



Министерство науки и высшего образования Российской Федерации
Федеральное государственное бюджетное образовательное учреждение
высшего образования
«Московский государственный технический университет
имени Н.Э. Баумана
(национальный исследовательский университет)»
(МГТУ им. Н.Э. Баумана)

ФАКУЛЬТЕТ ИНФОРМАТИКА И СИСТЕМЫ УПРАВЛЕНИЯ

КАФЕДРА КОМПЬЮТЕРНЫЕ СИСТЕМЫ И СЕТИ (ИУ6)

НАПРАВЛЕНИЕ ПОДГОТОВКИ 09.03.01 Информатика и вычислительная техника

О Т Ч Е Т

по домашнему заданию №2

Название: Моделирование работы усилительного каскада на биполярном транзисторе по схеме с общим эмиттером

Дисциплина: Электроника

Студент

ИУ6-43Б

(Группа)

(Подпись, дата)

В.К. Залыгин

(И.О. Фамилия)

Преподаватель

(Подпись, дата)

В.А. Карпухин

(И.О. Фамилия)

2024 г.

Цель работы

Исследование вольт-амперных характеристик модели биполярного транзистора в программе аналогового и цифрового моделирования электрических и электронных цепей Micro-Cap 12 и расчете номиналов элементов усилительного каскада, работающего в соответствии с заданными техническими условиями.

Задание

На рисунке 1 показаны значения варианта задания.

15	Залыгин Вячеслав	КТ315Е	7,5	560
----	------------------	--------	-----	-----

Рисунок 1 – Вариант задания

Характеристики транзистора представлены на рисунке 2.

Модель элемента	$P_{k\max}, \text{ мВт}$ $P_{kT\max}, \text{ мВт}$	$f_{\text{гп}}, \text{ МГц}$	$U_{k50\max}, \text{ В}$ $U_{k3R\max}, \text{ В}$	$U_{350\max}, \text{ В}$	$I_{k\max}, \text{ мА}$ $I_{kT\max}, \text{ мА}$	$I_{k50}, \text{ мкА}$	$h_{21\beta}$	$C_k, \text{ пФ}$	$r_{\text{гн нас}}, \text{ Ом}$ $r_{50\text{ нас}}, \text{ Ом}$	$K_{\text{ш}}, \text{ дБ}$ $r_{\text{г}}^*, \text{ Ом}$	$t_k, \text{ пс}$ $t_{\text{рвс}}^*, \text{ нс}$	Модель в МС12
КТ315Е	150 (250*)	≥ 250	35* (10к)	6	100	$\leq 0,6$ (10 В)	50...350 (10 В 1 мА)	≤ 7 (10 В)	≤ 30	$\leq 40^*$	≤ 1000	КТ315Е

Рисунок 2 – Характеристики транзистора

1. Построить семейство входных и выходных вольт-амперных характеристик биполярного транзистора (модель выбирается согласно варианту, см. приложенный к заданию файл). На полученных характеристиках отметить запрещенные режимы работы.

2. Рассчитать номиналы элементов усилительного каскада на биполярном транзисторе с общим эмиттером, при которых работа усилительного каскада удовлетворяет условиям:

– амплитуда напряжения выходного сигнала – не менее 15 % от напряжения питания;

– коэффициент усиления усилительного каскада по мощности – не менее 20 дБ;

– коэффициент нелинейных искажений выходного сигнала – не более 15 %.

(напряжение питания усилительного каскада задано вариантом, в качестве входного сигнала используется гармоническое (однотональное) колебание с частотой, заданной вариантом).

Выполнение задания

Задание 1

Выбранная согласно варианту модель транзистора и его характеристики показаны на рисунке 3.

NPN:NPN Transistor

Name: MODEL Value: KT315E

Display: ☐ Pin Markers ☐ Pin Names ☐ Pin Numbers ☒ Current ☒ Power ☒ Condition

Shape: Border ☒ Fill ☒

PART=Q1
VALUE=
MODEL=KT315E
SMOKE=
COST=
POWER=
SHAPEGROUP=Default
PACKAGE=

Ic vs. Vce
BF > 100

2N3903
2N3904
2N3946
2N4014
2N4123
2N4124
2N4265
2N4400
2N5088
KT315E

OK Cancel Font... Add Delete Browse...
New Find... Plot... Syntax... IBIS... Help...

Enabled: TRUE Columns: 3

☒ Help Bar [File Link](#)

☐ Show Data on Exit

Source: Local page 'Models'

LEVEL	1	AF	1	BF	100
BR	1	CJC	0	CJE	0
CJS	0	EG	1.11	FC	500m
GAMMA	10p	IKF	0	IKR	0
IRB	0	IS	.1f	ISC	0
ISE	0	ISS	0	ITF	0
KF	0	MJC	330m	MJE	330m
MJS	0	NC	2	NE	1.5
NF	1	NK	500m	NR	1
NS	1	PTF	0	QCO	0
QUASIMOD	0	RB	0	RBM	0
RC	0	RCO	0	RE	0
T_ABS	undefined	T_MEASURED	undefined	T_REL_GLOBAL	undefined
T_REL_LOCAL	undefined	TF	0	TR	0

Controls the display of pin markers.

Рисунок 3 – Характеристики транзистора

Для исследования входных и выходных ВАХ была собрана схема, представленная на рисунке 4.

