

НАЦИОНАЛЬНЫЙ ИССЛЕДОВАТЕЛЬСКИЙ УНИВЕРСИТЕТ ИТМО
Факультет систем управления и робототехники

Электроника и схемотехника

Лабораторная работа №2

Исследование характеристик биполярного транзистора и расчёт
усилительного каскада

Вариант 2

Выполнили студенты:
Кирбаба Д.Д. R3338
Курчавый В.В. R3338

Преподаватель:
Николаев Н.А.

г. Санкт-Петербург
2023

Цель работы

- Получение входной характеристики и семейства выходных характеристик биполярного транзистора в схеме с общим эмиттером;
- Расчёт усилительного каскада с заданием рабочей точки транзистора с помощью отрицательной обратной связи по току.

Ход работы

Вариант 2: транзистор 2N2369, $E_C = 15\text{ V}$.

MAXIMUM RATINGS

Rating	Symbol	Value	Unit
Collector–Emitter Voltage	V_{CEO}	15	Vdc
Collector–Emitter Voltage	V_{CES}	40	Vdc
Collector–Base Voltage	V_{CBO}	40	Vdc
Emitter–Base Voltage	V_{EBO}	4.5	Vdc
Collector Current (10 μ s pulse)	$I_{C(Peak)}$	500	mA
Collector Current — Continuous	I_C	200	mA
Total Device Dissipation @ $T_A = 25^\circ\text{C}$ Derate above 25°C	P_D	0.36 2.06	Watt mW/ $^\circ\text{C}$
Total Device Dissipation @ $T_C = 100^\circ\text{C}$ Derate above 100°C	P_D	0.68 6.85	Watts mW/ $^\circ\text{C}$
Operating and Storage Junction Temperature Range	T_J, T_{stg}	-65 to $+200$	$^\circ\text{C}$

Рис. 1: Характеристики транзистора 1.

ELECTRICAL CHARACTERISTICS ($T_A = 25^\circ\text{C}$ unless otherwise noted) (Continued)

Characteristic		Symbol	Min	Max	Unit
ON CHARACTERISTICS					
DC Current Gain ⁽¹⁾ (I _C = 10 mA _{dc} , V _{CE} = 1.0 V _{dc})	2N2369 2N2369A	h _{FE}	40 —	120 120	—
(I _C = 10 mA _{dc} , V _{CE} = 1.0 V _{dc} , T _A = −55°C)	2N2369		20	—	
(I _C = 10 mA _{dc} , V _{CE} = 0.35 V _{dc} , T _A = −55°C)	2N2369A		20	—	
(I _C = 30 mA _{dc} , V _{CE} = 0.4 V _{dc})	2N2369A		30	—	
(I _C = 100 mA _{dc} , V _{CE} = 1.0 V _{dc})	2N2369A		20	—	
(I _C = 100 mA _{dc} , V _{CE} = 2.0 V _{dc})	2N2369		20	—	
Collector–Emitter Saturation Voltage ⁽¹⁾ (I _C = 10 mA _{dc} , I _B = 1.0 mA _{dc})	2N2369 2N2369A	V _{CE(sat)}	— —	0.25 0.20	V _{dc}
(I _C = 10 mA _{dc} , I _B = 1.0 mA _{dc} , T _A = +125°C)	2N2369A		—	0.30	
(I _C = 30 mA _{dc} , I _B = 3.0 mA _{dc})	2N2369A		—	0.25	
(I _C = 100 mA _{dc} , I _B = 10 mA _{dc})	2N2369A		—	0.50	
Base–Emitter Saturation Voltage ⁽¹⁾ (I _C = 10 mA _{dc} , I _B = 1.0 mA _{dc})	All Types	V _{BE(sat)}	0.70	0.85	V _{dc}
(I _C = 10 mA _{dc} , I _B = 1.0 mA _{dc} , T _A = +125°C)	2N2369A		0.59	—	
(I _C = 10 mA _{dc} , I _B = 1.0 mA _{dc} , T _A = −55°C)	2N2369A		—	1.02	
(I _C = 30 mA _{dc} , I _B = 3.0 mA _{dc})	2N2369A		—	1.15	
(I _C = 100 mA _{dc} , I _B = 10 mA _{dc})	2N2369A		—	1.60	

Рис. 2: Характеристики транзистора 2.

Максимальный ток коллектора: $I_{C_{peak}} = 0.2 \text{ A}$.

Максимальное напряжение коллектор-эмиттер: $U_{CEO} = 15 \text{ V}$.

Коэффициент усиления по току: $h_{FE} = [40; 120]$.

Максимальная рассеиваемая мощность: $P_D = 0.36 \text{ W}$.

Получение входной характеристики биполярного транзистора

Построим входную характеристику транзистора (шаг напряжения 0.001 V).

