



Правительство Российской Федерации
Федеральное государственное автономное образовательное учреждение
высшего образования
"Национальный исследовательский университет
"Высшая школа экономики"

Московский институт электроники и математики им. А.Н. Тихонова
Департамент электронной инженерии

Дисциплина
Компьютерный практикум
«Компьютерное моделирование при разработке программно-аппаратных
радиоэлектронных средств»

ОТЧЕТ
«Основы моделирования усилительных каскадов на
биполярных транзисторах»

Выполнил: студент группы БИТ-203 _____ / Ефремов В.В. /
подпись расшифровка подписи
«04» декабря 2021 г.

Проверил: преподаватель _____ / Королев П.С. /
подпись расшифровка подписи

«04» декабря 2021 г.

Москва, 2021



Правительство Российской Федерации
Федеральное государственное автономное образовательное учреждение
высшего образования
"Национальный исследовательский университет
"Высшая школа экономики"

Аннотация

Повозились с MicroCap и Mathcad. Слегка познакомились с работой транзисторов. Узнали что маткад совершенно ужасен (необходимость пользоваться мышкой, неконсистентные шорткаты, ограничение в две метки на ось в графиках).



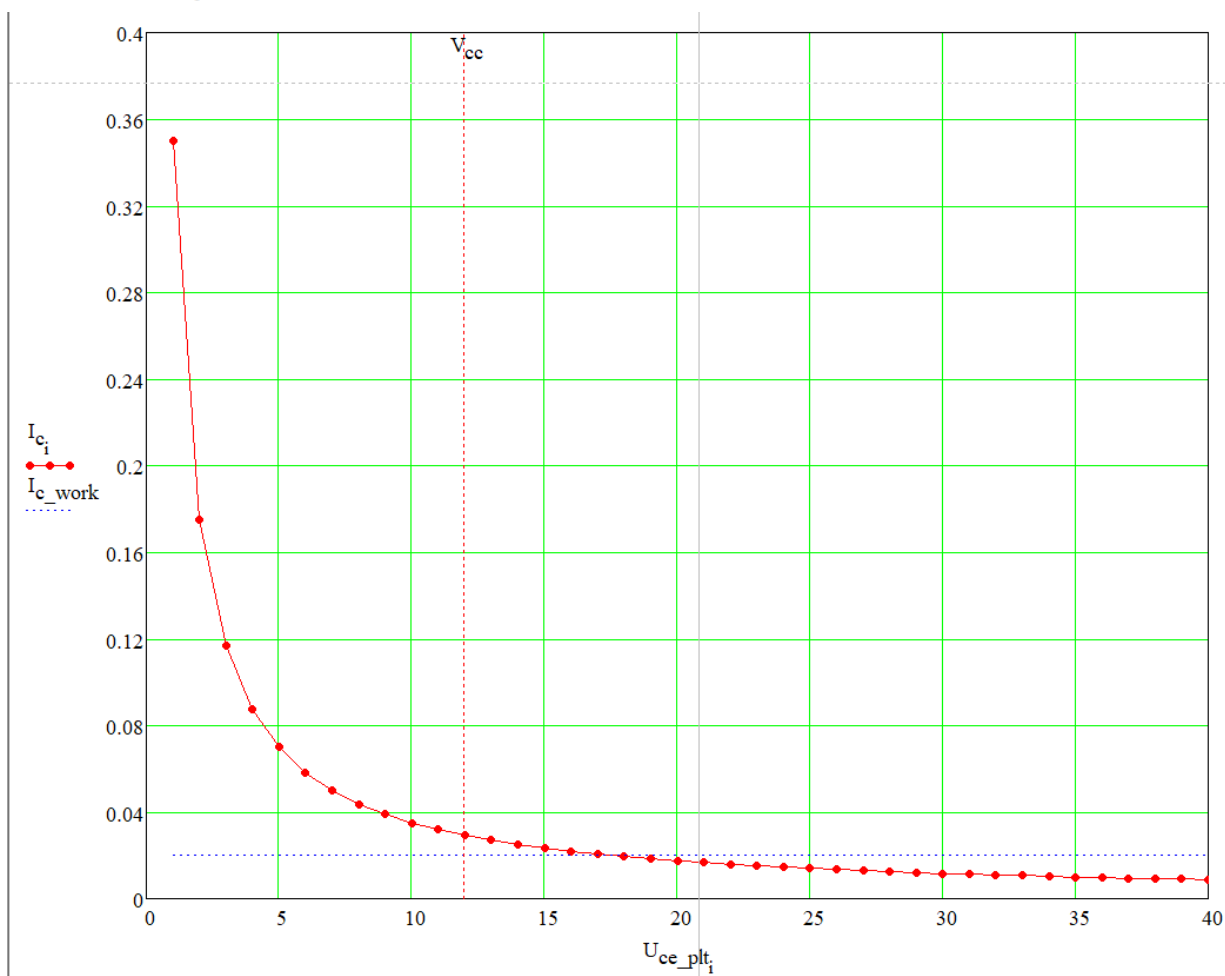
Правительство Российской Федерации
Федеральное государственное автономное образовательное учреждение
высшего образования
"Национальный исследовательский университет
"Высшая школа экономики"

Кривая мощности транзистора

Транзистор потребляет некоторую мощность, которую рассеивает в виде тепла. Максимальная рассеиваемая мощность ограничена, в нашем случае 0.35Вт. Поэтому при каждом фиксированном напряжении на коллекторе есть ограничение на ток на коллекторе (если он будет слишком велик, то мощность, которая произведение тока на напряжение, превысит максимально-рассеиваемую, будет выделяться больше тепла, чем рассеиваться, транзистор разогреется и сгорит).