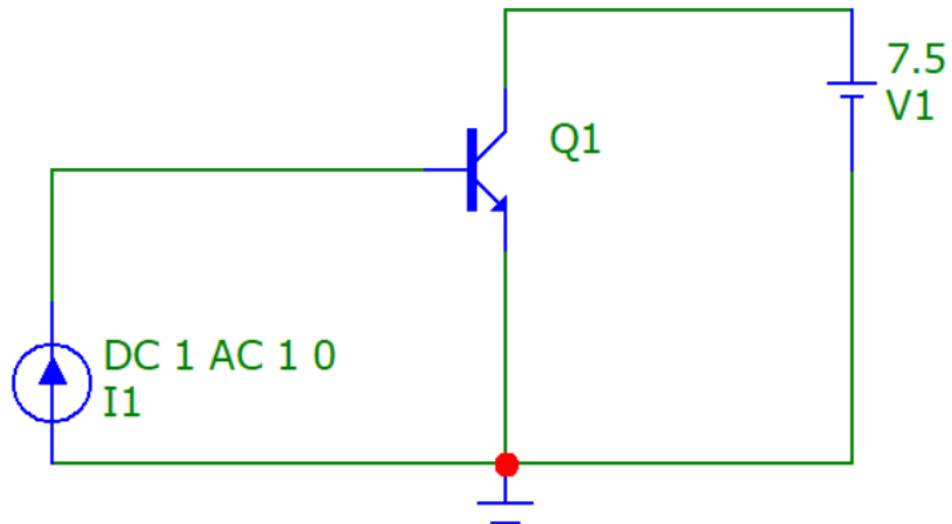


Рисунок 4 – Схема для анализа входных и выходных ВАХ

Результаты проведения dynamic DC анализа приведены на рисунке 5.

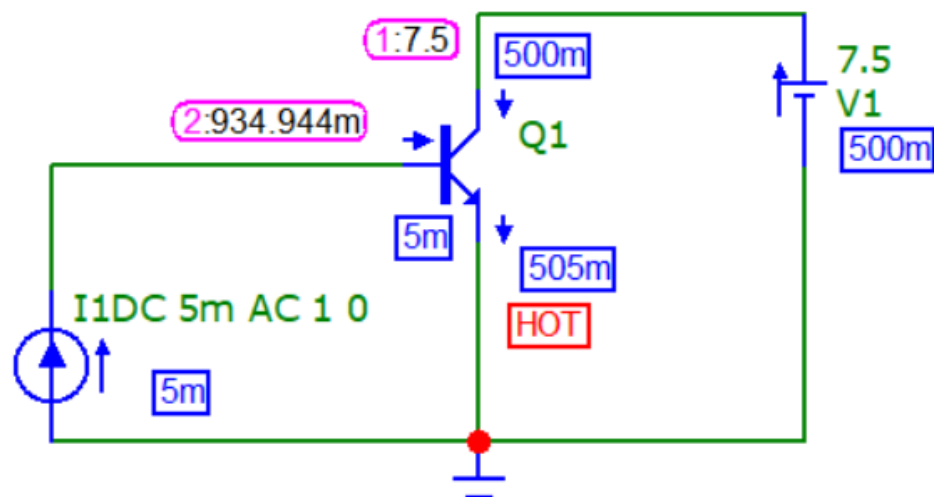


Рисунок 5 – Dynamic DC

Анализ показывает, что при малом токе базы (в 100 раз меньше, чем ток коллектора) транзистор открывается и на эмиттере образуется ток, равный сумме токов базы и коллектора.

Для построения выходной ВАХ используется DC анализ. В окне настройки анализа необходимо выставить множество значений напряжения на коллекторе, а также диапазон значений токов базы. Также необходимо изобразить прямую максимального допустимого тока (для данной модели транзистора соответствует значению $I_{kmax} = 100\text{mA}$) и кривую тока максимальной мощности (для данной модели – $P_{max} = 150\text{mВт}$) при каждом

значении напряжения. Выбранные значения для анализа показаны на рисунке 6.

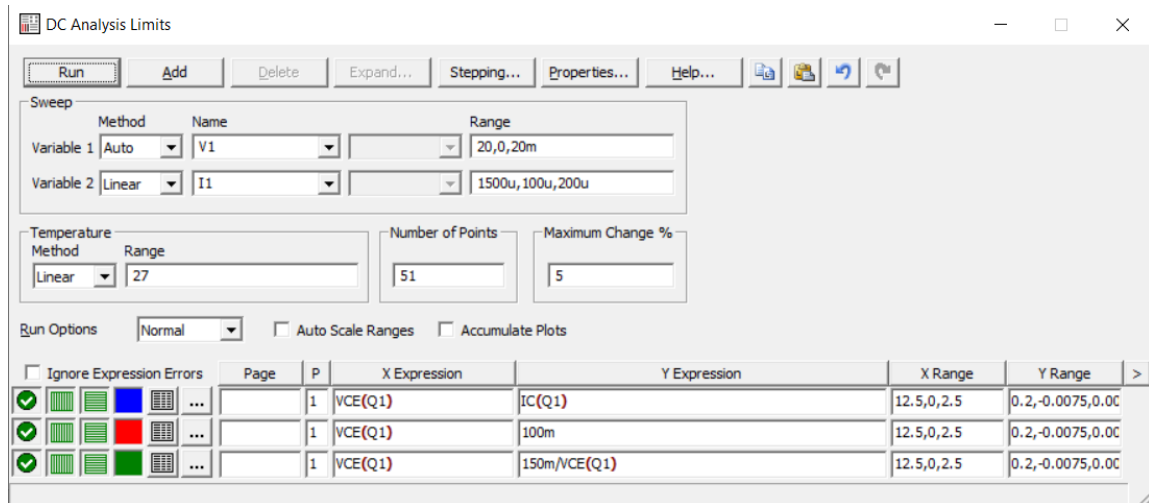


Рисунок 6 – Значения для DC анализа

Полученные графики представлены на рисунке 7. Синий – ветви тока коллектора при разных токах базы, красный – максимально допустимый ток, зеленый – ток максимальной мощности. Заштрихованная область – запрещенный режим работы.