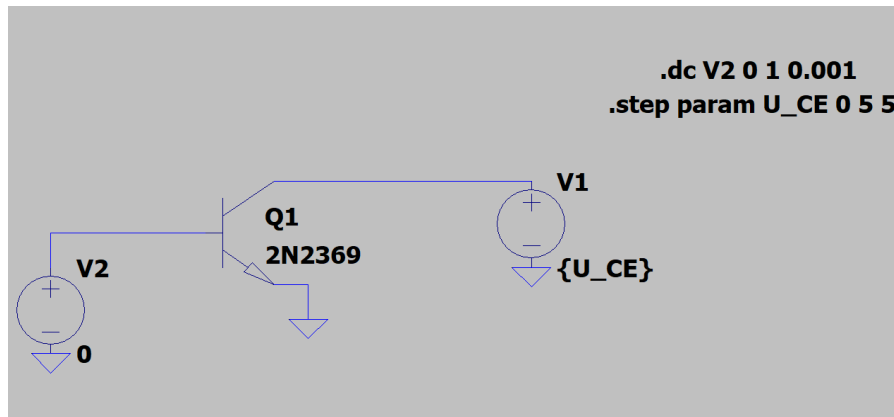


Рис. 3: Схема для моделирования входной характеристики транзистора.

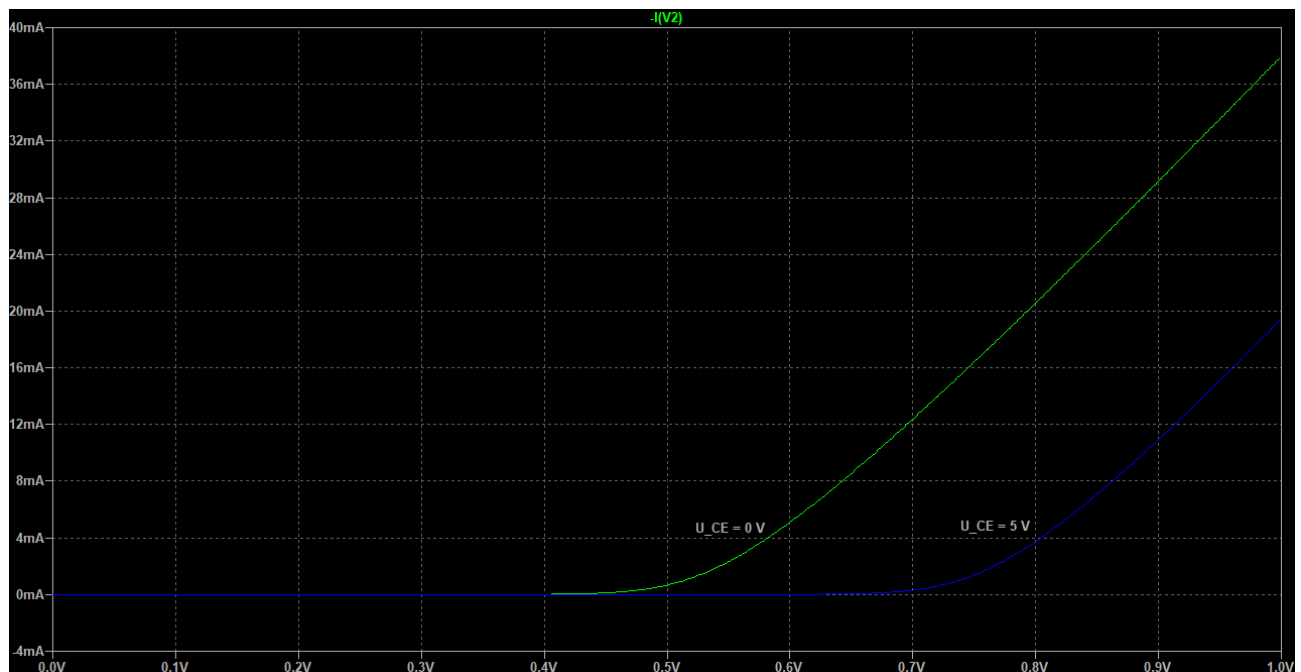


Рис. 4: Входная характеристика.

Рассчитаем дифференциальное входное сопротивление транзистора:

$$r_{in} = \frac{\delta U_{BE}}{\delta I_B} = \frac{984.67 - 859.8}{18.096 - 7.805} = 12.134 \text{ Ohm}$$

