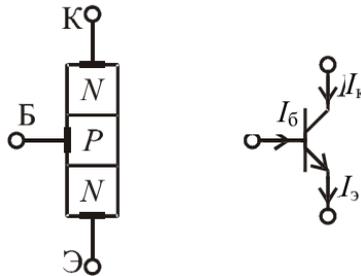


Рис. 1. Биполярный транзистор $n-p-n$ -типа

Центральная область транзистора, называемая базой, заключена между коллектором и эмиттером. Толщина базы мала и не превышает нескольких микрон. Переход между базой и эмиттером называется эмиттерным, а между базой и коллектором – коллекторным.

Структура реального транзистора несимметрична. Площадь коллекторного перехода значительно больше, чем эмиттерного. Каждый из $p-n$ -переходов транзистора может быть смещён либо в прямом, либо в обратном направлениях. В зависимости от этого различают четыре режима работы транзистора:

- 1) активный (усиления). Эмиттерный переход смещён в прямом направлении, а коллекторный – в обратном;
- 2) отсечки. Оба перехода смещены в обратном направлении;
- 3) насыщения. Оба перехода смещены в прямом направлении;
- 4) инверсный. Эмиттерный переход смещён в обратном направлении, а коллекторный – в прямом.

Рассмотрим подробнее активный режим, который используется для усиления аналоговых сигналов.

Активный режим

Так как эмиттерный переход смещён в прямом направлении, происходит инжекция носителей из эмиттера в базу. Поскольку область эмиттера легирована сильнее, чем область базы, поток электронов преобладает над потоком дырок. Из-за малой толщины базы почти все электроны, пройдя базу, достигают коллектора. Только малая доля электронов рекомбинирует в базе с дырками. Коллекторный переход смещён в обратном направлении, поэтому электроны, достигшие коллекторного перехода, втягиваются полем перехода в коллектор. Происходит экстракция электронов в коллектор.

Токи транзистора, работающего в активном режиме, связаны уравнениями:

$$I_{\text{к}} = \alpha \cdot I_{\text{б}}; \quad (1)$$

$$I_{\text{б}} = I_{\text{к}} + I_{\text{б}}. \quad (2)$$

Множитель α называют коэффициентом передачи тока эмиттера. У интегральных транзисторов $\alpha = 0,99-0,995$. Из равенств (1) следует, что

$$I_{\text{к}} = \frac{\alpha}{1 - \alpha} I_{\text{б}} = \beta \cdot I_{\text{б}}.$$

Множитель β называют коэффициентом усиления тока базы. Так как величина α близка к 1, то β может принимать большие значения. Для интегральных $n-p-n$ -транзисторов оно составляет от 50 до 200. Связь между напряжением эмиттерного перехода и током эмиттера имеет экспоненциальную форму:

$$I_{\text{б}} = I_{\text{б}0} e^{U_{\text{бэ}}/\varphi_{\text{т}}}. \quad (3)$$

Обратный ток эмиттерного перехода $I_{\text{б}0}$ обратно пропорционален ширине базы и прямо пропорционален площади эмиттерного перехода. В зависимости от размеров транзистора величина $I_{\text{б}0}$ составляет от 10^{-12} до 10^{-18} А. Ток $I_{\text{б}0}$ зависит от температуры, удваиваясь при увеличении температуры примерно на 7° С. В формуле (3) $\varphi_{\text{т}}$ – тепловой потенциал, равный 26 мВ при 27° С.

Таким образом, работа биполярного транзистора в активном режиме основана на сочетании процессов инжекции носителей через один переход и собирания их на другом переходе. Концентрация примесей в эмиттере значительно больше, чем в базе и коллекторе. Поэтому электронная составляющая тока $n-p-n$ -транзистора является преобладающей. В активном режиме, в схеме включения общая база, ток коллектора управляется током эмиттера (или напряжением эмиттерного перехода) и почти не зависит от напряжения на коллекторном переходе, поскольку последний смещен в обратном направлении. Активный режим является основным для усиления сигналов.

Вольт-амперные характеристики биполярных транзисторов

Рассмотрим транзистор, включенный по схеме с общим эмиттером (рис. 2). Название «схема с общим эмиттером» объясняется тем, что эмиттер является общим для входной и выходной цепей. Входными величинами являются напряжение база-эмиттер $U_{бэ}$ и ток базы $I_б$, а выходными – напряжение коллектор-эмиттер $U_{кэ}$ и ток коллектора $I_к$.

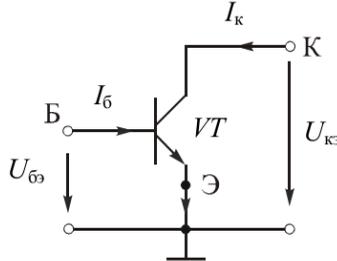


Рис. 2. Транзистор, включенный по схеме с общим эмиттером

Входная характеристика биполярного транзистора – это зависимость тока базы $I_б$ от напряжения база-эмиттер $U_{бэ}$ при фиксированном значении напряжения коллектор-эмиттер $U_{кэ}$:

$$I_б = f(U_{бэ})|_{npu U_{кэ}} = \text{const.}$$

Входная характеристика кремниевого биполярного транзистора показана на рис. 3 а. Если эмиттерный переход смещён в прямом направлении, то входная характеристика похожа на прямую ветвь ВАХ диода.

Выходной характеристикой называют зависимость тока коллектора $I_к$ от напряжения коллектор-эмиттер $U_{кэ}$ при фиксированном токе базы:

$$I_к = f(U_{кэ})|_{npu I_б} = \text{const.}$$

Выходная характеристика показана на рис. 3б. Область отсечки лежит ниже кривой для тока базы $I_б = 0$. В области насыщения величина напряжения $U_{кэ}$ столь мала, что становится недостаточной для создания обратного смещения на коллекторном переходе. В режиме насыщения ток коллектора не зависит от тока базы и все ветви выходной характеристики сливаются в одну.

В активной области ток коллектора очень слабо зависит от напряжения коллектор-эмиттер и пропорционален току базы, а ветви выходной характеристики расположены почти горизонтально. Это объясняется тем, что коллекторный переход смещён в обратном направлении. Таким образом, в активном режиме биполярный транзистор ведёт себя как источник тока, управляемый током базы.

Как видно из рис. 3а, ток эмиттера и напряжение база-эмиттер связаны экспоненциальной зависимостью, описывающей вольт-амперную харак-

теристику диода, смещенного в прямом направлении. Подставляя выражение (3) в формулу (1), получаем связь между током коллектора и напряжением база-эмиттер:

$$I_K = \alpha I_{30} e^{U_{63}/\varphi_T}. \quad (4)$$

Равенство (4) справедливо для активного режима.

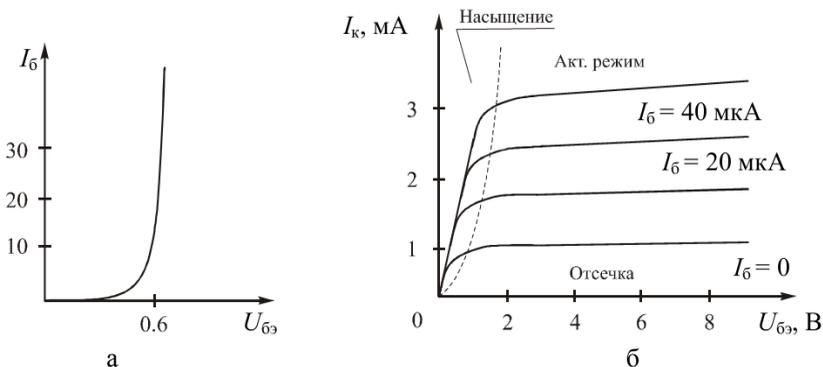


Рис. 3. Входные (а) и выходные (б) характеристики биполярного транзистора

Малосигнальные схемы замещения транзистора

В общем случае транзистор представляет собой активный (способный преобразовывать энергию источника сигнала) нелинейный четырехполюсник (рис. 4). Его можно описать семействами характеристик – нелинейными функциями двух переменных.

$$\begin{cases} i_2 = f_1(i_1, u_2) \\ u_1 = f_2(i_1, u_2) \end{cases}$$

В зависимости от схемы включения транзистора величинам i_1 , i_2 , u_1 , u_2 соответствуют те или иные реальные токи и напряжения.