Зависимость максимального тока коллектора от напряжения коллектора это простая гипербола. Построим её в матлабе:

```
Ic_max := 0.2
h21_max := 300          Vcc := 12
Ptr_max := 0.35         Ic_work := 0.02
Uce_max := 40
i := 1..40
Uce_plt_i := i
Ic_i :=  $\frac{P_{tr\_max}}{U_{ce\_plt_i}}$ 
```

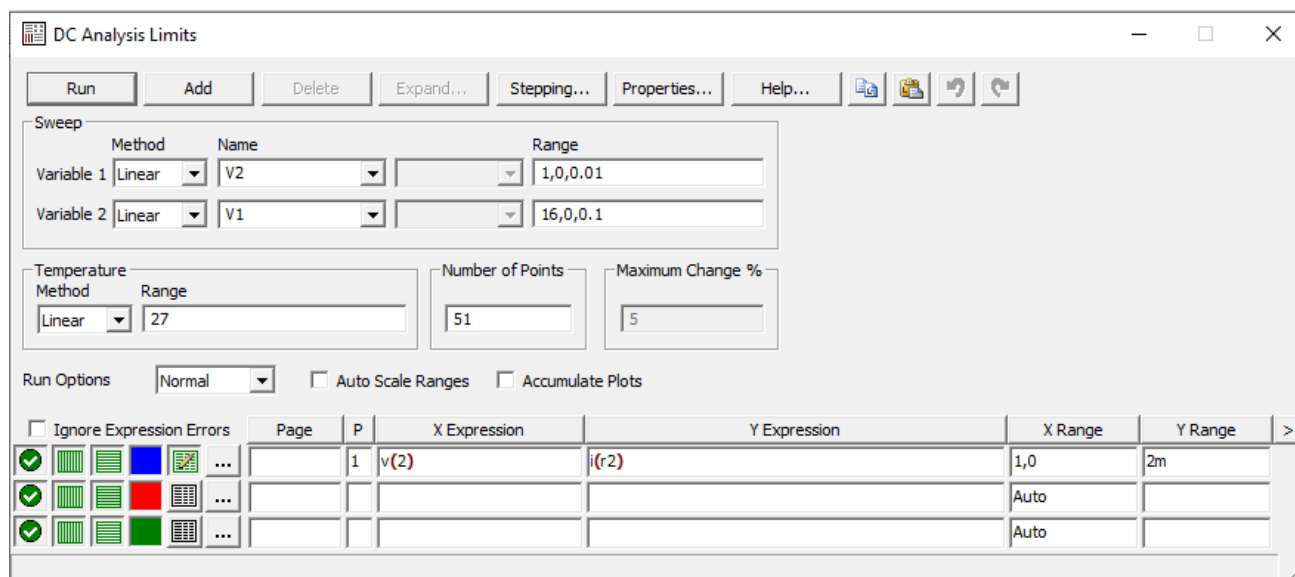
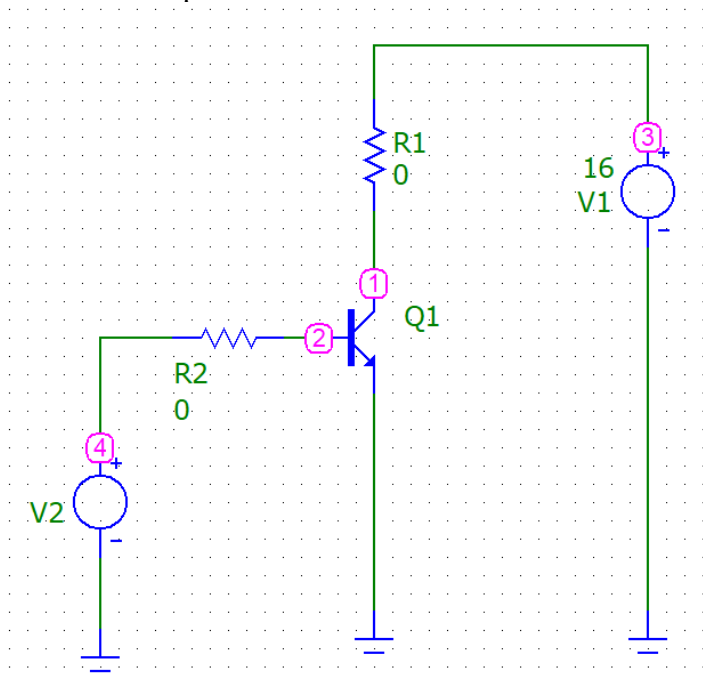




Правительство Российской Федерации
Федеральное государственное автономное образовательное учреждение
высшего образования
"Национальный исследовательский университет
"Высшая школа экономики"

ВАХ транзистора (входная)

Зависимость тока базы от напряжения базы при фиксированном напряжении коллектора.
Модель в микрокапе:



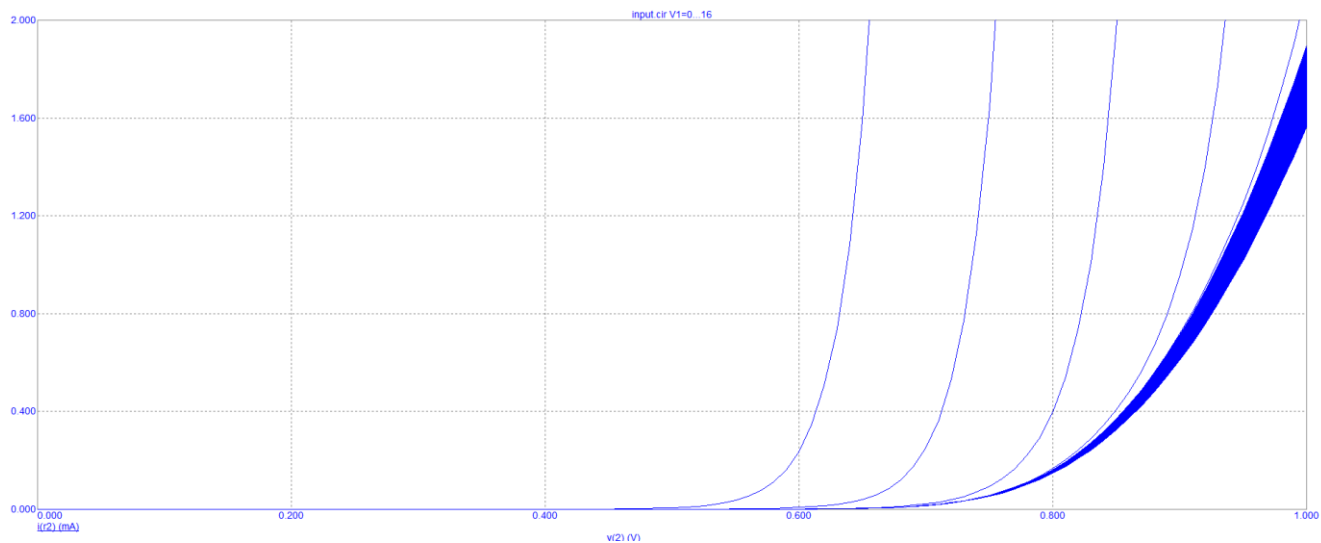
Variable 2, которое V1, 16,0,0.1 задает шаг напряжения коллектора с которым мы строим графики. Т.е. будет 160 графиков при напряжениях коллектора 0В, 0.1В, ... , 16В.