Получение семейства выходных характеристик биполярного транзистора

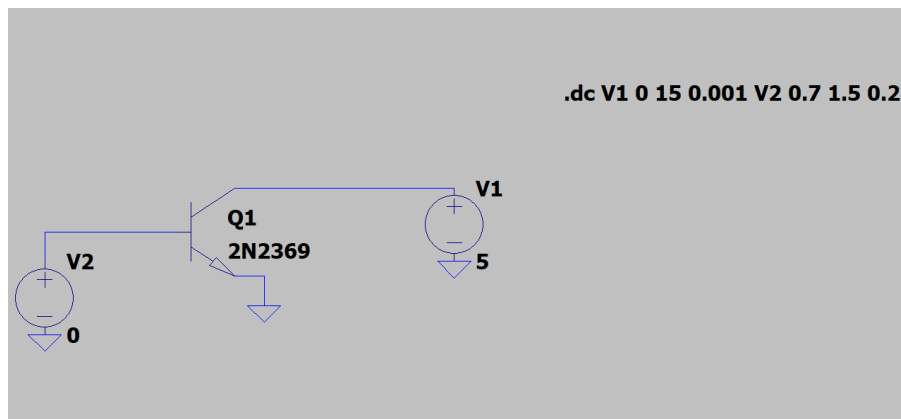


Рис. 5: Схема для получения семейства выходных характеристик транзистора.

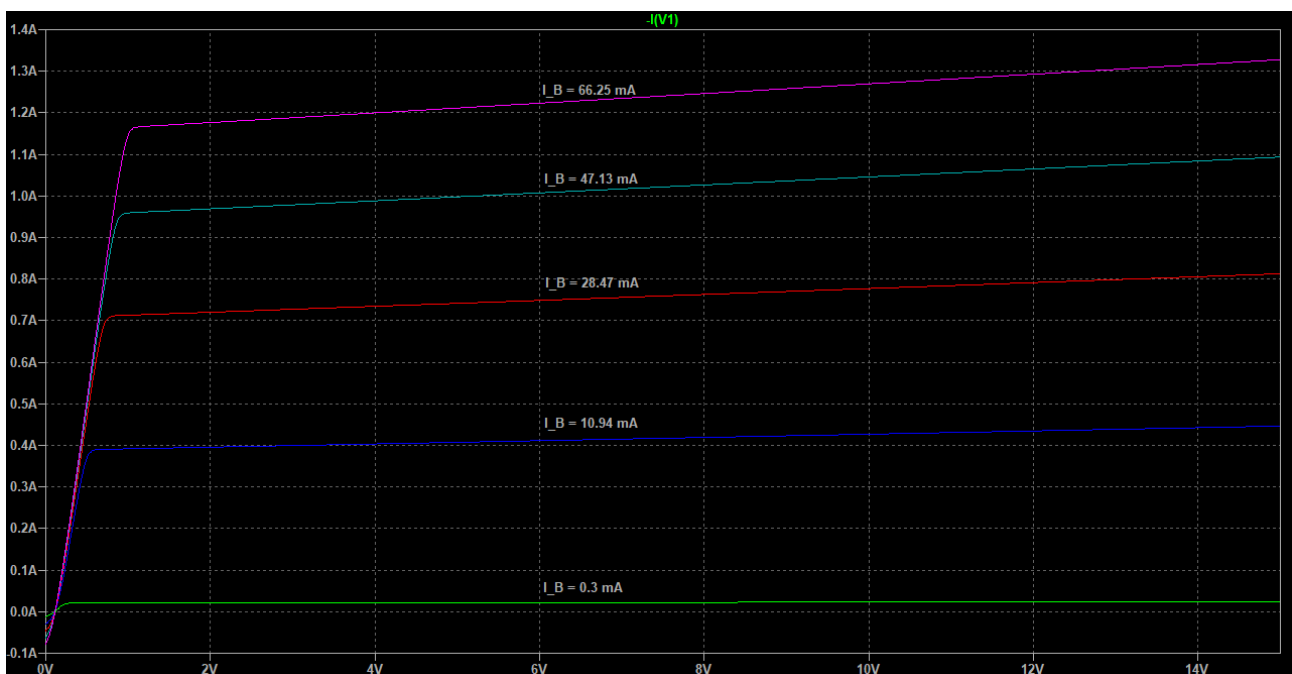


Рис. 6: Семейство выходных характеристик.

Определим для каждой полученной выходной характеристики значение тока коллектора, соответствующее напряжению коллектор-эмиттер $U_{KE} = 5 V$ (нумерация выходных характеристик сверху-вниз):

$$I_{C1} = 0.02186 A$$

$$I_{C2} = 0.4074 A$$

$$I_{C3} = 0.7417 A$$

$$I_{C4} = 0.9978 A$$

$$I_{C5} = 1.2114 A$$

Рассчитаем коэффициент передачи тока:

$$\beta_{AC} = \frac{\delta I_C}{\delta I_B} = \frac{1.2114 - 0.02186}{0.06625 - 0.0003} = 18.037$$