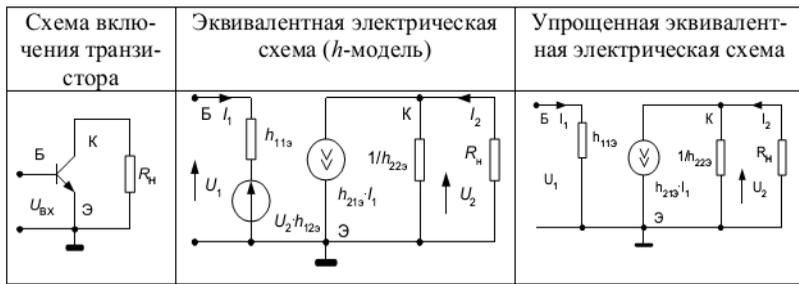


Рис. 4. Варианты схем замещения биполярного транзистора

В упрощенных эквивалентных электрических схемах пренебрегаем генератором напряжения $h_{123} \cdot U_2$, т.к. параметр h_{123} очень мал ($\sim 10^{-3} - 10^{-4}$).

Определение h -параметров по характеристикам

Низкочастотные значения h -параметров транзистора можно найти с помощью семейств входных и выходных характеристик. Для этого:

1. Отмечают на характеристиках положение рабочей точки по постоянному току, в которой определяются h -параметры.
2. Определяются малые приращения токов и напряжений относительно рабочей точки и рассчитываются h -параметры.
3. Параметры h_{22} и h_{21} определяют по выходным характеристикам, как показано на рис. 5.

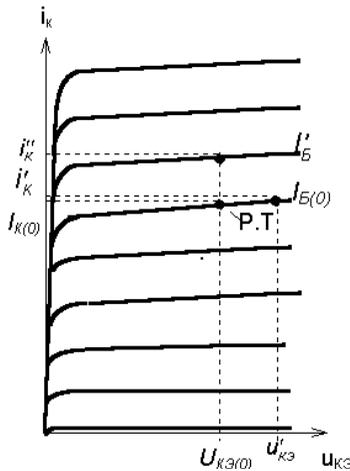


Рис. 5. Определение параметров h_{223} и h_{213} транзистора

Параметр h_{223} определяется по наклону выходной характеристики и имеет физический смысл выходной проводимости транзистора.

$$h_{223} = \left. \frac{\Delta i_k}{\Delta u_{kэ}} \right|_{i_B = \text{const.}} \quad (5)$$

Условие $i_B = \text{const}$ эквивалентно равенству нулю переменной составляющей $I_{Bм}$. Отметим, что приращения выбираются вдоль характеристики соответствующей току базы покоя, т.е. снятой при $i_B = I_B(0)$. По характеристикам определяем

$$\begin{aligned} \Delta i_k &= I_K' - I_K(0); \\ \Delta u_{kэ} &= U_{kэ}' - U_{kэ}(0). \end{aligned}$$

Далее по формуле (5) определяем выходную проводимость транзистора. Выходное сопротивление определяется как обратная величина от выходной проводимости:

$$R_{кэ} = \frac{1}{h_{22э}}.$$

Параметр $h_{21э}$ находится при заданном напряжении коллектора $U_{кэ0} = \text{const}$, проходящем через рабочую точку, и имеет физический смысл коэффициента усиления по току.

$$h_{21э} = \left. \frac{\Delta i_k}{\Delta i_б} \right|_{u_{кэ} = \text{const}}. \quad (6)$$

По характеристикам определяем

$$\begin{aligned} \Delta i_k &= I_k'' - I_k(0); \\ \Delta i_б &= I_б' - I_б(0). \end{aligned}$$

Далее по формуле (6) определяем коэффициент усиления по току транзистора.

4. Параметры $h_{11э}$ и $h_{12э}$ определяются аналогично по входным характеристикам транзистора (рис. 6).

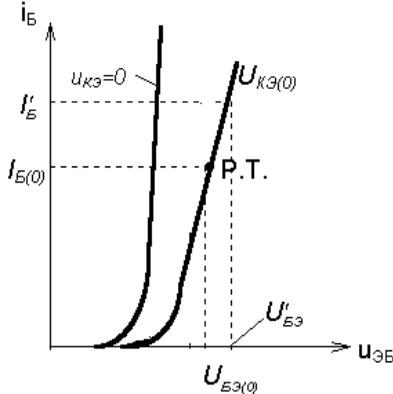


Рис. 6. Определение параметра $h_{11э}$ транзистора

Параметр $h_{11э}$ транзистора определяется на линейном участке входной характеристики и имеет физический смысл входного сопротивления транзистора:

$$h_{11э} = \left. \frac{\Delta u_{бэ}}{\Delta i_б} \right|_{u_{кэ} = \text{const}}. \quad (7)$$

По характеристикам определяем

$$\Delta u_{бэ} = U'_{бэ} - U_{бэ}(0);$$

$$\Delta i_6 = I_6' - I_6(0).$$

Параметр h_{12} определить затруднительно, поэтому его можно исключить или принять равным $10^{-3} \div 10^{-4}$. Пример значений h параметров для маломощных транзисторов:

$$h_{11} = 0,14 \text{ кОм}; \quad h_{12} = 4,3 \cdot 10^{-4}; \quad h_{21} = 45; \quad h_{22} = 1,8 \cdot 10^{-4} \text{ См}.$$

Величины h параметров транзисторов приводятся в справочниках, однако более полно свойства транзисторов отражают физические схемы замещения, отражающие принцип работы и более полно учитывающие реальные процессы.

Физическая схема замещения биполярного транзистора для анализа в активном режиме представлена на рис. 7.

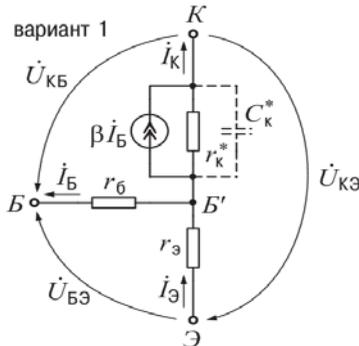


Рис. 7. Физическая схема замещения биполярного транзистора

Все величины, выступающие в качестве параметров элементов физических эквивалентных схем, имеют четкий физический смысл:

- r_6 – дифференциальное сопротивление базовой области транзистора, равно сумме распределенного сопротивления базы r_6' и ее диффузионного сопротивления r_6'' : $r_6 = r_6' + r_6''$, типичными для маломощных планарных транзисторов являются значения $r_6 \approx 10 \dots 100 \text{ Ом}$;
- r_3 – дифференциальное сопротивление эмиттера, на практике часто соблюдается соотношение:

$$r_3 \approx 0,026 / I_{30} = 0,026 / (I_{K0} + I_{60}); \quad (8)$$

- r_K – дифференциальное сопротивление коллектора в схеме с ОБ, обычно это сопротивление гораздо больше r_3 и r_6 и составляет десятки или сотни килоом;
- C_K – емкость коллекторного перехода в схеме с ОБ;
- β – дифференциальный коэффициент передачи тока базы в схеме с ОЭ,

- r_k^* – дифференциальное сопротивление коллектора в схеме с ОЭ, $r_k^* \approx r_k(\beta + 1)$;
- C_k^* – емкость коллекторного перехода в схеме с ОЭ, $C_k^* \approx C_k(\beta + 1)$;

Параметры физических эквивалентных схем могут быть выражены через дифференциальные параметры транзистора-четырёхполосника (см. табл. 1). Следует только понимать, что такие формулы верны лишь с определенной точностью, поскольку имеются некоторые различия между физическими моделями транзисторов и моделью линейного проходного четырехполосника.