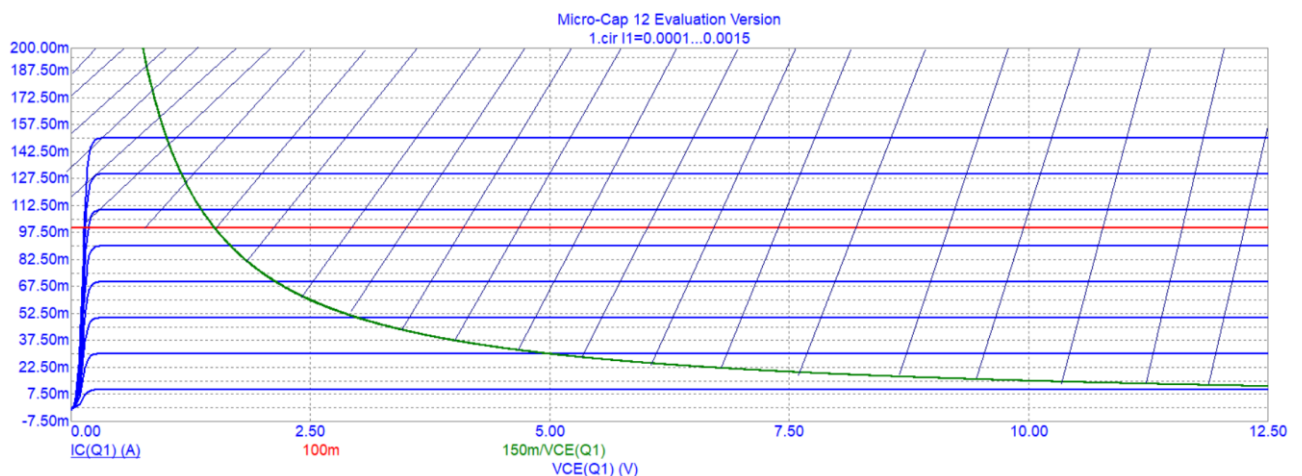


Рисунок 7 – Выходные ВАХ, максимальный допустимый ток, ток максимальной мощности

Для построения входной ВАХ необходимо использовать DC анализ с соответствующими параметрами, представленными на рисунке 8.

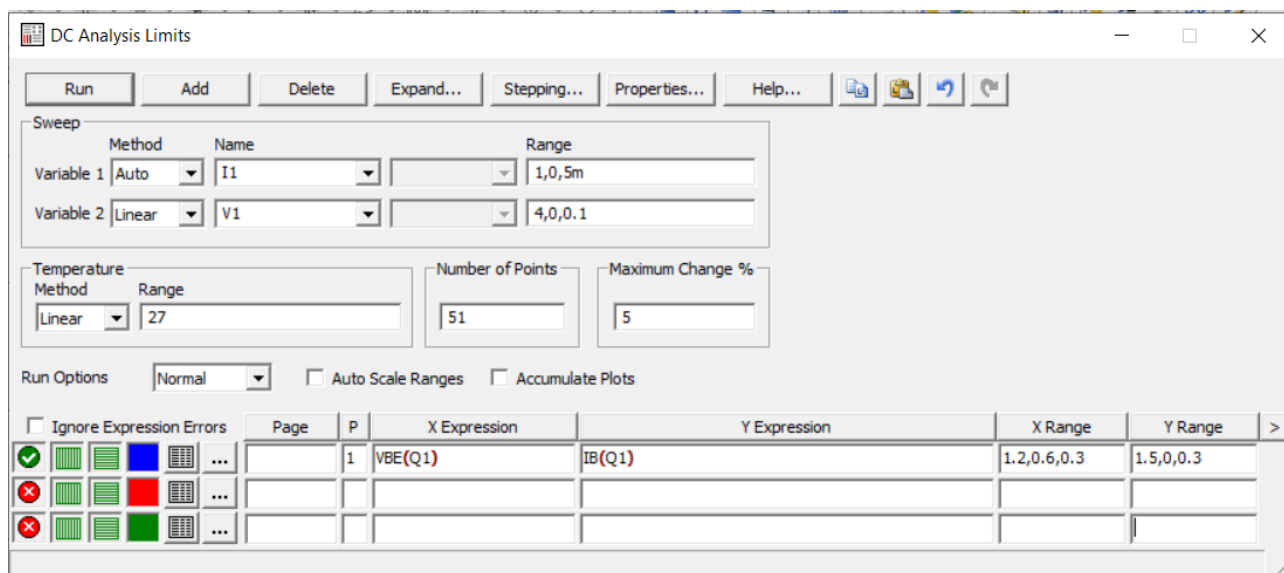


Рисунок 8 – Параметры DC анализа

Тогда результирующий график изображен на рисунке 9. На графике различимы только 3 ветви, но по заданным параметрам их 41. Первые две проходят раздельно и подписаны соответствующими им значениями напряжения база-эмиттер, оставшиеся ветви сливаются вместе и неразличимы на графике.