Задание рабочей точки с помощью отрицательной обратной связи по току

Определим рабочий диапазон транзистора, зная что его ограничения:

$$I_{C_{peak}} = 0.2 \text{ A}, U_{CEO} = 15 \text{ V}, P_D = 0.36 \text{ W}.$$

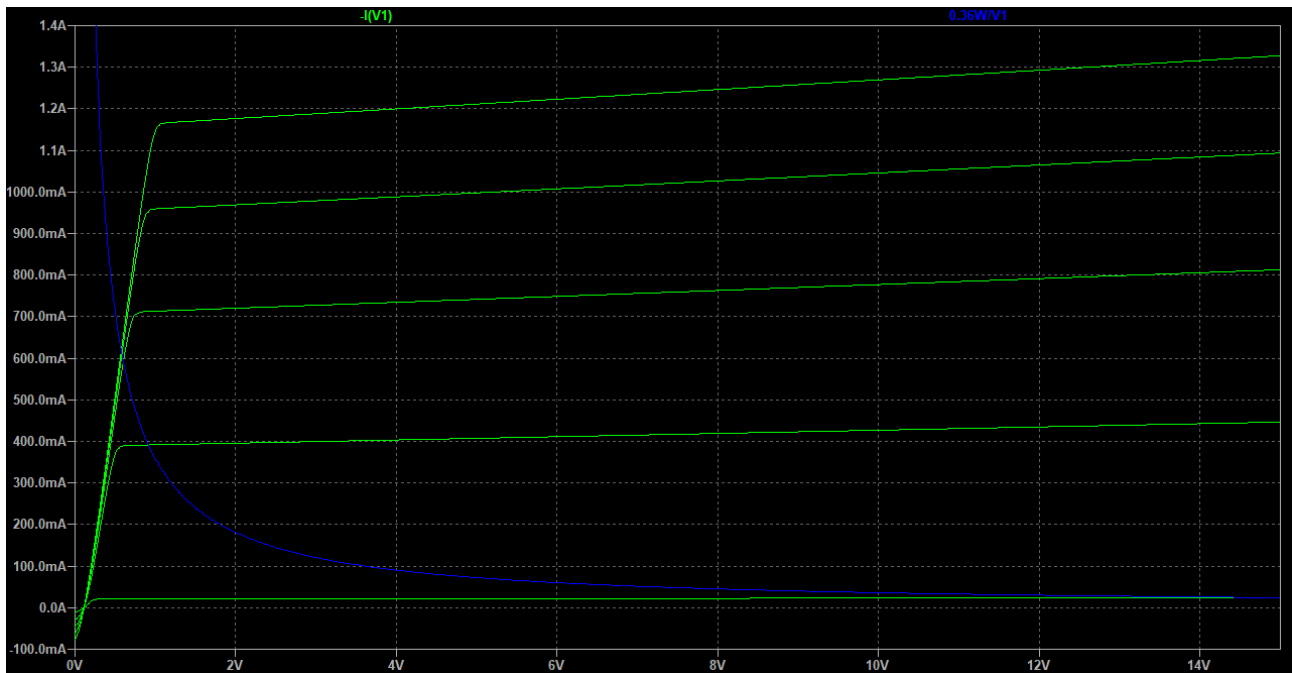


Рис. 7: Линия максимальной мощности на семействе ВАХ.

Рабочий диапазон транзистора будет находиться под данной линией мощности, а также ограничен прямыми $I = I_{C_{peak}} = 0.2 \text{ A}$, $U = U_{CEO} = 15 \text{ V}$.

Так как пиковое значение коллектора 0.2 A , а почти все построенные выходные характеристики соответствуют большему значению, то построим семейство с меньшими силами тока на базе, а следовательно с меньшими силами тока на коллекторе:

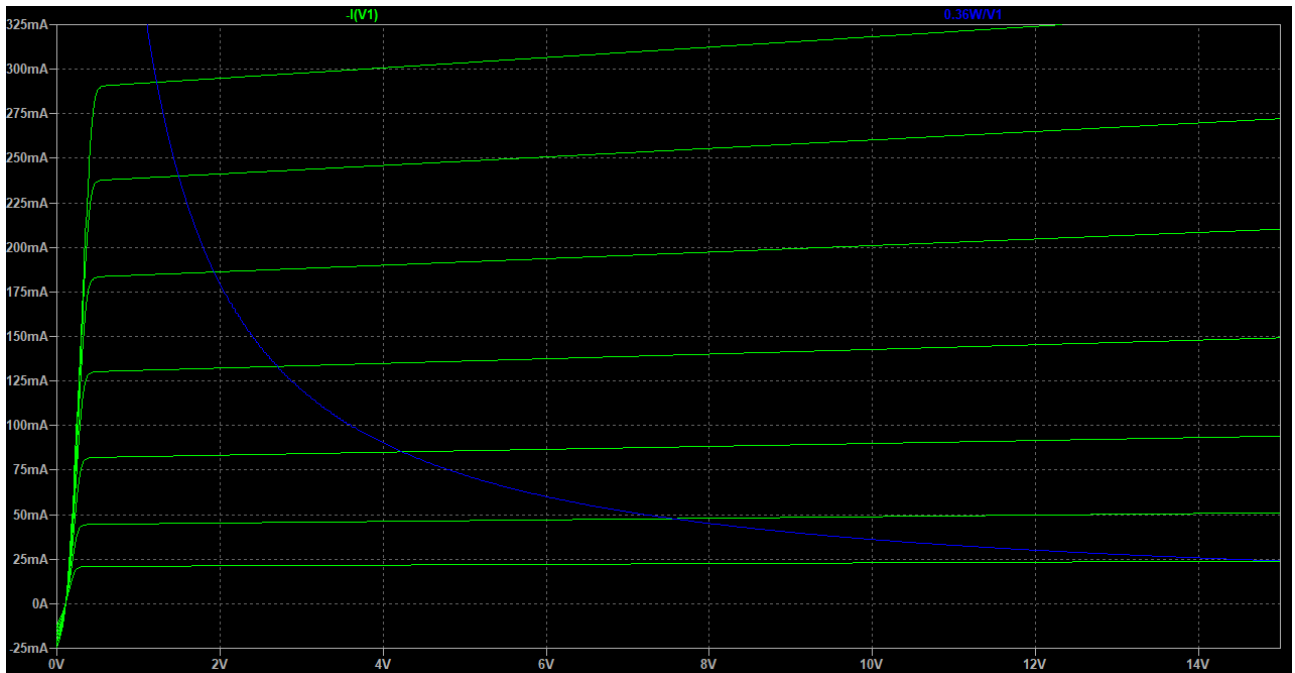


Рис. 8: Семейство ВАХ с меньшими силами тока на базе.

Построим нагрузочную линию (учитывая что $E_k = 15\text{ V}$). Она должна проходить через $(E_k, 0)$. И выберем рабочую точку.



Рис. 9: Нагрузочная прямая и рабочая точка на семействе ВАХ.

Координаты точки $A = (6\text{ V}, 47.062\text{ mA})$.

Точка лежит на линии выходной характеристики с $I_{B_A} = 690\text{ }\mu\text{A}$.

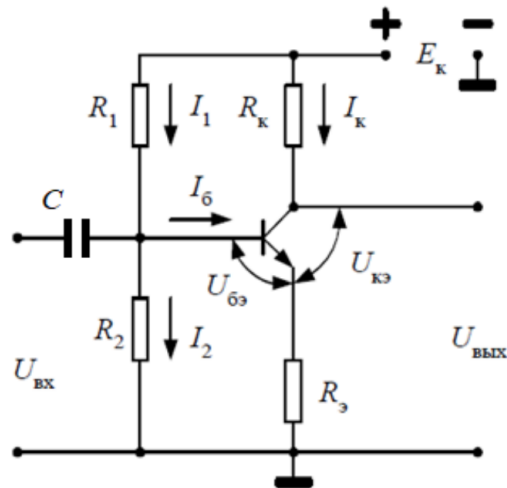


Рис. 10: Схема с ООС по току.

Для расчета транзистора по постоянному току необходимо определить номинальные значения резисторов, которые задают рабочую точку транзистора.

Резисторы служат для задания рабочей точки, конденсатор большой емкости (примерно 1 мкФ) выполняет роль гальванической развязки по постоянному току. В данном случае необходимо найти величины сопротивлений R_C , R_1 , R_2 , R_E .

По нагрузочной прямой найдем максимальное значение тока насыщения транзистора I_{CS} - это ток в точке пересечения нагрузочной прямой и оси тока, то есть

$$I_{CS} = 78 \text{ mA}$$

Величина сопротивления резистора в цепи коллектора:

$$R_C = \frac{E_C}{I_{CS}} = 192.30 \text{ Ohm} = |E192| = 193 \text{ Ohm}$$

По величине тока базы в точке А, определим падение напряжения на базе:

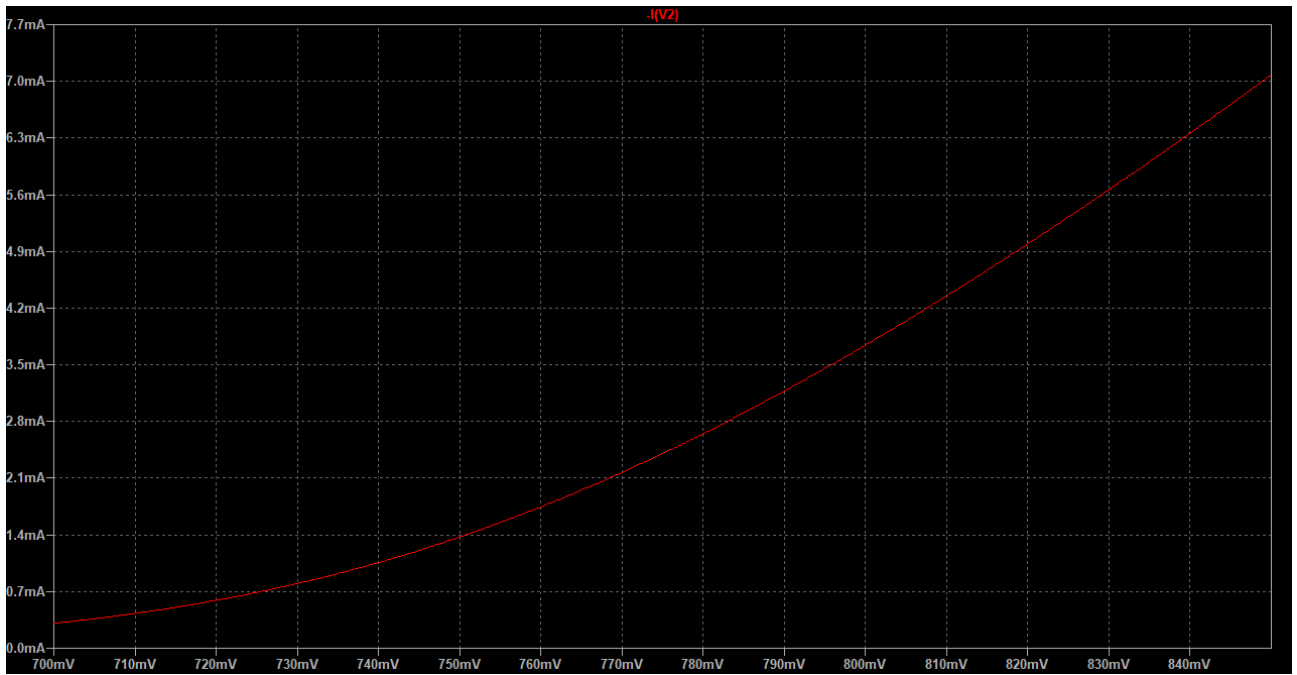


Рис. 11: Входная характеристика.

$$U_{BE_A} = 725.1 \text{ mV}$$

Ток эмиттера является суммой токов коллектора и базы:

$$I_{E_A} = I_{B_A} + I_{C_A} = 0.047752 \text{ A}$$

Уравнение равновесия напряжений по второму закону Кирхгофа для цепи эмиттер-коллектор имеет вид:

$$E_C = I_{C_A} R_C + U_{CE} + I_{E_A} * R_E$$

Для входной цепи по второму закону Кирхгофа можно составить два уравнения равновесия напряжений:

$$E_C = I_1 R_1 + I_2 R_2$$

$$E_C = I_1 R_1 + U_{BE_A} + U_{R_E} = I_1 R_1 + U_{BE_A} + I_{E_A} R_E$$

Следовательно:

$$U_{R_2} = I_2 R_2 = U_{R_E} + U_{BE_A} = I_{E_A} R_E + U_{BE_A}$$

Сопротивление R_E осуществляет отрицательную обратную связь по току. Падение напряжения на нём должно быть небольшим, поэтому обычно из практических соображений выбирают:

$$U_{R_E} = (0.1/0.3) E_C$$

Учитывая это соотношение, можно найти значение сопротивления в цепи эмиттера:

$$R_E = \frac{U_{R_E}}{I_{E_A}} = \frac{(0.1/0.3) E_C}{I_{E_A}} = 104.708 \text{ Ohm} = |E192| = 105 \text{ Ohm}$$

Падение напряжения на эмиттерном сопротивлении будет равно:

$$U_{R_E} = I_{E_A} * R_E = 5.01396 \text{ V}$$

Теперь U_{R_2} может быть рассчитано:

$$U_{R_2} = U_{R_E} + U_{BEA} = 5.73906 \text{ V}$$

Для расчета сопротивления R_2 необходимо знать величину тока I_2 . Из практических соображений значение тока I_1 равно:

$$I_1 = 5I_{BA} = 3.45 \text{ mA}$$

Тогда:

$$I_2 = I_1 - I_{BA} = 2.76 \text{ mA}$$

Теперь можно рассчитать величину сопротивления резистора R_2 :

$$R_2 = \frac{U_{R_2}}{I_2} = 2079.34 \text{ Ohm} = |E192| = 2080 \text{ Ohm}$$

И величина сопротивления резистора R_1 :

$$R_1 = \frac{E_C - U_{R_2}}{I_1} = 2684.33 \text{ Ohm} = |E192| = 2670 \text{ Ohm}$$