X expression и y expression задает что именно мы строим.

Если графики не такого вида, то стоит попробовать перевернуть на 180° резисторы в схеме (почему они не симметричны и это работает я не знаю).

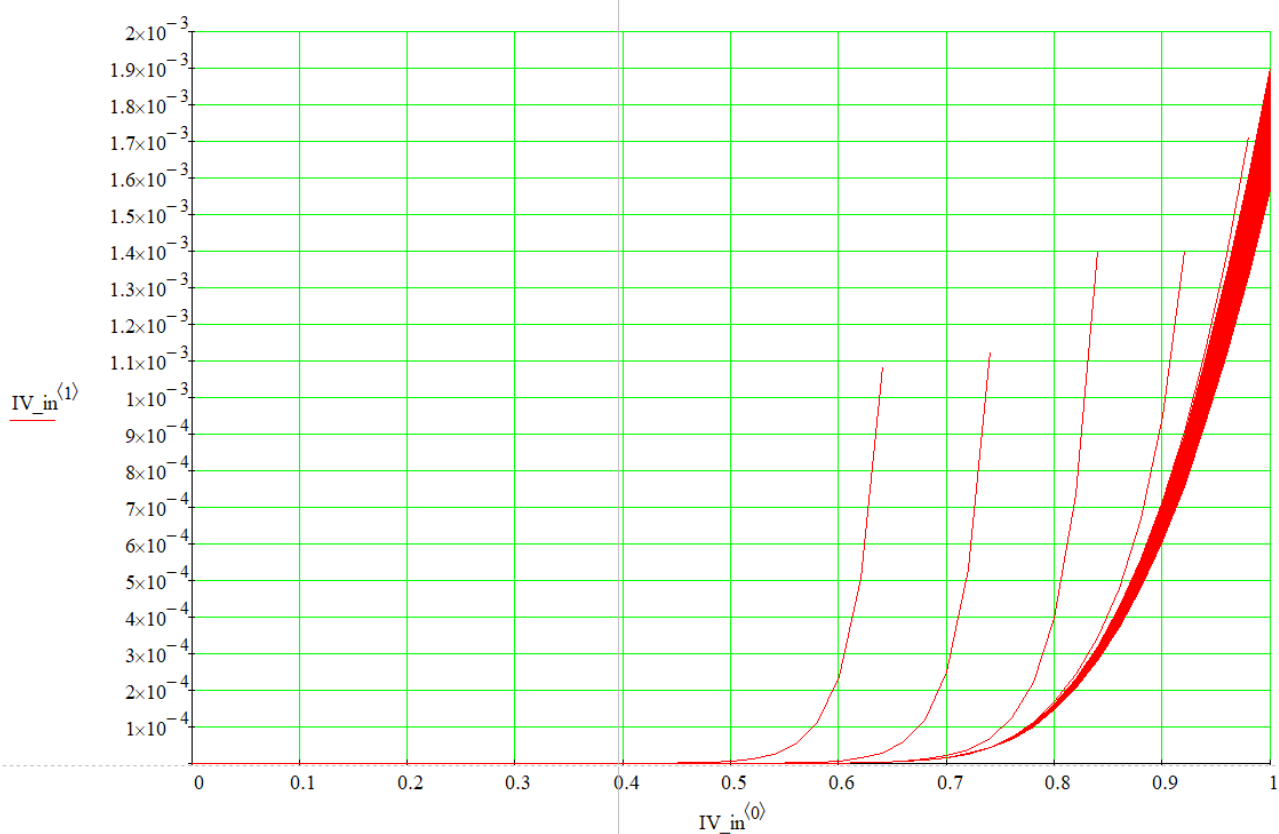


Правительство Российской Федерации
Федеральное государственное автономное образовательное учреждение
высшего образования
"Национальный исследовательский университет
"Высшая школа экономики"



Также можно построить это же график по точкам в маткаде.

```
IV_in := READPRN("input.DNO")
```