Табл. 1. Связь физических параметров биполярного транзистора с его дифференциальными h -параметрами

Пар-р	ОЭ
β	$h_{12э}$
$r_э$	$\frac{h_{12э}}{h_{22э}}$
r_k	$(1 + h_{21э}) \frac{1 - h_{12э}}{h_{22э}}$
$r_б$	$h_{11э} - \frac{h_{12э}}{h_{22э}}(1 + h_{21э})$

При прямом использовании формул из таблицы возможна ситуация с несовместимостью параметров. Поэтому рекомендуется вначале рассчитать сопротивление $r_э$, исходя из выбранного режима по постоянному току (по формуле (8)), а затем уточнить величину $h_{12э}$. Далее можно использовать формулы из таблицы для расчета величин r_k , $r_б$ и β . Емкость коллекторного перехода C_k можно взять из справочника.

Усилительный каскад на биполярном транзисторе

Усилительный каскад должен содержать нелинейный управляющий элемент (транзистор), источник электрической энергии E_k и вспомогательные элементы. Во входную цепь включается источник сигнала, а в выходную – нагрузка R_n . В дальнейшем будем описывать источник сигнала в виде генератора с напряжением e_r и внутренним сопротивлением R_r (если оно указано),

а нагрузку – резистором R_n . Простейшая схема усилительного каскада с ОЭ представлена на рис. 8.

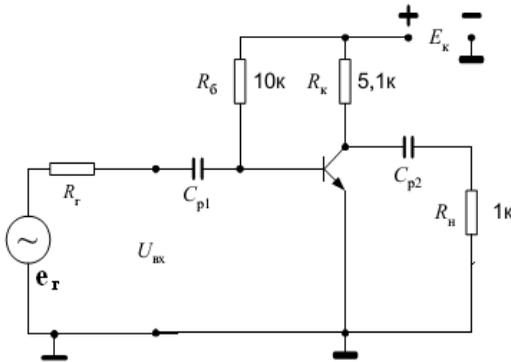


Рис. 8. Схема усилительного каскада ОЭ

Полярность источника питания E_k (положительная) обеспечивает работу транзистора в **активном** режиме. Резисторы $R_б$ и $R_к$ задают требуемые постоянные составляющие токов в цепях транзистора $I_{б0}$ и $I_{к0}$, а также постоянные напряжения на его электродах $U_{бэ0}$ и $U_{кэ0}$, т.е. **рабочую точку транзистора**. От выбора рабочей точки зависит усиление каскада, КПД, искажения сигнала. Для того, чтобы источник сигнала и нагрузка не влияли на режим работы транзистора по постоянному току, включены разделительные конденсаторы C_{p1} и C_{p2} , имеющие в рабочем диапазоне частот малые сопротивления.

Правильный выбор рабочей точки показан на рис. 9. Рабочая точка b находится на середине линейного участка входной характеристики транзистора, а амплитуда входного сигнала не превышает диапазон линейного участка ($a - c$). Аналогично располагается рабочая точка на выходных характеристиках.

Расчет элементов схемы производится по формулам:

$$\begin{aligned} R_б &= (E_k - U_{бэ0})/I_{б0}. \\ R_к &= (E_k - U_{кэ0})/I_{к0}. \end{aligned} \quad (9)$$

Значения конденсаторов C_{p1} , C_{p2} для данной работы можно принять равными 10 мкФ, они определяют частотные характеристики схемы, которые в данной работе не исследуются.

Эквивалентная электрическая схема каскада с емкостной связью в области средних частот с использованием модели транзистора на базе h параметров показана на рис. 10. Эта схема используется для анализа работы каскада и вывода теоретических формул выходных параметров.

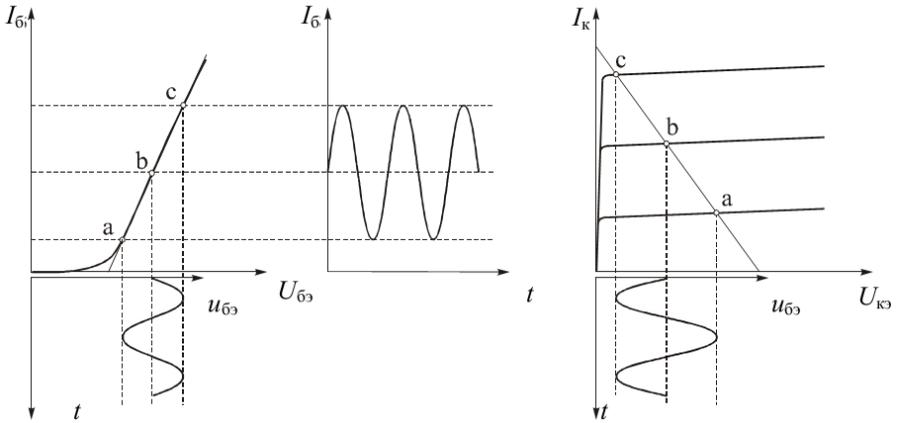


Рис. 9. Выбор рабочей точки

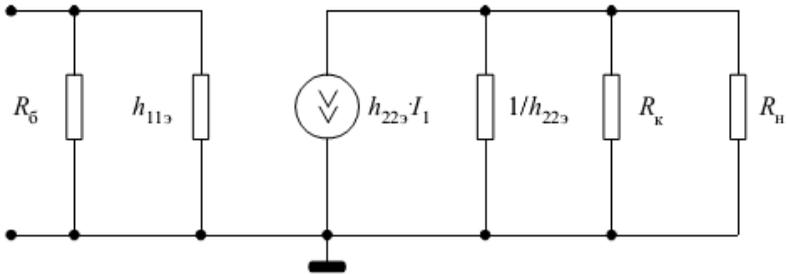


Рис. 10. Эквивалентная схема каскада ОЭ

Расчет параметров каскада

Используем полученные результаты для проведения расчетов. Из схемы замещения видно, что входное сопротивление каскада $R_{ВХ}$ в данном случае будет равно параллельному соединению резисторов $R_б$ и $h_{11Э}$:

$$R_{ВХ} = \frac{R_б \cdot h_{11Э}}{R_б + h_{11Э}}$$

Сопротивление нагрузки $R_{Н1}$ равно параллельному соединению резисторов $R_к$ и $R_н$:

$$R_{Н1} = \frac{R_к \cdot R_н}{R_к + R_н}$$

Определяем эквивалентное сопротивление генератора (из схемы входной цепи рис. 11).

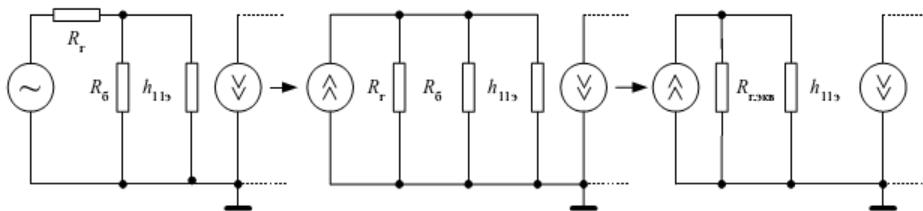


Рис. 11. Определение входного сопротивления

В данном случае $R_{г.эКВ}$ равно параллельному соединению резисторов R_r и $R_б$:

$$R_{г.эКВ} = \frac{R_r \cdot R_б}{R_r + R_б}.$$

Основные выходные показатели каскада ОЭ на рис. 8 определяются следующими соотношениями:

- коэффициент усиления по напряжению:

$$K_U = \frac{h_{21з} \cdot R_{н1}}{R_{г.эКВ} + h_{11з}};$$

- коэффициент усиления по току:

$$K_I = \frac{h_{21з}}{1 + h_{22з} \cdot R_{н1}};$$

- выходное сопротивление каскада будет равно параллельному соединению выходного сопротивления транзистора $R_{кз}$ и резистора $R_к$:

$$R_I = \frac{(1/h_{22з}) \cdot R_к}{(1/h_{22з}) + R_к}.$$

Для транзистора с h -параметрами $h_{11} = 1$ кОм, $h_{21} = 50$, $h_{12} = 5 \cdot 10^{-4}$, $h_{22} = 10^{-5}$ см и номиналах резисторов на схеме рис. 8 при $R_r = 60$ Ом получаем:

$$R_{вх} = 0,91 \text{ кОм}; R_{вых} = 4,85 \text{ кОм}; K_U = 39,6; K_I = 49,6.$$

2. ЗАДАНИЕ НА ПРАКТИЧЕСКОЕ ЗАНЯТИЕ

Цель работы: провести моделирование в пакете OrCAD-PSpice биполярного транзистора для получения параметров схемы замещения. Исследовать работу каскада на БТ и каскада с использованием схемы замещения.