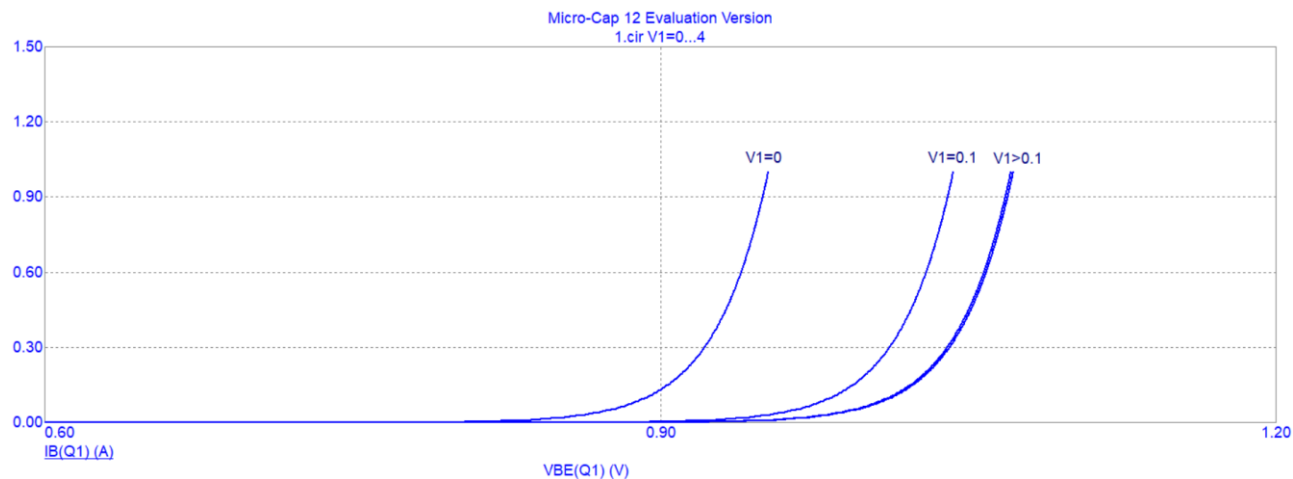


Рисунок 9 – Входные ВАХ

Задание 2

Для расчета номиналов элементов усилительного каскада на биполярном транзисторе с общим эмиттером необходимо собрать данную схему. Схема показана на рисунке 10.

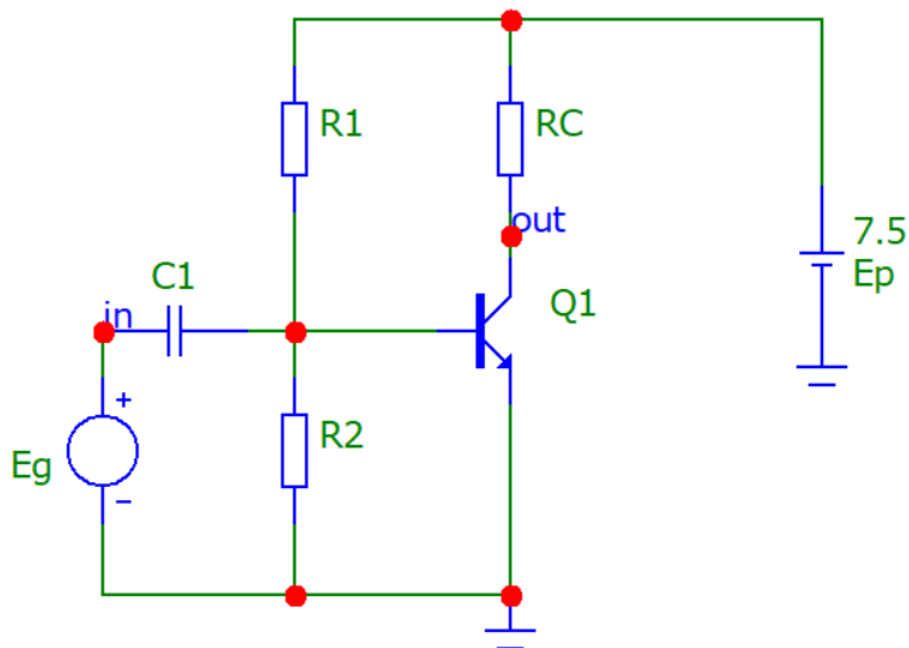


Рисунок 10 – схема усилительного каскада с общим эмиттером и делителем

В рамках варианта даны напряжение источника $E_p = 7.5\text{В}$ и частота сигнала $E_g = 560\text{кГц}$. Необходимо найти амплитуду E_g , параметры резисторов делителя R_1, R_2 и R_C .

Для нахождения неизвестных нужно выбрать кривую из семестра выходных ВАХ, которая находится выше остальных, при условии, что она лежит не в запрещенной области (в незаштрихованной области). Такая ветвь соответствует току базы $I_b = 945\text{мкА}$. Выбранная ветвь обозначена на рисунке 11.