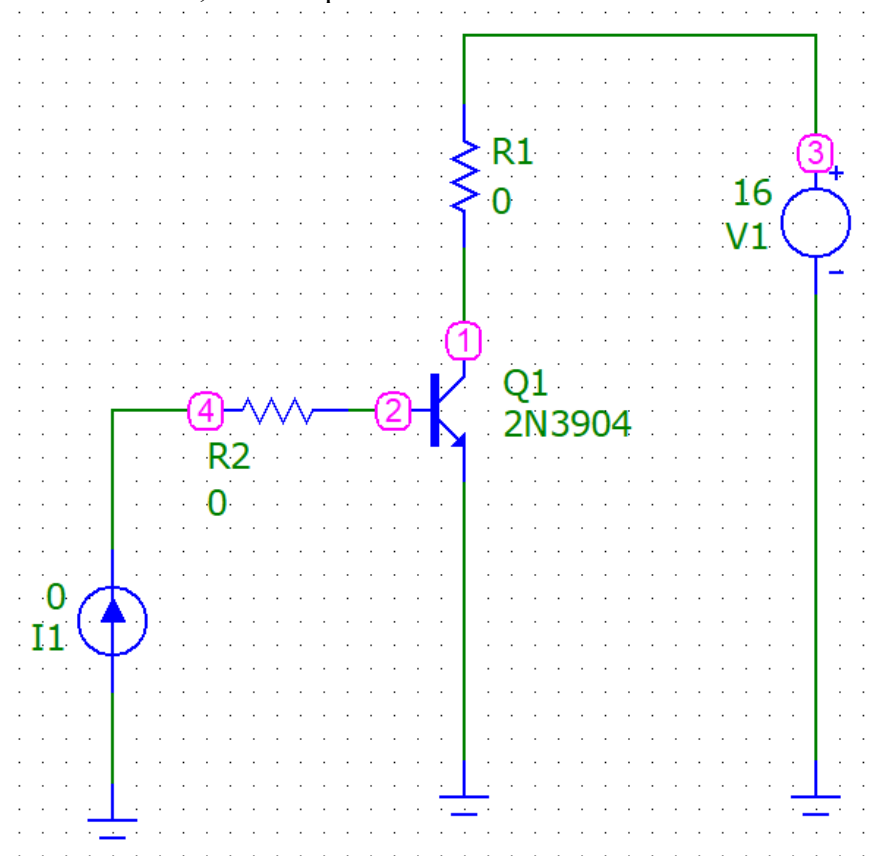
Чтобы строился набор графиков, я не одна непрерывная линия в настройках графика – traces - type: draw (вместо type: lines).
Видно что графики совпадают. Микрокап умеет нарисовать облако точек, кто бы мог подумать.



Правительство Российской Федерации
Федеральное государственное автономное образовательное учреждение
высшего образования
"Национальный исследовательский университет
"Высшая школа экономики"

ВАХ транзистора (выходная):

Аналогично предидущему пункту можно построить зависимость тока коллектора от напряжения коллектора при постоянном токе базы. Схема чуть отличается тем, что в базе источник тока, а не напряжения.



DC Analysis Limits

Run Add Delete Expand... Stepping... Properties... Help...

Sweep

Variable	Method	Name	Range
Variable 1	Linear	V1	16,0,0.1
Variable 2	Linear	I1	200u,0,10u

Temperature

Method	Range
Linear	27

Number of Points: 51

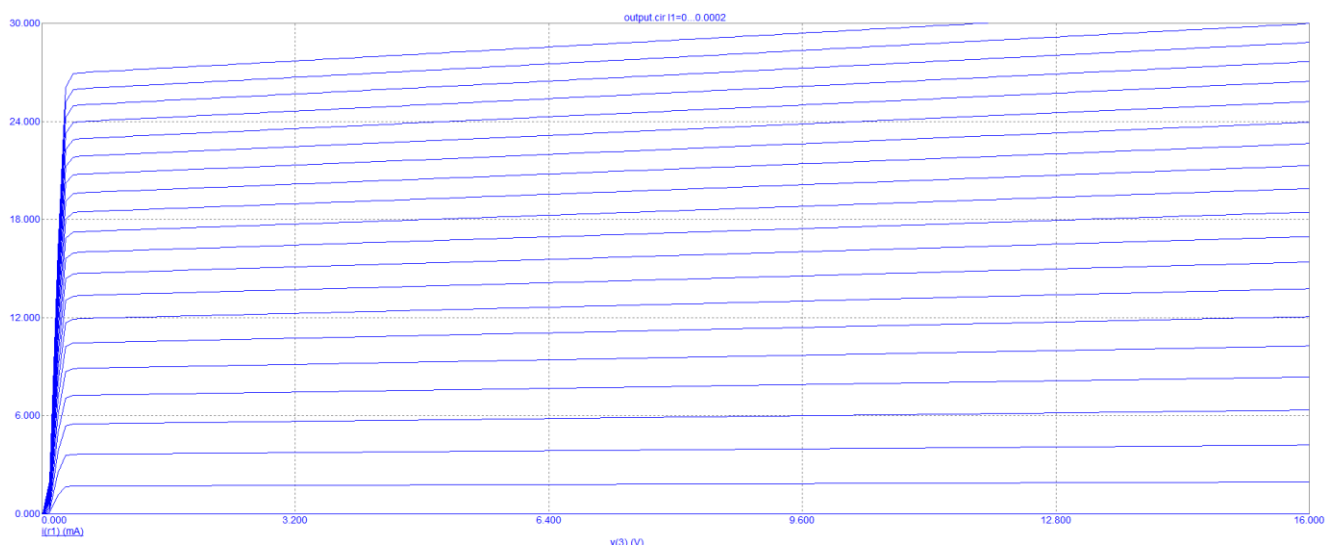
Maximum Change %: 5

Run Options: Normal ☐ Auto Scale Ranges ☐ Accumulate Plots

Ignore Expression Errors	Page	P	X Expression	Y Expression	X Range	Y Range	>
<input checked="" type="checkbox"/>		1	v(3)	i(r1)	16	30m	
<input checked="" type="checkbox"/>					Auto		
<input checked="" type="checkbox"/>					Auto		