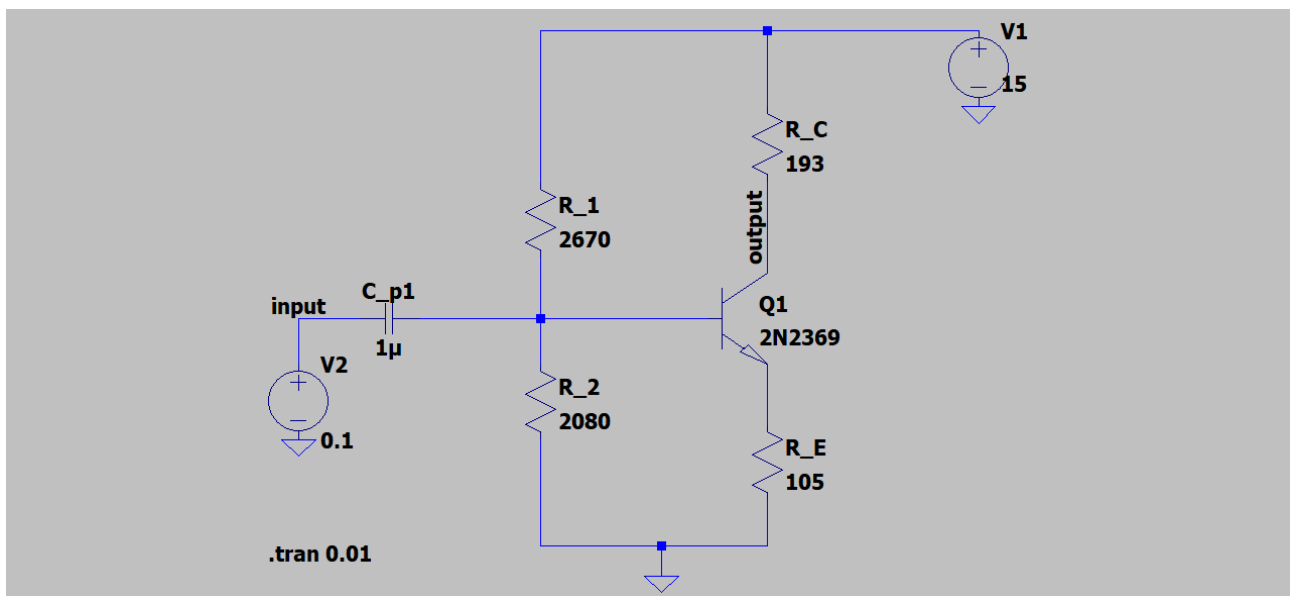


Рис. 12: Схема усилителя с биполярным транзистором.

Произведем моделирование работы схемы при постоянном входном сигнале $U_{in} = 0.1 \text{ V}$.

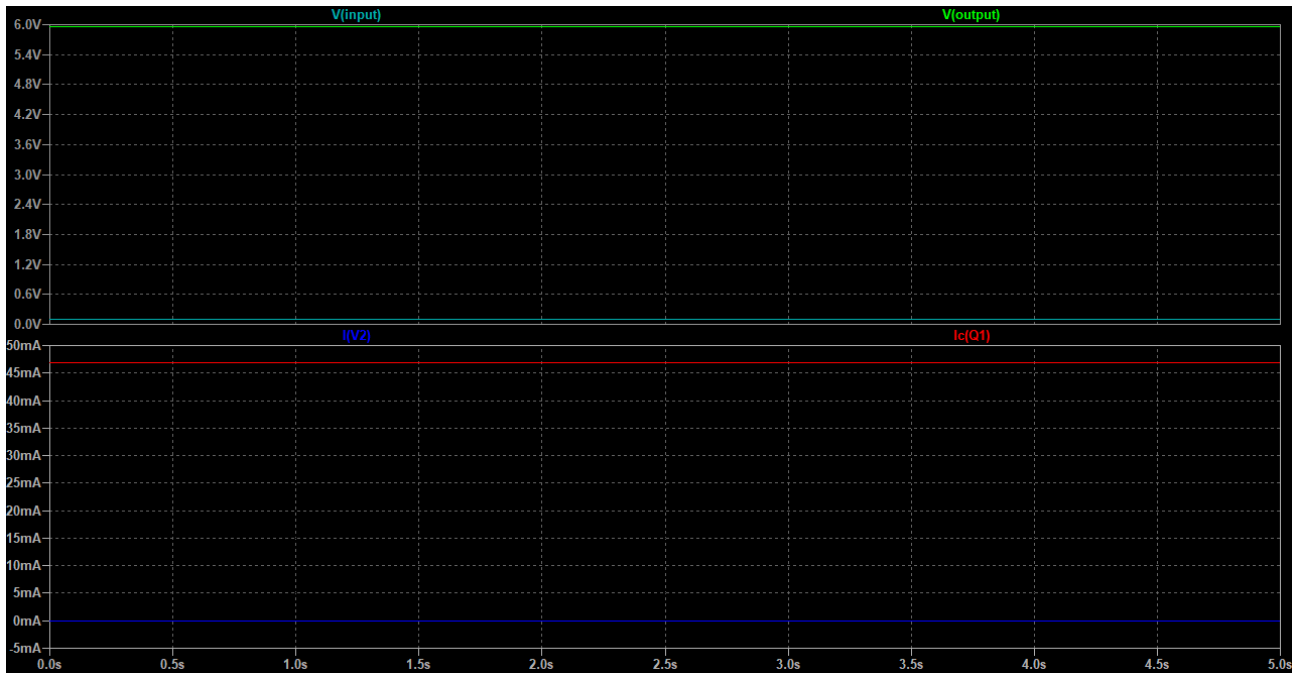


Рис. 13: Осциллограммы входных и выходных тока и напряжения при постоянном сигнале.