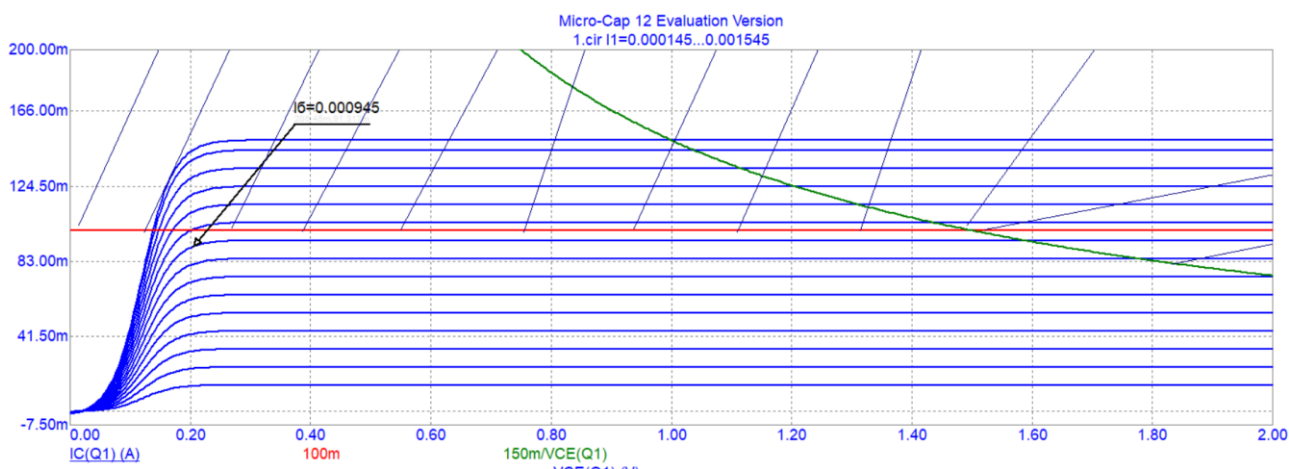


Рисунок 11 – Выбранная выходная ВАХ с соответствующим параметром тока базы

Затем необходимо определить напряжение база-эмиттер минимальное, максимальное, среднее и амплитуду - $U_{бэ\ min}$, $U_{бэ\ max}$, $U_{бэ\ 0}$, $U_{бэ\ ампл}$ соответственно. Для этого необходимо на входной ВАХ, соответствующей входному напряжению $E_p = 7.5V$, ограничить линейный участок. Значения напряжения база-эмиттер минимальное, максимальное и линейный участок входной ВАХ показаны на рисунке 12.

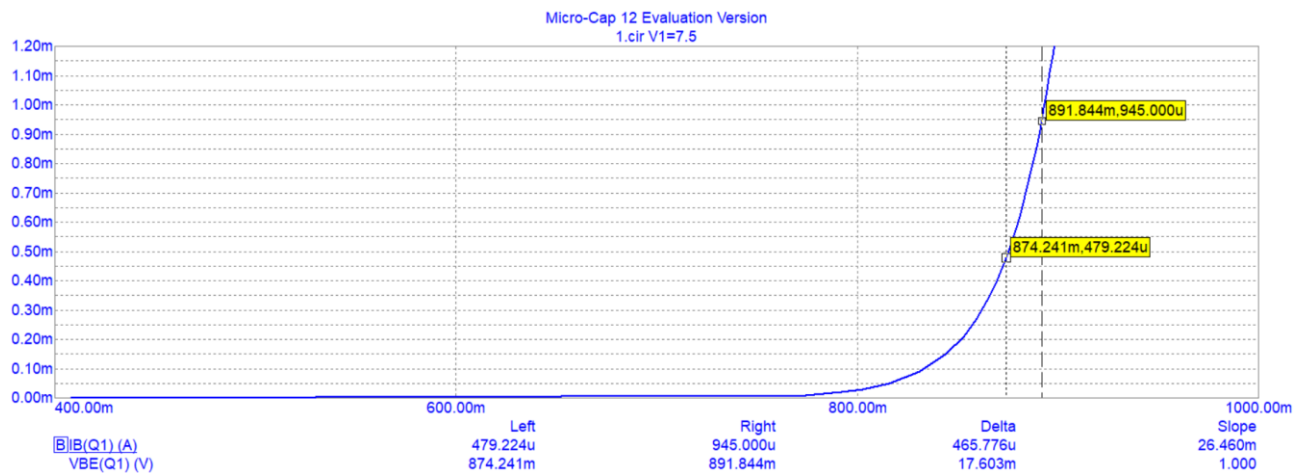


Рисунок 12 – линейный участок входной ВАХ и минимальное и максимальное значение напряжения база-эмиттер

Тогда получается $U_{бэ\ min} = 874\text{мВ}$, $U_{бэ\ max} = 891\text{мВ}$, а значит $U_{бэ\ 0} = \frac{U_{бэ\ min} + U_{бэ\ max}}{2} = 882\text{мВ}$, $U_{бэ\ ампл} = \frac{U_{бэ\ max} - U_{бэ\ min}}{2} = 8.5\text{мВ}$.

Для определения сопротивления R_c необходимо провести нагрузочную прямую. Она представлена на рисунке 13 черным цветом. Прямая пересекает ось абсцисс в точке $E_p = 7.5V$.

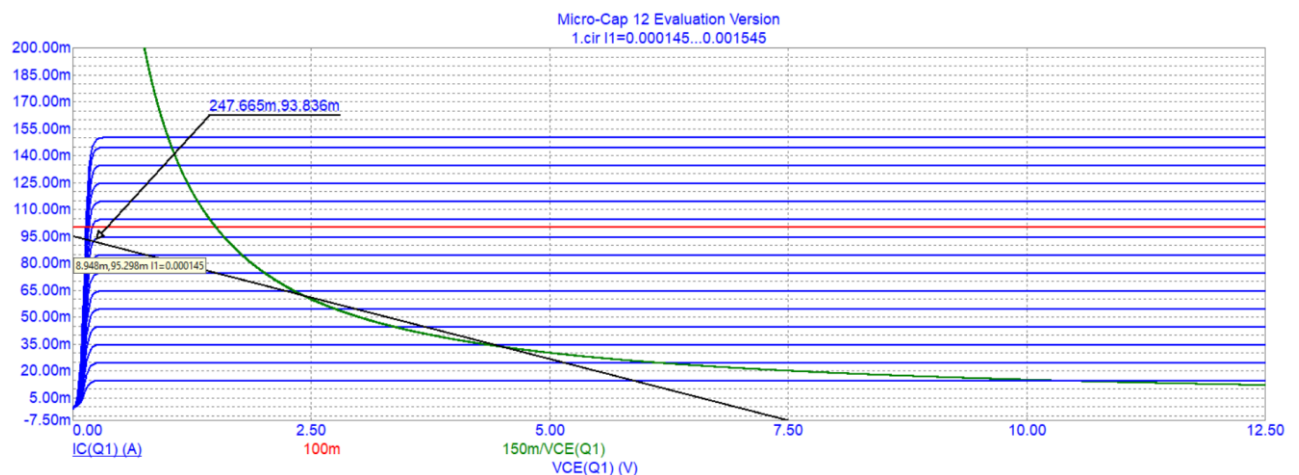


Рисунок 13 – Нагрузочная прямая

Ток: $I_c = 0.0965\text{A}$. Он определяется как ток точки пересечения оси ординат и нагрузочной прямой.