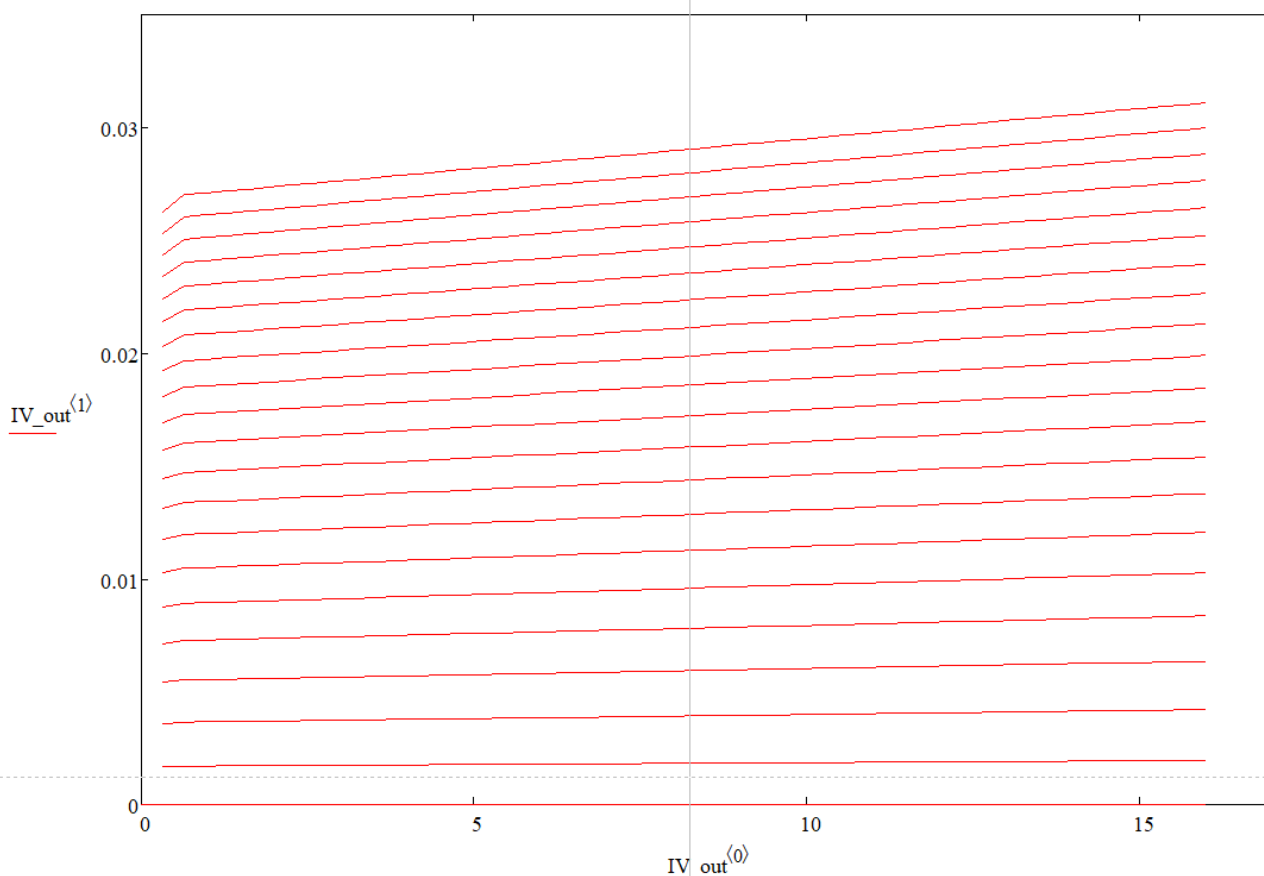


Правительство Российской Федерации
Федеральное государственное автономное образовательное учреждение
высшего образования
"Национальный исследовательский университет
"Высшая школа экономики"



И тот же график в маткаде:

IV_out := READPRN("output.DNO")





Правительство Российской Федерации
Федеральное государственное автономное образовательное учреждение
высшего образования
"Национальный исследовательский университет
"Высшая школа экономики"

Линия нагрузки

Рабочий ток коллектора – 20мА, если придет больше, то скорее всего все сгорит через какое-то время. Ну или хотя бы будет работать не как задумано.

Если мы фиксируем ток базы и напряжение коллектора, то ток коллектора можно будет найти, например, из графика предыдущего пункта.

Построим в маткаде график выходной ВАХ с парой доп. графиков:

```
IV_out := READPRN("output.DNO")
```

```
k := 1..2
```