Для указанного типа транзистора:

1. Построить входную характеристику $I_б = f(U_{бэ})$ при $U_{кэ} = \text{const} = 20$ В.

2. Выбрать рабочую точку в середине линейного участка входной характеристики ($U_{бэ0}, I_{б0}$).

3. Построить выходные характеристики $I_k = f(U_{кэ})$ для пяти значений тока базы $I_б$:

$$I_б = \{0A; I_б \dots; I_{б0}; I_б \dots; I_{б \text{ макс}}\},$$

где $I_б \dots$ – промежуточные значения;

$I_{б \text{ макс}}$ – максимальное значение тока базы, которое можно взять в четыре раза больше, чем $I_{б0}$.

4. Выбрать рабочую точку ($I_{к0}, U_{кэ0}$) в середине линейного участка выходной ВАХ для тока базы покоя $I_{б0}$. Можно принять $U_{кэ0} \approx E_k/2, E_k = 20 \text{ В}$.

5. Определить h -параметры транзистора в рабочей точке. Нарисовать линейную схему замещения БТ с использованием h -параметров и указать на ней величины рассчитанных параметров.

6. Рассчитать элементы схемы усилительного каскада на БТ с ОЭ. Определить основные параметры каскада: коэффициенты усиления по напряжению и току, входное и выходное сопротивления.

7. Определить физические параметры транзистора в рабочей точке. Нарисовать линейную схему замещения БТ с использованием физических параметров и указать рассчитанные величины.

8. Провести моделирование работы усилительного каскада на заданном транзисторе в схеме ОЭ. Параметры генератора для моделирования VSIN: OFF = 0; AMPL = 40 mV; FREQ = 1000. В свойствах генератора установить DC = 0 и AC = 1.

Определить:

1. Напряжения и токи смещения в рабочей точке – ($U_{бэ0}, I_{б0}$) и ($I_{к0}, U_{кэ0}$); (режим анализа по постоянному току Bias Point).
2. Коэффициент передачи по напряжению – K_U (режим анализа Time Domain).

Сравнить результаты моделирования с выбранными значениями каскада по постоянному току ($U_{бэ0}, I_{б0}$) и ($I_{к0}, U_{кэ0}$).

9. Провести моделирование работы усилительного каскада на БТ с ОЭ с использованием линейной схемы замещения на базе h -параметров.

Определить:

1. Напряжения и токи смещения в рабочей точке – ($U_{бэ0}, I_{б0}$) и ($I_{к0}, U_{кэ0}$); (режим анализа по постоянному току Bias Point).
2. Коэффициент передачи по напряжению – K_U (режим анализа Time Domain).

Сравнить результаты моделирования с выбранными значениями каскада по постоянному току ($U_{бэ0}, I_{б0}$) и ($I_{к0}, U_{кэ0}$), а также с результатами моделирования по п. 8.

3. ПРИМЕР ВЫПОЛНЕНИЯ ПРАКТИЧЕСКОЙ РАБОТЫ

Выполним указанное задание на примере БТ типа Q2N4013. В программе OrCAD-PSpice модели биполярных транзисторов находятся в библиотеке bipolar.olb, ebipolar.olb и других. Примем питание каскада $E_k = 20$ В.

1. Схема для получения входной характеристики представлена на рис. 12, а профиль моделирования – на рис. 13.

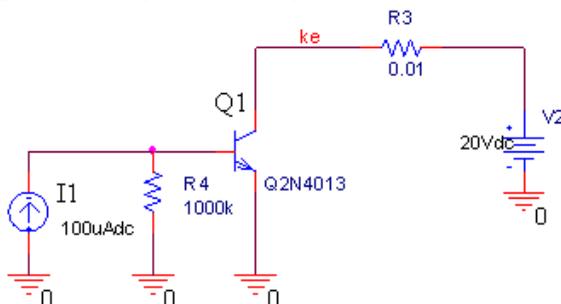


Рис. 12. Схема для снятия входных характеристик

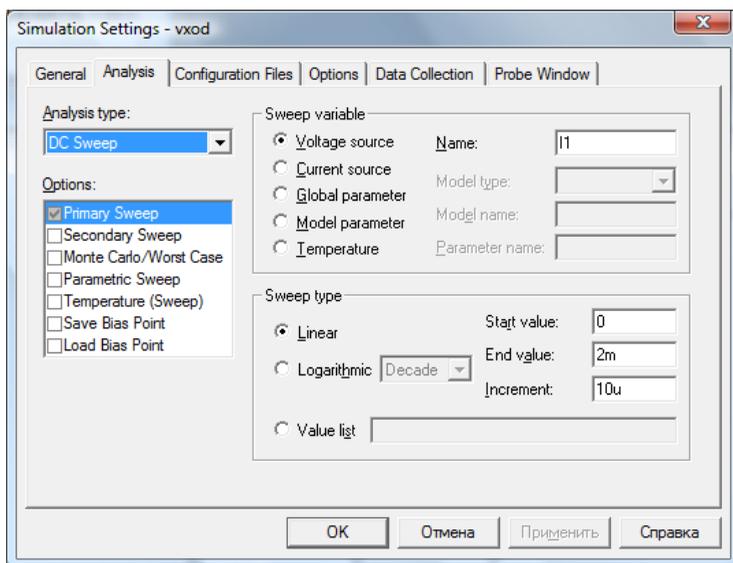


Рис. 13. Настройка профиля моделирования для снятия входных характеристик

Для получения входной характеристики производится анализ по постоянному току с вариацией входного источника тока I_1 . Настройки

профиля моделирования (рис. 13) могут отличаться от примера, т.к. транзисторы имеют разный диапазон входных токов. Максимально допустимый ток базы указывается в справочнике. Также шаг в приращении тока следует подобрать для построения более гладких графиков. Имена всех переменных указаны для рис. 13 и могут отличаться от выбранных для индивидуального задания.

Для построения входной характеристики после проведения анализа в окне PROBE выбираем Plot/Axis Settings..., а на закладке X-Axis нужно выбрать Axis Variable и далее из списка напряжение на базе транзистора V(Q1:b). Далее по команде Trace/Add Trace... из списка выбираем ток базы транзистора I(Q1:b).