Тогда сопротивление R_c равно отношению входного напряжения к данному току: $R_c = \frac{E_c}{I_c} = \frac{7.5}{0.0965} = 77\text{Ом}$.

Затем необходимо вычислить номиналы резисторов делителя. Для этого необходимо воспользоваться формулой $\frac{E_p}{U_{бэ0}} = 1 + \frac{R_1}{R_2}$. Пусть $R_1 = 100\text{ Ом}$, тогда по формуле второй резистор будет иметь сопротивление $R_2 = \frac{R_1 * U_{бэ0}}{E_p - U_{бэ0}} = \frac{100 * 0.882}{7.5 - 0.882} = 13.33\text{ Ом}$.

Следовательно, все неизвестные параметры цепи найдены:

$$E_g = U_{бэампл} = 8.5\text{мВ}$$

$$R_c = 77\text{ Ом}$$

$$R_1 = 100\text{ Ом}$$

$$R_2 = 13.33\text{ Ом}$$

На рисунках 14 и 15 представлены заполненные параметры схемы.

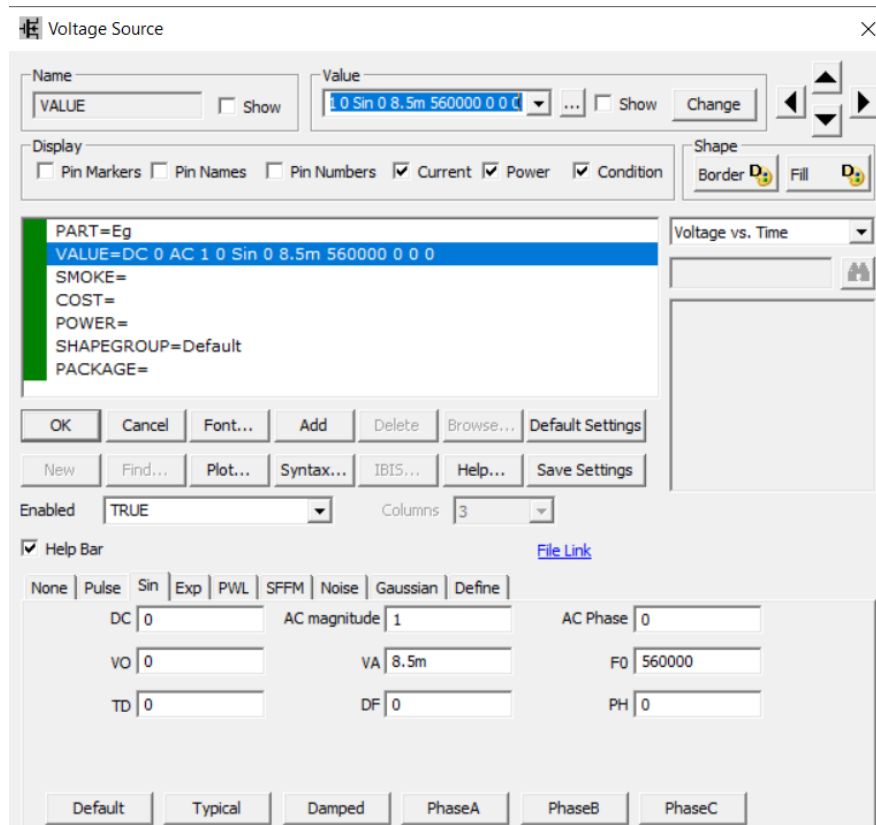


Рисунок 14 – параметры источника E_g

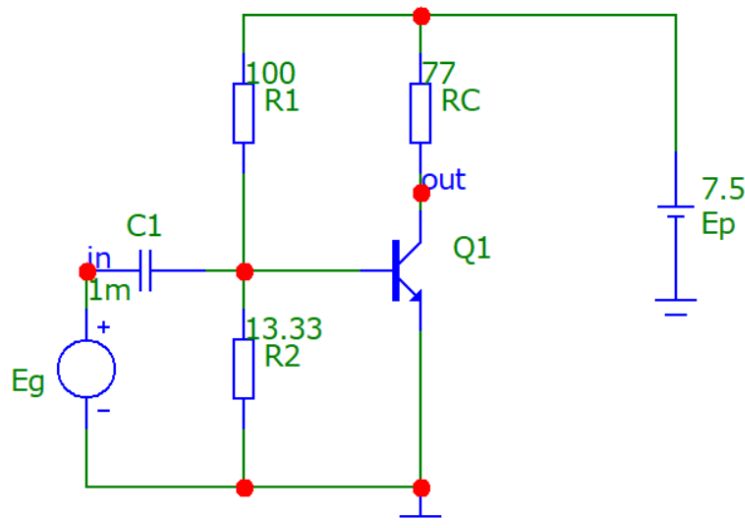


Рисунок 15 – Общий вид схемы с заполненными значениями

Далее необходимо провести анализ схемы на предмет удовлетворения требованиям по амплитуде напряжения выходного сигнала, коэффициенту усиления усилительного каскада по мощности и коэффициенту нелинейных искажений выходного сигнала. Для получения требуемых параметров необходимо провести анализ переходных процессов.