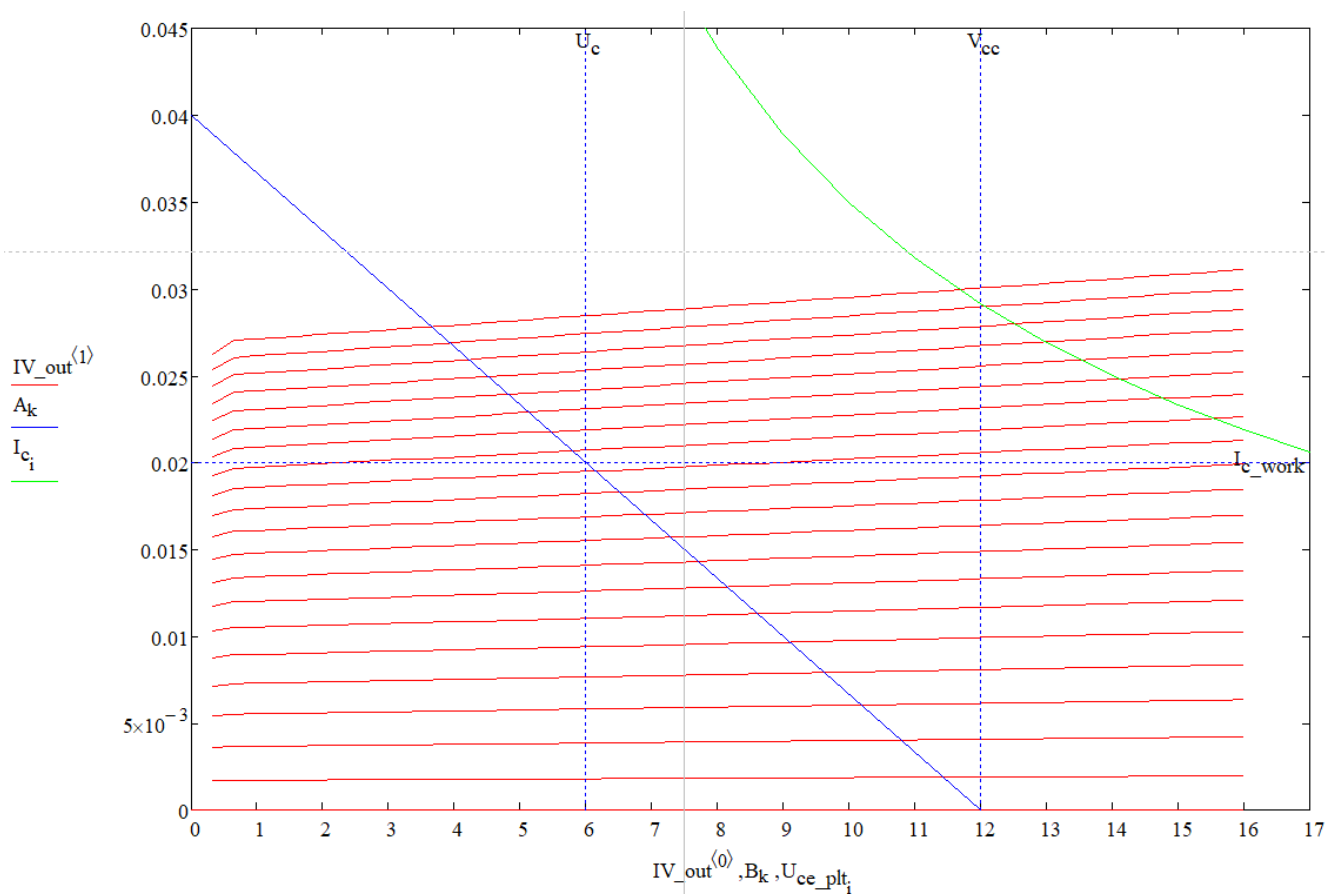
$$A_1 := \frac{V_{cc} \cdot I_{c_work}}{V_{cc} - \frac{V_{cc}}{2}}$$

```
A_2 := 0
```

```
B_1 := 0
```

```
B_2 := 12
```

```
U_c := 6
```



Горизонтальная ось – напряжение V1, вертикальная – ток коллектора.

Зеленая гипербола – кривая максимальной мощности. Через (примерно) точку пересечения зеленой гиперболы и самого высокого красного графика проводим вертикальную прямую V_{cc}. Её смысл – максимально напряжение V1, которое можно использовать (предполагая, что ток базы может меняться от 0 до 200мкА). Если, например, мы возьмем V1=15В и ток базы 200мкА,



Правительство Российской Федерации
Федеральное государственное автономное образовательное учреждение
высшего образования
"Национальный исследовательский университет
"Высшая школа экономики"

то ток коллектора будет почти 30мА. Эта точка лежит выше зеленой гиперболы, т.е. будет превышена максимальная допустимая мощность.

Далее, мы хотим чтобы напряжение коллектора U_c было в два раза меньше напряжения V_1 (рекомендация из слайдов). Для этого сделаем сопротивление R_1 не нулевым, на нем будет падение напряжения и напряжение на коллекторе будет как и надо. Можно посчитать что $R_1 = 300\text{Ом}$.

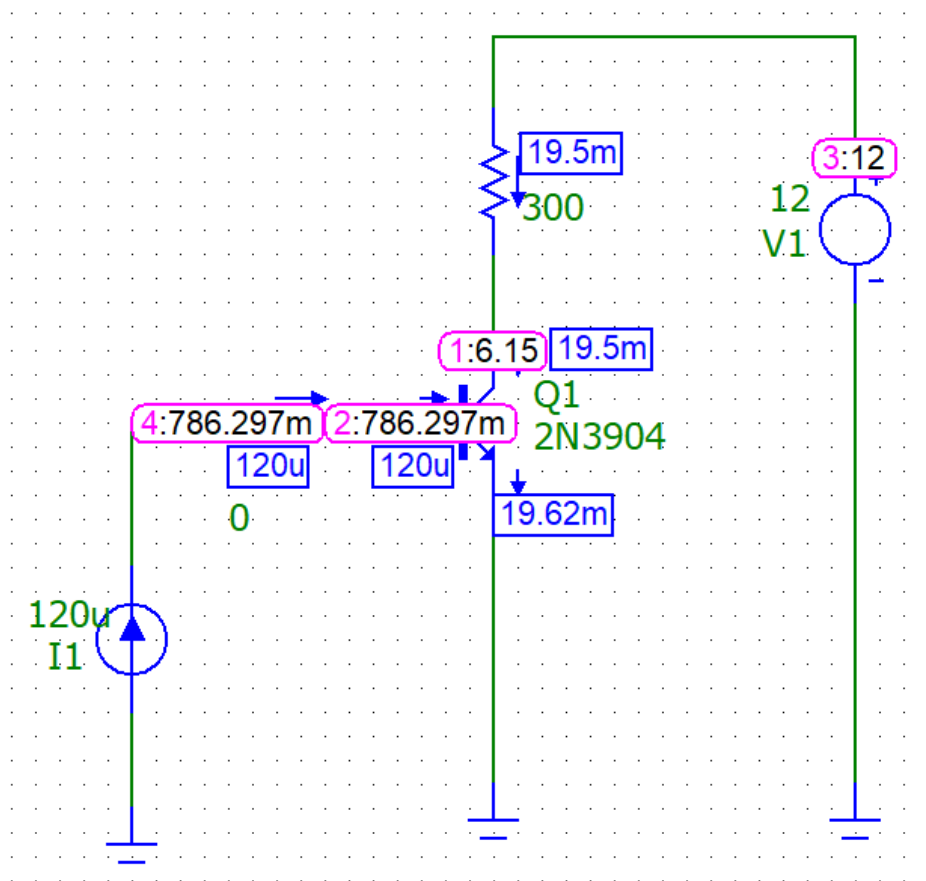
Итак, напряжение на коллекторе $U_c = 6\text{В}$, но мы хотим чтобы ток коллектора был не больше 20мА. Смотрим на пересечение U_c и I_{c_work} на графике. Те графики, которые лежат выше соответствуют слишком большому току базы. Можно посчитать, что под пересечением лежат 12 графиков, т.е. максимальный ток базы – 120мкА