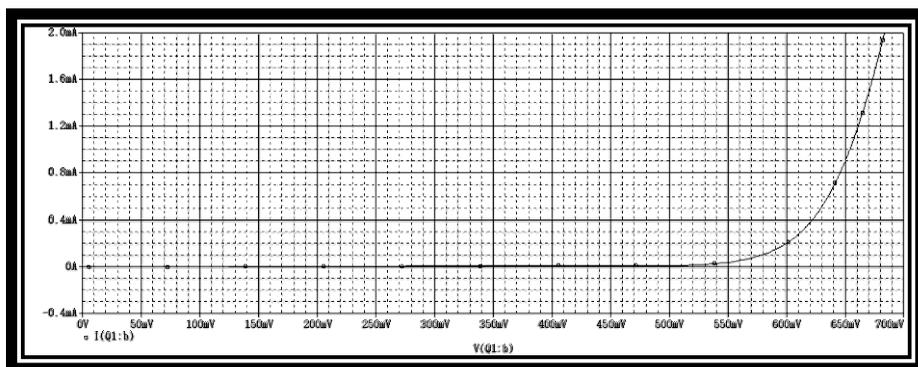


Рис. 14. Входная характеристика БТ Q2N4013

Если пределы изменения тока базы неизвестны, то их следует подбирать так, чтобы напряжение на базе V(Q1:b) составляло не менее 0,7 В. Этой величины будет достаточно для дальнейших расчетов.

2. Рабочая точка выбирается на линейном участке в диапазоне $U_{бэ0} = 0,6 - 0,7$ В. В данном примере выберем $U_{бэ0} = 0,65$ В, $I_{б0} = 0,9$ мА (рис. 15).

3. Добавляем новую страницу (правая кнопка мыши на странице схемы Schematics менеджера проекта – New Page или команда File/New Design...) и на ней собираем схему для снятия выходных характеристик.

Схема для снятия выходных характеристик представлена на рис. 16, а профили моделирования – на рис. 17 и рис. 18.

Для построения выходных характеристик проводим анализ по постоянному току с вариацией тока базы I_b (I_b по списку в цикле Secondary Sweep) и напряжения коллектор-эмиттер $V_{ке}$ ($U_{ке}$ линейно от 0 В до $E_k = 20$ В с шагом 0,1В в цикле Primary Sweep).

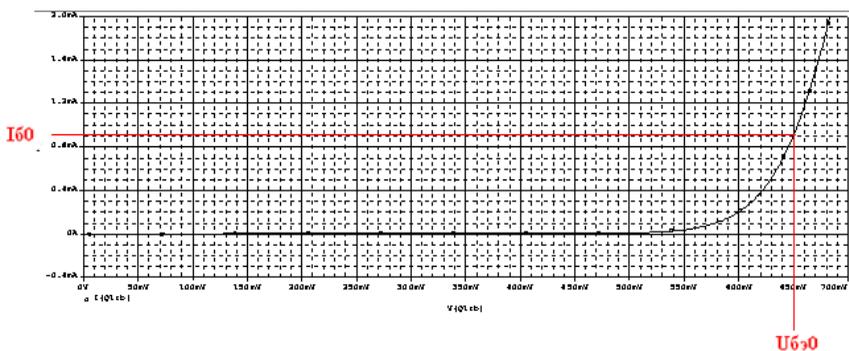


Рис. 15. Выбор рабочей точки

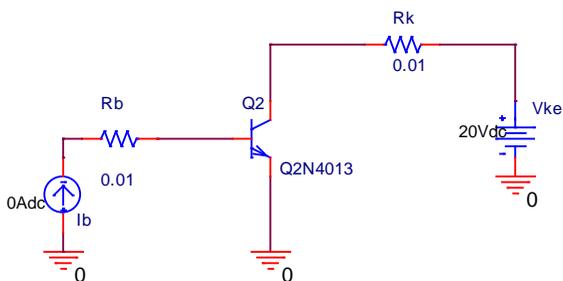


Рис. 16. Схема для снятия выходных характеристик

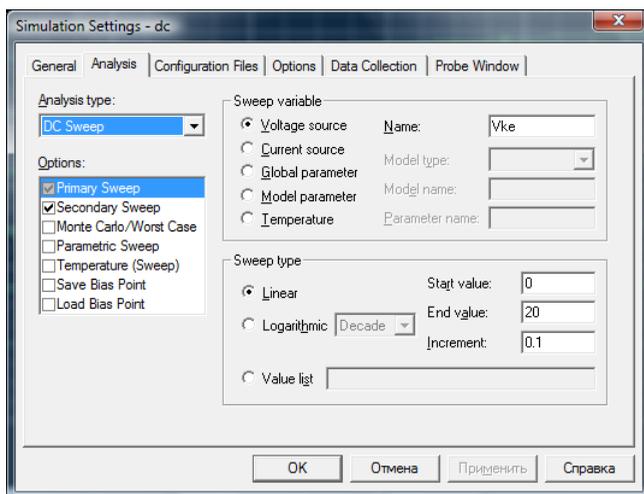


Рис. 17. Профиль для выходных характеристик Primary Sweep

Список значений Value List должен включать значения тока базы в порядке возрастания следующие значения: 0, два произвольных тока базы, ток базы в рабочей точке I_{B0} , два произвольных тока базы.

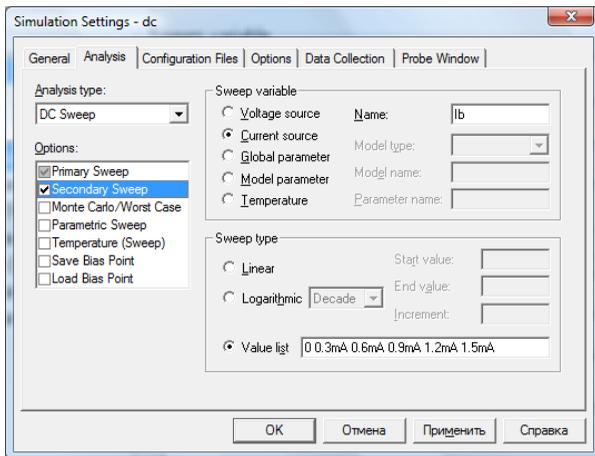


Рис. 18. Профиль для выходных характеристик Secondary Sweep

Для построения графика тока коллектора после моделирования в Probe по команде Trace/Add Trace... из списка выбираем ток коллектора транзистора $I(Q2:c)$. Результат моделирования представлен на рис. 19.

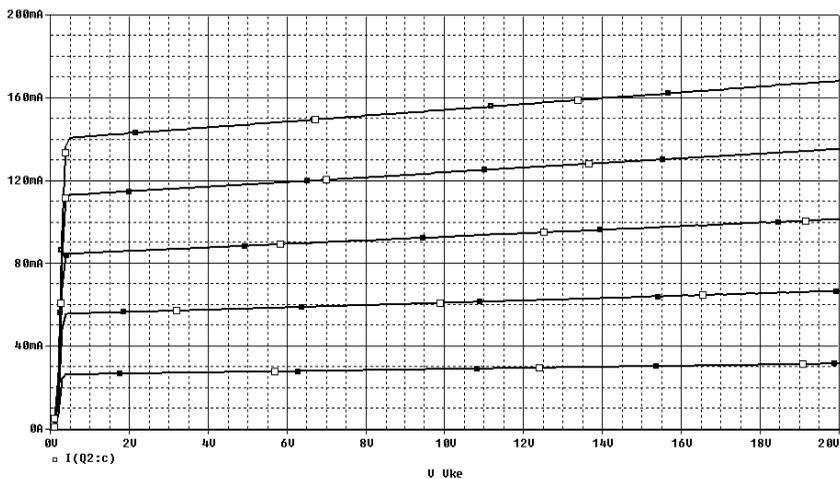


Рис. 19. Выходные характеристики БТ

4. Рабочая точка выбирается в середине линейного участка ВАХ, рассчитанной для тока базы в рабочей точке $I_{B0} = 0,9 \text{ мА}$ (рис. 20).