Выбранная рабочая точка была $A = (6\text{ V}, 47.062\text{ mA})$, выходные ток и напряжение достаточно близки к данным значениям, а именно $I_{out} = 46.866\text{ mA}$, $U_{out} = 5.955\text{ V}$.

Произведем теперь моделирование работы схемы при гармоническом входном сигнале $0.1 \sin 1000U$:

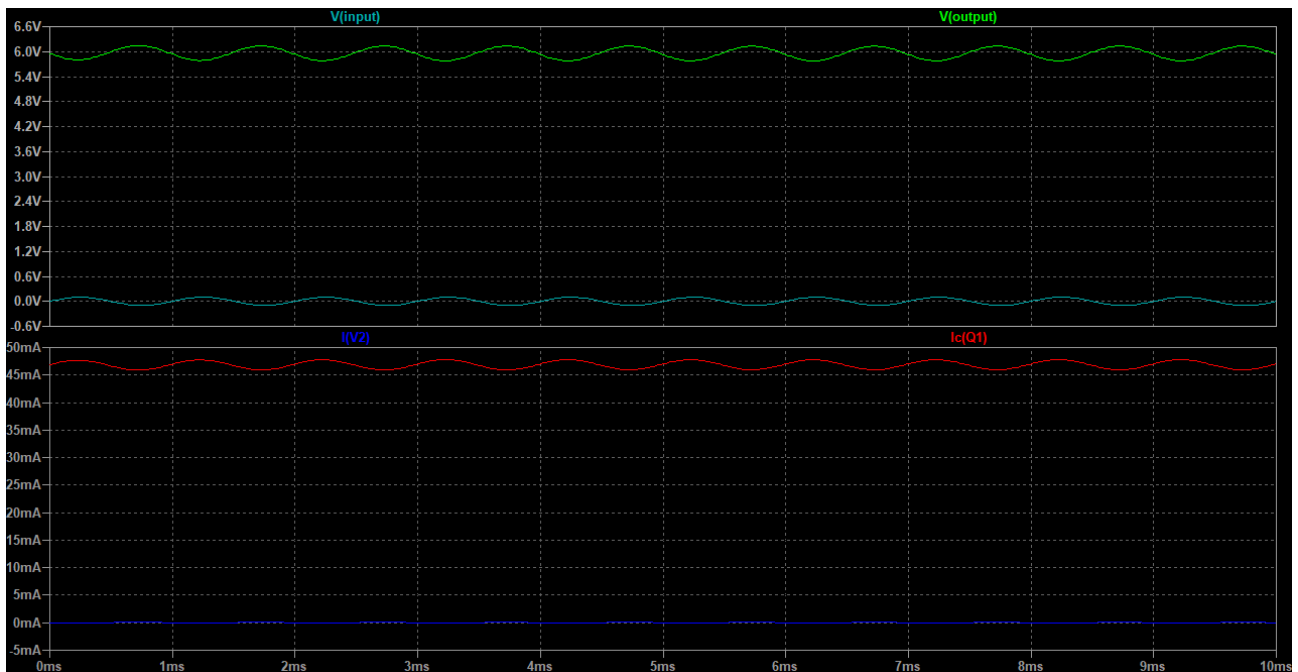


Рис. 14: Осциллограммы входных и выходных тока и напряжения при гармоническом сигнале.

Опять убеждаемся, что выходные характеристики соответствуют заданной рабочей точ-

ке.

Рассчитаем коэффициенты усиления по напряжению и току:

$$k_I = \frac{46.866 \cdot 10^{-3}}{723 \cdot 10^{-6}} = 64.822$$

Данное значение попадает в интервал, данный производителем.

$$k_U = \frac{5.955}{0.1} = 59.55$$

Проведем частотный анализ схемы:



Рис. 15: Частотная характеристика.

Выводы

В данной лабораторной работе был исследован биполярный транзистор. В начале было проведено моделирование работы транзистора в активном режиме с общим эмиттером. Были построены входные и выходные характеристики транзистора, а также некоторые числовые характеристики. Стоит отметить, что значения этих характеристик зависят от схемы включения транзистора.

Во второй части была задана рабочая точка транзистора и затем, с помощью отрицательной обратной связи по току была построена схема функционирования (перед этим были рассчитаны параметры резисторов, включенных в схему).

В результате, по осциллограммам было определено, что расчеты сделаны верно и транзистор действительно усиливает сигнал до определенных значений.

Затем была построена частотная характеристика и можно было убедиться в том, что чем выше частота сигнала, поступающего на вход транзисторного каскада, тем меньше коэффициент усиления по току.