Правительство Российской Федерации
Федеральное государственное автономное образовательное учреждение
высшего образования
"Национальный исследовательский университет
"Высшая школа экономики"

Проверка работы схемы. Этап 1

В предыдущем пункте мы получили $R1=300\Omega$ и $I1=120\mu A$. Посмотрим на симуляцию микрокапа (можно включить Analysis - Dynamic DC чтобы значения токов\напряжений пересчитывались автоматически):



Напряжение на коллекторе 6.15В. Почти.

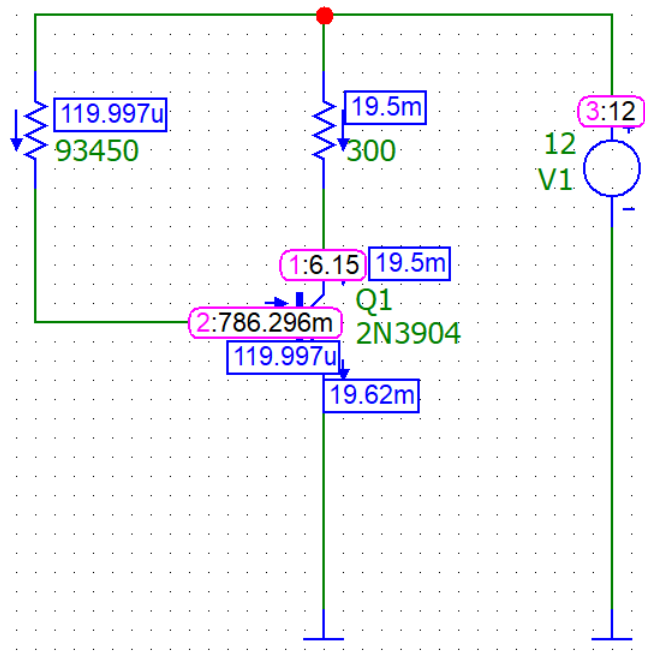


Правительство Российской Федерации
Федеральное государственное автономное образовательное учреждение
высшего образования
"Национальный исследовательский университет
"Высшая школа экономики"

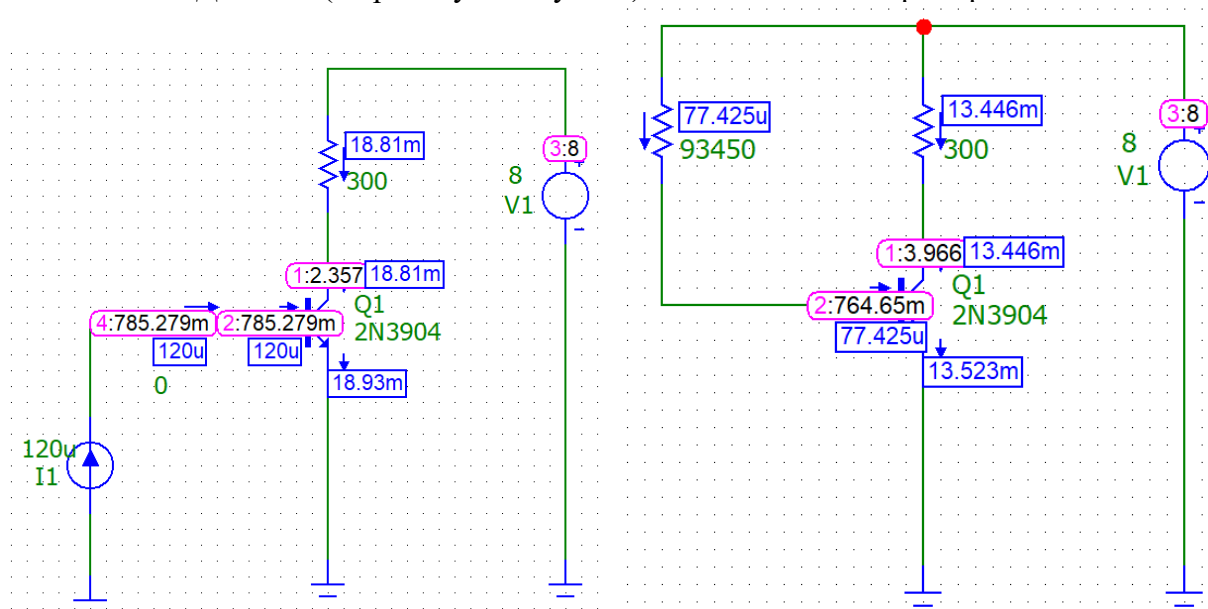
Доработка и проверка схемы. Этап 2

$$R_6 = \frac{12 - 0.786}{120 * 10^{-6}} = 93450 \Omega$$

Чуть меняем схему выкидывая I1 и меняя R2:



Из-за специально подобранного сопротивления R2 токи\напряжения почти не поменялись. Интересно, что теперь при изменении V1 напряжение коллектора остается почти равным половине V1. До этого (в предыдущем пункте) это было не так. Пример:



Слева этап 1, справа – этап 2. При одних и тех же 8В слева на коллекторе 2.357В, а справа 3.966В.