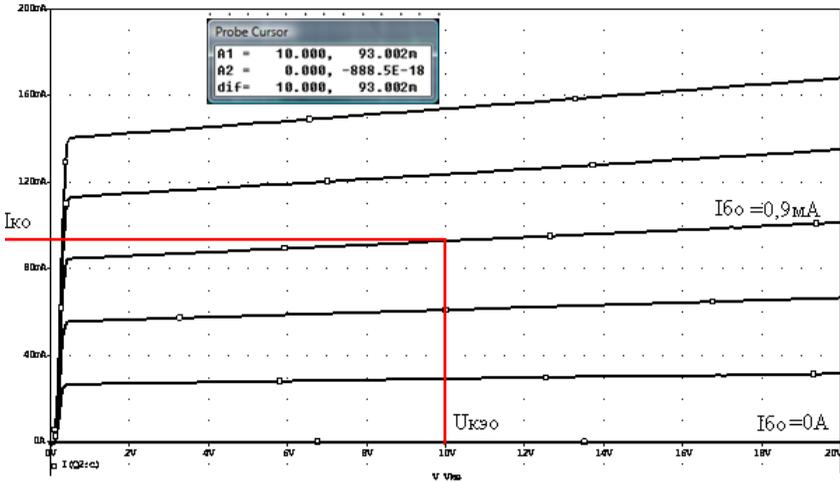


Рис. 20. Выбор рабочей точки БТ

В данном примере в режиме курсора определяем напряжение коллектор-эмиттер и ток коллектора в рабочей точке $U_{КЭ0} = 10 \text{ В}$, $I_{C0} = 93 \text{ мА}$.

5. Определяем h -параметры транзистора в рабочей точке.

По входным характеристикам определяем входное сопротивление транзистора $h_{11э}$ в окрестности рабочей точки по приращениям тока базы и напряжения базы-эмиттер (можно использовать режим курсора) (рис. 21).

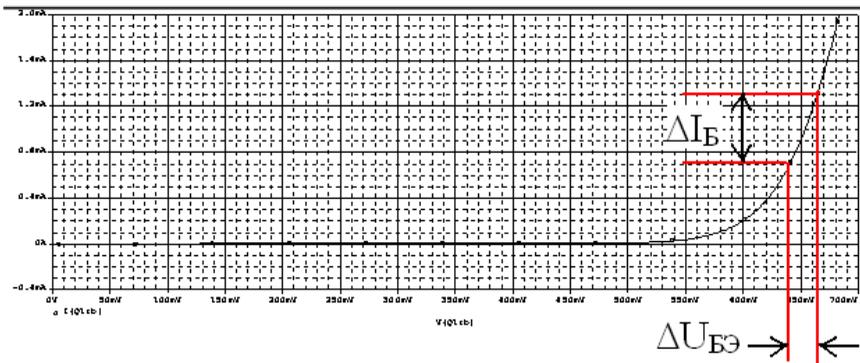


Рис. 21. Определение параметра $h_{11э}$

Определяем входное сопротивление транзистора $h_{11э}$ по формуле (7):

$$h_{11э} = \frac{\Delta U_{БЭ}}{\Delta I_{Б}} = \frac{0,665 - 0,64}{(1,3 - 0,7) \cdot 10^{-3}} = 41,67 \text{ Ом.}$$

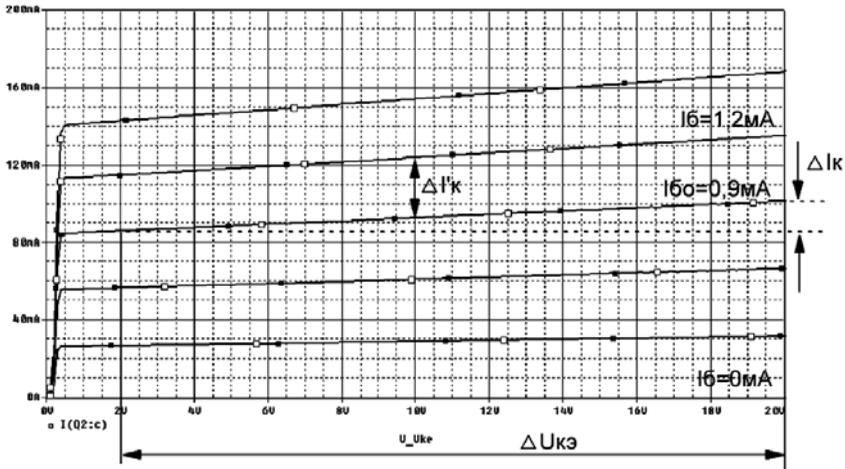


Рис. 22. Определение параметров $h_{21э}$, $h_{22э}$

По выходным характеристикам определяем выходную проводимость транзистора $h_{22э}$ в окрестности рабочей точки по приращениям тока коллектора и напряжения коллектор-эмиттер (рис. 22).

$$h_{22э} = \frac{\Delta I_{к}}{\Delta U_{кэ}} = \frac{(100 - 85) \cdot 10^{-3}}{20 - 2} = 8,33 \text{ мСм.}$$

По выходным характеристикам определяем коэффициент передачи транзистора $h_{21э}$ в окрестности рабочей точки ($U_{кэ0} = 10 \text{ В}$) по приращениям тока коллектора и тока базы (рис. 22).

$$h_{21э} = \frac{\Delta I'_{к}}{\Delta I_{б}} = \frac{(122 - 92) \cdot 10^{-3}}{(1,2 - 0,9) \cdot 10^{-3}} = 100.$$

Линейная схема замещения БТ Q2N4013 с использованием h -параметров представлена на рис. 23.

6. Расчет элементов схемы усилительного каскада на БТ с ОЭ.

Расчет элементов схемы усилительного каскада по формулам (8):

$$R_{б} = (E_{к} - U_{бэ0})/I_{б0} = (20 - 0,65)/0,9 \cdot 10^{-3} = 20,5 \text{ кОм.}$$

$$R_{к} = (E_{к} - U_{кэ0})/I_{к0} = (20 - 10)/93 \cdot 10^{-3} = 107,53 \text{ Ом.}$$

Примем из стандартного ряда сопротивлений значения резисторов $R_{б} = 20 \text{ кОм}$, $R_{к} = 110 \text{ Ом}$.

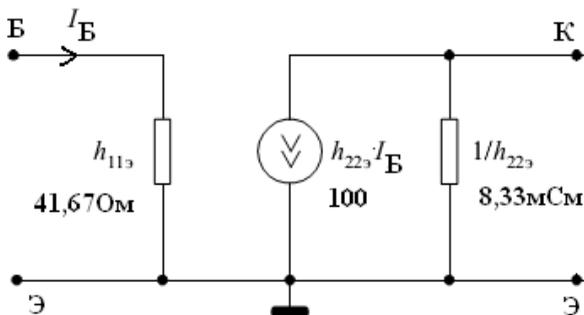


Рис. 23. Схема замещения БТ Q2N4013

Рассчитаем величину эквивалентной нагрузки по переменному току:

$$R_{Н1} = \frac{R_K \cdot R_H}{R_K + R_H} = \frac{110 \cdot 1000}{110 + 1000} = 99,1 \text{ Ом.}$$

Определяем основные параметры каскада:

- коэффициент усиления по напряжению:

$$K_U = -\frac{h_{21э} \cdot R_{Н1}}{R_{ВХ}} = -\frac{100 \cdot 99,1}{41,58} = -238,34;$$

- коэффициент усиления по току:

$$K_I = \frac{h_{21э}}{1 + h_{21э} \cdot R_{Н1}} = \frac{100}{1 + 8,33 \cdot 10^{-3} \cdot 99,1} = 54,78;$$

- входное сопротивление:

$$R_{ВХ} = \frac{R_6 \cdot R_{11э}}{R_6 + R_{11э}} = \frac{20000 \cdot 41,67}{20000 + 41,67} = 41,58 \text{ Ом;}$$

- выходное сопротивление:

$$R_{ВЫХ} = \frac{(1/h_{22э}) \cdot R_K}{(1/h_{22э}) + R_K} = \frac{\frac{1}{8,33 \cdot 10^{-3}} \cdot 110}{\frac{1}{8,33 \cdot 10^{-3}} + 110} = 57,41 \text{ Ом.}$$

7. Определяем физические параметры транзистора в рабочей точке.

$$\beta = h_{21э} = 100.$$

$$r_3 \approx \frac{0,026}{I_{к0} + I_{60}} = \frac{0,026}{(93 + 0,9) \cdot 10^{-3}} = 0,28 \text{ Ом.}$$

$$h_{12э} = r_3 \cdot h_{22э} = 0,28 \cdot 8,33 \cdot 10^{-3} = 2,33 \cdot 10^{-3},$$

$$r_k = (1 + h_{21э}) \cdot \frac{1 - h_{12э}}{h_{22э}} = (1 + 100) \cdot \frac{1 - 2,33 \cdot 10^{-3}}{8,33 \cdot 10^{-3}} = 12,1 \text{ кОм},$$

$$r_6 = h_{11э} - \frac{h_{12э}}{h_{22э}}(1 + h_{21э}) = 41,67 - \frac{2,33 \cdot 10^{-3}}{8,33 \cdot 10^{-3}} \cdot (1 + 100) = 13,42 \text{ Ом}.$$

Линейная схема замещения БТ с использованием физических параметров представлена на рис. 24.