Оценка времени выполнения анализа и шага: $f = 580\text{кГц}$, $t_{run} = \frac{1}{f} = \frac{1}{580 \cdot 10^3} = 1.72 \cdot 10^{-6}\text{с}$. Тогда шаг в 1000 раз меньше: $\Delta t = 1.7\text{нс}$.

Параметры анализа переходных процессов представлены на рисунке 16.

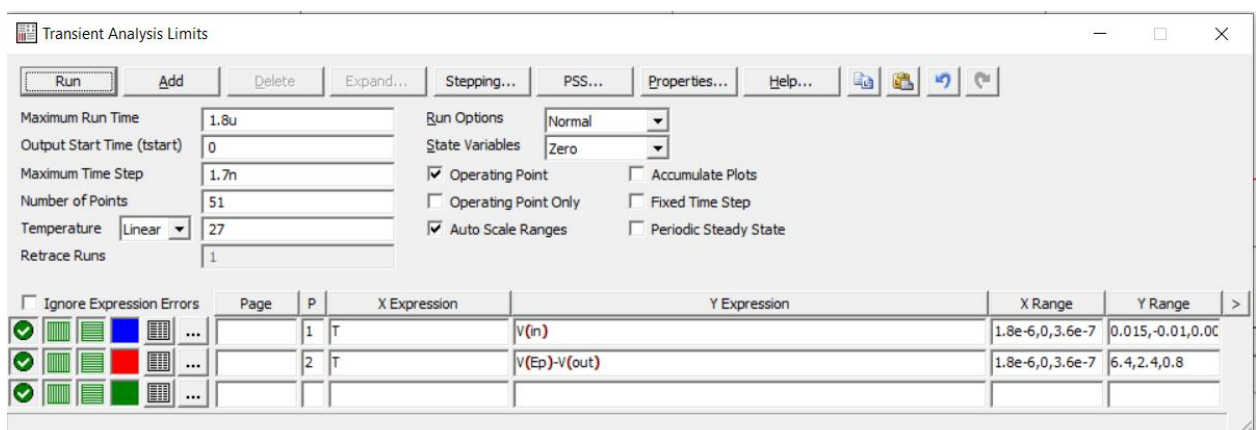


Рисунок 16 – Параметры transient analysis

Графики входного и выходного сигналов представлены на рисунке 17. Синим показан график управляющего сигнала, красным – выходной сигнал. На графиках показаны размахи соответствующих сигналов.

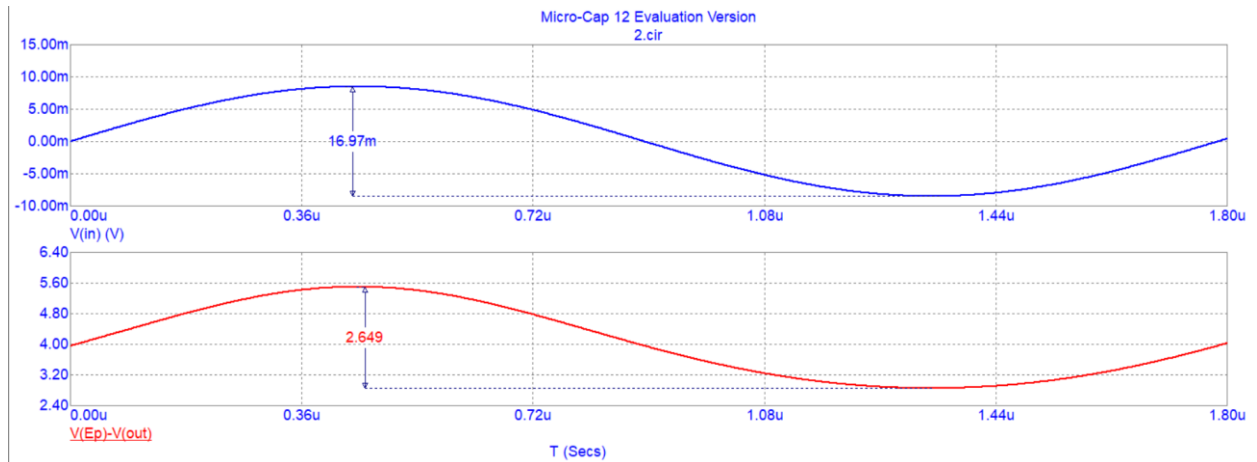


Рисунок 17 – Осциллограммы входного и выходного сигналов

Полученная амплитуда входного сигнала $U_{in\text{ампл}} = \frac{U_{in\text{размах}}}{2} = \frac{16.97\text{мВ}}{2} = 8.485\text{мВ}$, амплитуда выходного сигнала – $U_{out\text{ампл}} = \frac{U_{out\text{размах}}}{2} = \frac{2.649\text{В}}{2} = 1.325\text{В}$. Тогда отношение амплитуды выходного сигнала к напряжению питания $\frac{1.325}{7.5} = 0.176 = 18\%$. Значение больше 15%, следовательно, первое требование выполнено.

Для определения коэффициента усиления необходимо подключить нагрузку (выбран резистор в 1 кОм) и выполнить динамический АС анализ. Анализ показан на рисунке 18.