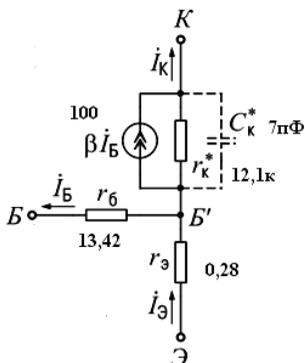


Рис. 24. Схема замещения БТ Q2N4013 с использованием физических параметров

8. Моделирование работы усилительного каскада на БТ с ОЭ.

По результатам расчета каскада собираем схему в Capture (рис. 25). Режим анализа по постоянному току Bias Point позволяет определить напряжения и токи смещения в рабочей точке, по данным рис. 25 получаем следующие значения:

($U_{бэ0} = 0,652 \text{ В}$, $I_{бэ} = 0,967 \text{ мА}$) и ($I_{к0} = 99,12 \text{ мА}$, $U_{кэ0} = 9,097 \text{ В}$).

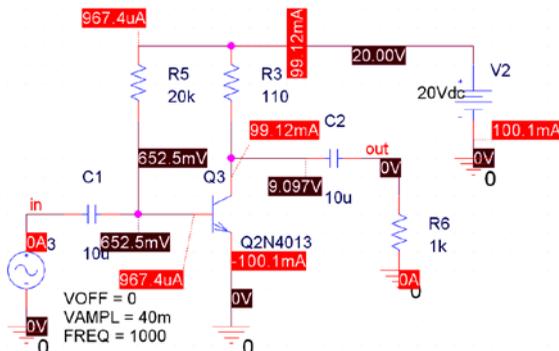


Рис. 25. Моделирование каскада по постоянному току

Сравниваем результаты моделирования с выбранными значениями каскада по постоянному току ($U_{б0} = 0,65$ В, $I_{б0} = 0,9$ мА) и ($I_{к0} = 93$ мА, $U_{к0} = 10$ В). Результаты расчета и моделирования показывают близкие значения. Следовательно, выбор рабочей точки и расчет каскада выполнены верно.

Режим анализа переходных процессов Time Domain позволяет определить коэффициент передачи по напряжению (рис. 26):

$$K_U = U_{OUT}/U_{IN} = 7,81/0,04 = 195,25.$$

Выходное напряжение несимметрично, поэтому амплитуда выходного напряжения рассчитывается как среднее значение положительной и отрицательной полуволн синусоиды:

$$U_{OUT} = (U_{OUT+} + U_{OUT-})/2 = (7,22 + 8,40)/2 = 7,81$$
 В.

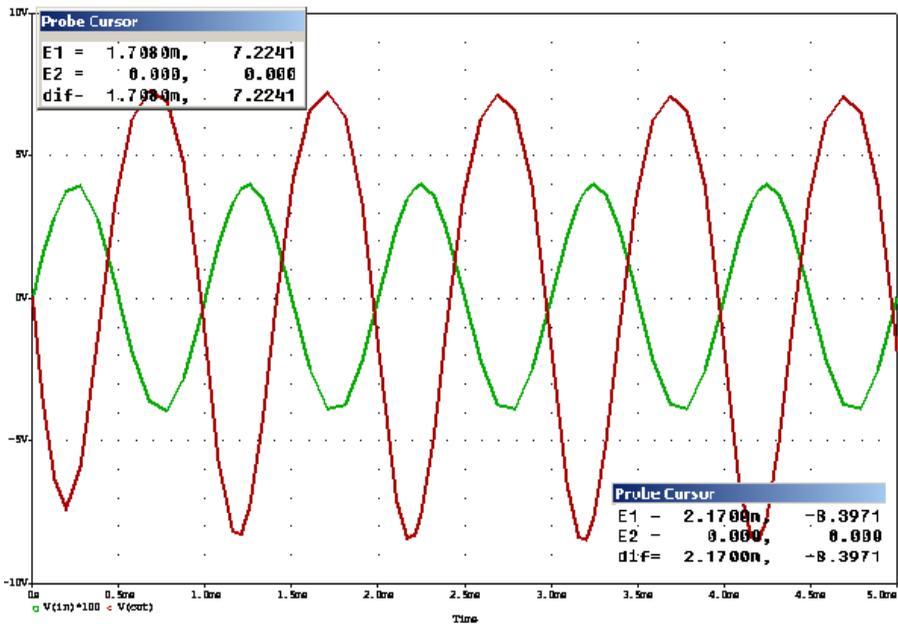


Рис. 26. Моделирование переходных процессов

Настройка профиля моделирования Time Domain показана на рис. 27.

9. Провести моделирование работы усилительного каскада на БТ с ОЭ с использованием линейной схемы замещения на базе h -параметров.

По результатам расчета схемы замещения (см. рис. 23) собираем схему каскада ОЭ в Capture (рис. 28).

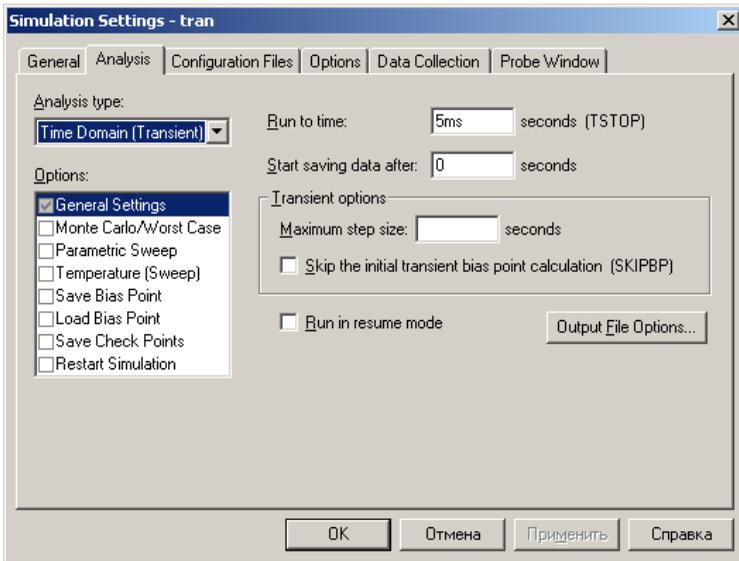


Рис. 27. Настройка режима Time Domain

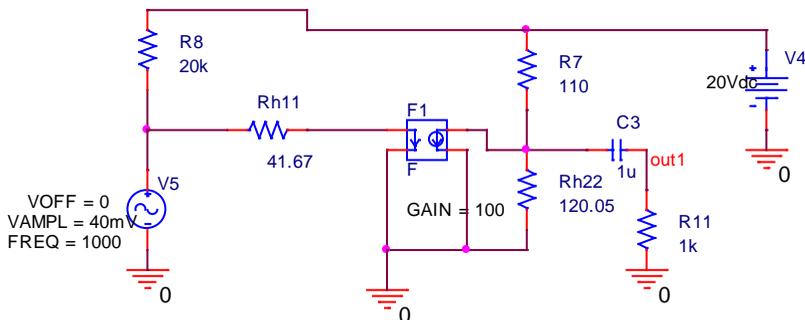


Рис. 28. Схема каскада на базе модели БТ

В этой схеме для моделирования транзистора использован источник тока, управляемый током F1, с коэффициентом управления $GAIN = 100$. Величина $GAIN$ определяется расчетным значением коэффициента передачи по току $h_{21Э}$. Остальные параметры модели соответствуют входному сопротивлению $R_{h11} = h_{11Э}$ и выходному сопротивлению $R_{h22} = 1/h_{22Э}$.

Режим анализа по постоянному току Bias Point позволяет определить напряжения и токи смещения в рабочей точке, по данным рис. 29 получаем следующие значения:

$$(U_{бэ0} = 0\text{В}, I_{бэ0} = 1\text{ мА}) \text{ и } (I_{к0} = 86,94\text{ мА}, U_{кэ0} = 10,44\text{ В}).$$

Результат $U_{\text{бэ0}} = 0 \text{ В}$ объясняется тем, что постоянное смещение в цепи базы не моделируется схемой замещения.

Результаты анализа модели также показывают результаты близкие по значению с результатами анализа схемы на базе транзистора, что говорит о достаточной точности модели БТ на базе h -параметров.

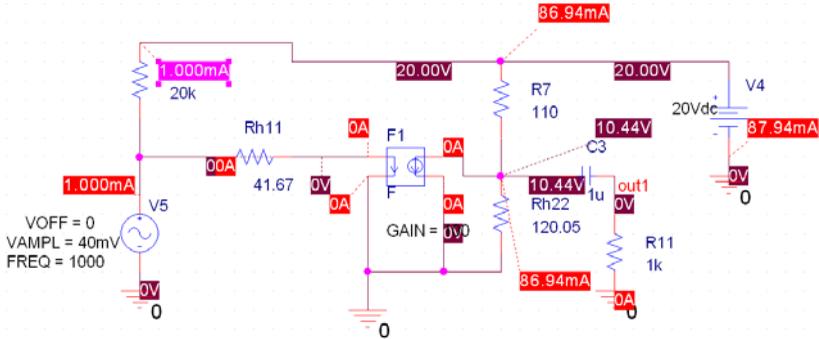


Рис. 29. Расчет схемы замещения по постоянному току

Режим анализа переходных процессов Time Domain позволяет определить коэффициент передачи по напряжению (рис. 30):

$$K_U = U_{\text{OUT}}/U_{\text{IN}} = 5,15/0,04 = 125,38.$$

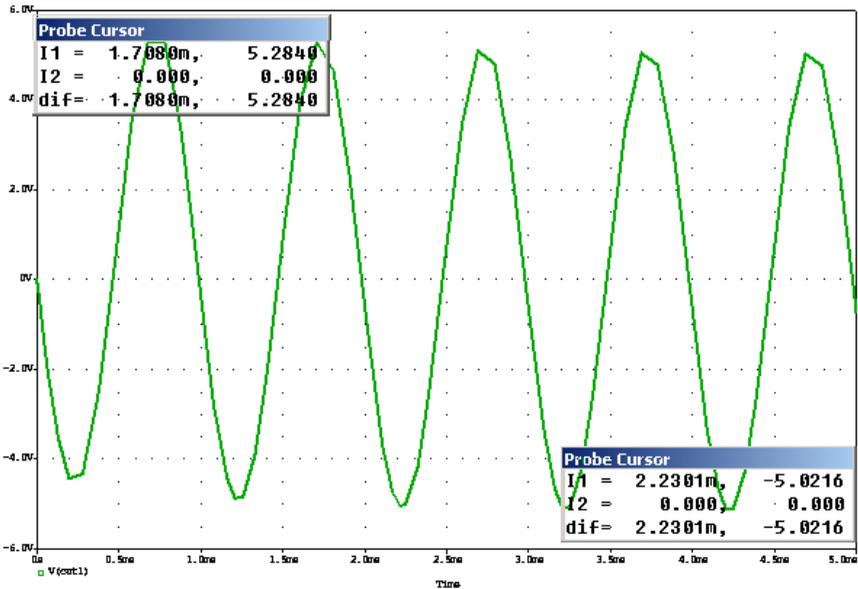


Рис. 30. Моделирование переходных процессов

Выходное напряжение несимметрично, поэтому амплитуда выходного напряжения рассчитывается как среднее значение положительной и отрицательной полуволн синусоиды:

$$U_{\text{OUT}} = (U_{\text{OUT}+} + U_{\text{OUT}-})/2 = (5,28 + 5,02)/2 = 5,15 \text{ В.}$$

На основании полученных результатов можно сделать вывод, что модель БТ на базе h -параметров дает удовлетворительные результаты при анализе режима каскада по постоянному току и не учитывает в полной мере особенностей работы БТ в динамическом режиме.

4. КОНТРОЛЬНЫЕ ВОПРОСЫ

1. Какова структура биполярного транзистора?
2. Какие схемы включения биполярного транзистора существуют?
3. Какие режимы работы биполярного транзистора существуют?
4. В чем особенность включения БТ в активном режиме?
5. Какие зависимости характеризуют вольт-амперные характеристики транзистора в схеме ОЭ?
6. Какие параметры можно определить по вольт-амперным характеристикам транзистора в схеме ОЭ?
7. Приведите схему замещения БТ в системе h -параметров. Какой физический смысл ее компонентов?
8. Приведите схему замещения БТ в системе физических параметров. Какой физический смысл ее компонентов?
9. Каким образом определяются h -параметры БТ по вольт-амперным характеристикам?
10. Укажите назначение элементов схемы усилительного каскада на БТ для схемы на рис. 8.
11. Укажите виды анализа в пакете OrCAD-PSpice для получения вольт-амперных характеристик БТ.
12. Укажите виды анализа в пакете OrCAD-PSpice, которые используются для расчета режима по постоянному току и для расчета коэффициента усиления каскада на БТ.

5. СПИСОК ИСПОЛЬЗОВАННОЙ ЛИТЕРАТУРЫ

1. Игумнов, Д.В. Основы полупроводниковой электроники [Текст]: учеб. пособие / Д.В. Игумнов, Г.П. Костюнина. – М: Горячая линия-Телеком, 2005. – 392 с.

2. Титце, У. Полупроводниковая схемотехника [Текст] / У. Титце, К. Шенк. – 12-е изд., Т. I; пер. с нем. – М.: ДМК Пресс, 2007. – 942 с.
3. Кеон, Дж. OrCAD PSpice. Анализ электрических цепей [Текст]/ Дж. Кеон. – М.: ДМК Пресс; СПб.: Питер, 2008. – 640 с.
4. Антипенский, Р. В. Схемотехническое проектирование и моделирование радиоэлектронных устройств [Текст]: учеб. пособие / Р. Антипенский, А. Фадин. – М.: Техносфера, 2007. – 127 с.

Учебное издание

**РАЗРАБОТКА И ИССЛЕДОВАНИЕ МОДЕЛИ
БИПОЛЯРНОГО ТРАНЗИСТОРА В ПАКЕТЕ САПР**

Методические указания

Составитель ***Муравьев Александр Николаевич***

Редактор Ю.Н. Литвинова
Довёрстка Е.С. Кочеулова

Подписано в печать 22.06.2015. Формат 60×84 1/16.

Бумага офсетная. Печать офсетная. Печ. л. 1,75.

Тираж 100 экз. Заказ . Арт. – 39/2015.

федеральное государственное автономное
образовательное учреждение высшего образования
«Самарский государственный аэрокосмический
университет имени академика С. П. Королева
(национальный исследовательский университет)» (СГАУ)
443086, Самара, Московское шоссе, 34.

Изд-во СГАУ. 443086, Самара, Московское шоссе, 34.