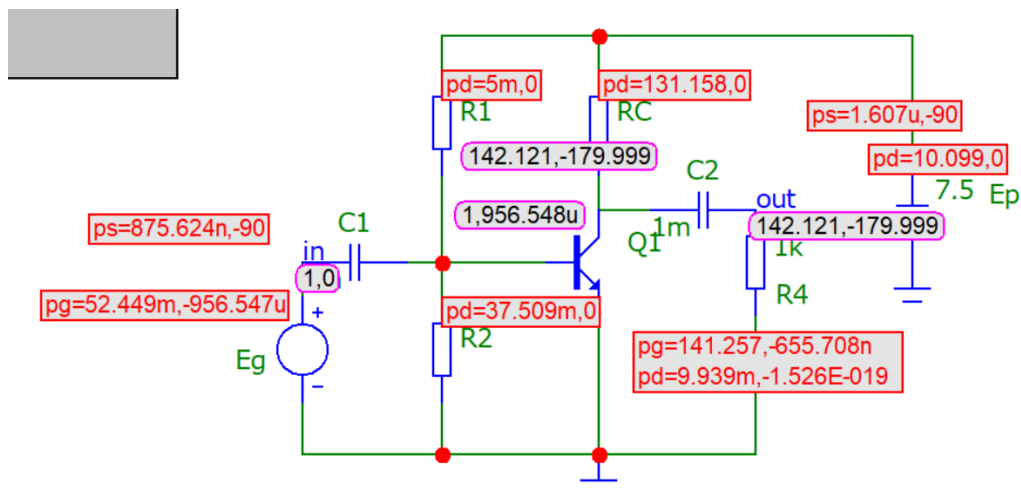


Рисунок 18 – Dynamic AC analysis

Тогда входная мощность будет определена как $P_{in} = 52.449\text{мВт}$, а выходная – $P_{out} = 10.099\text{Вт}$. Следовательно, коэффициент усиления $K_p = \frac{P_{out}}{P_{in}} = \frac{10.01\text{Вт}}{0.05\text{Вт}} = 200$. Переводя в децибелы, $K_{pdb} = 10\lg(K_p) = 23.01\text{Дб}$. Значение больше порога в 20 децибел, а значит, выполняется второе требование.

Спектр входного и выходного графиков, а также искажения представлены на рисунке 19 зеленым, оранжевым и черным соответственно.

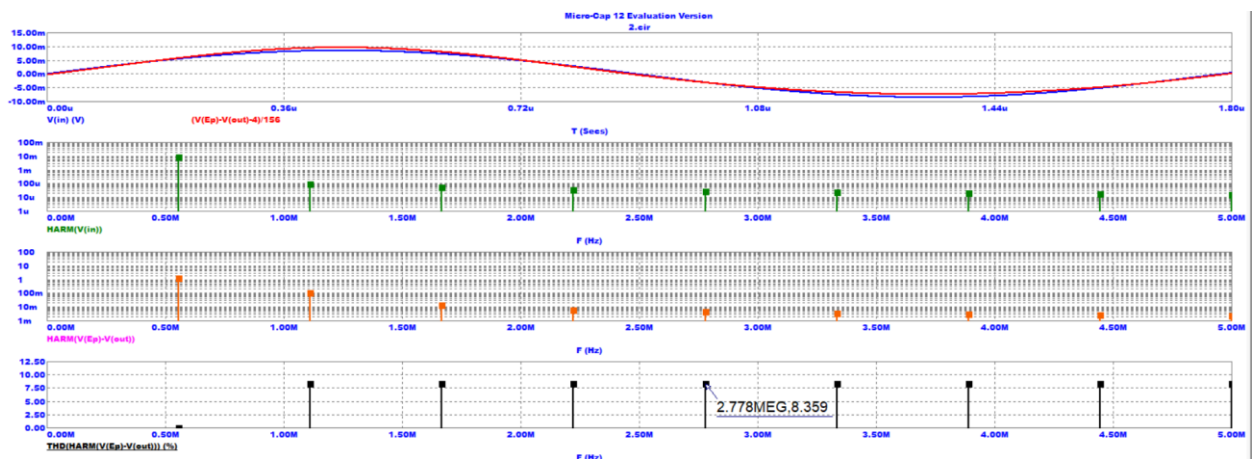


Рисунок 19 – спектры сигналов и искажения

Как видно из графика, искажения составляют 8.3%, что меньше порога в 15% требуемых. Следовательно, третье требование выполнено.

Вывод

В первом задании были построены семестра входных и выходных ВАХ биполярного транзистора по варианту. В соответствии с параметрами транзистора по варианту изображена область запрещенного режима работы по максимально допустимому току $I_{kmax} = 100\text{мА}$ и максимальной мощности $P_{max} = 150\text{мВт}$.

В втором задании найдены искомые параметры схемы усилительного каскада с общим эмиттером и делителем на основе предложенного транзистора:

$$E_g = 8.5\text{мВ}$$

$$R_c = 77\text{ Ом}$$

$$R_1 = 100\text{ Ом}$$

$$R_2 = 13.33 \text{ Ом}$$

Выбрана наиболее оптимальная ВАХ, соответствующая току базы $I_b = 945 \text{ мкА}$, построена нагрузочная прямая. Построены осциллограммы входного и выходного сигналов, спектры сигналов и искажения. В результате усилительный каскад имеет следующие характеристики:

- амплитуда напряжения выходного сигнала: 18% от напряжения питания;
- коэффициент усиления усилительного каскада по мощности: 23Дб;
- коэффициент нелинейных искажений выходного сигнала: 8%.

Список использованных материалов

1. Вариант: модель транзистора, напряжение питания и частота входного сигнала;
2. Справочная таблица с основными параметрами заданных по варианту транзисторов;
3. Библиотека моделей отечественных транзисторов для программы Micro-Cap
4. Инструкция по установке библиотеки моделей отечественных транзисторов;
5. Учебник с графоаналитическим методом расчета усилительного каскада.