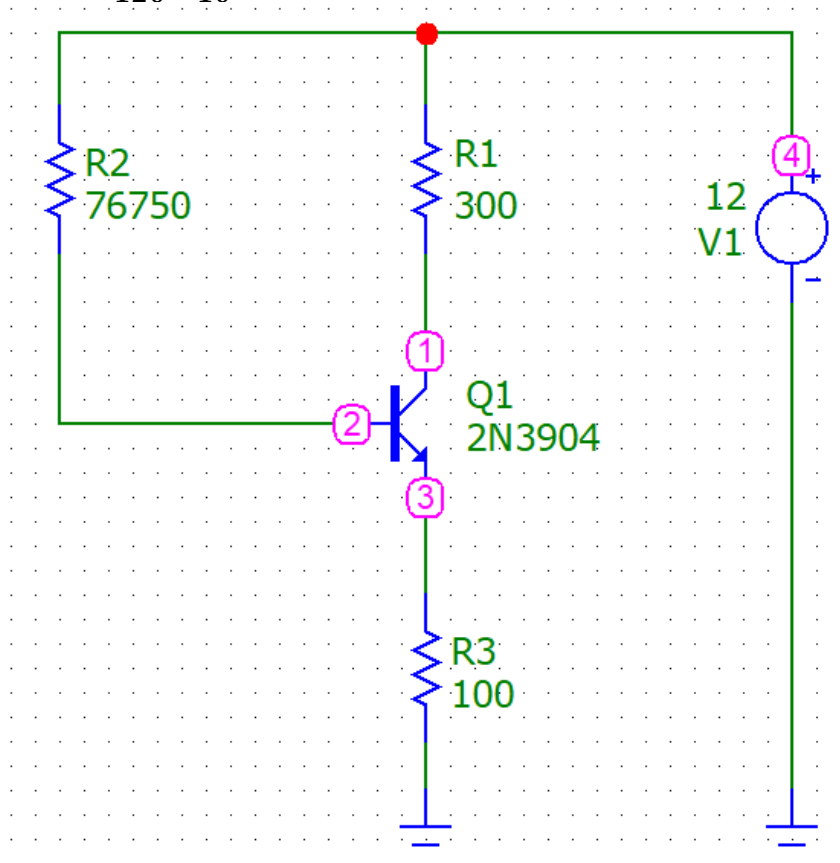


Правительство Российской Федерации
Федеральное государственное автономное образовательное учреждение
высшего образования
"Национальный исследовательский университет
"Высшая школа экономики"

Доработка и проверка схемы. Этап 3

Пусть ток эмиттера 2В, тогда расчеты предыдущего пункта слегка поменяются:

$$R_6 = \frac{12 - 2 - 0.786}{120 * 10^{-6}} = 767500 \text{м}$$





Правительство Российской Федерации
Федеральное государственное автономное образовательное учреждение
высшего образования
"Национальный исследовательский университет
"Высшая школа экономики"

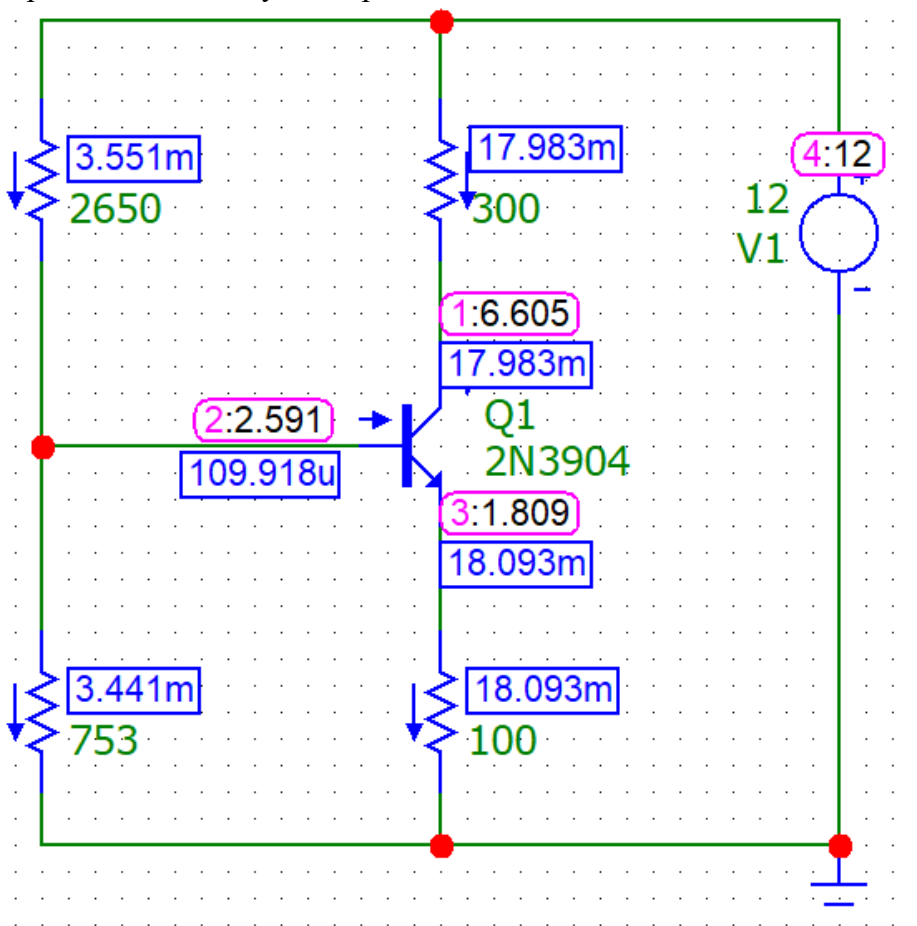
Доработка и проверка схемы. Этап 4

$$I_D = 120.85 * 10^{-6} * 30 = 3.62 * 10^{-3}$$

$$R_{\delta} = \frac{12 - 2.725}{3.62 * 10^{-3} - 120 * 10^{-6}} = 2650 \text{ Ом}$$

$$R_{\delta\delta} = \frac{2.725}{3.62 * 10^{-3}} = 753 \text{ Ом}$$

Переделываем схему в микрокапе:

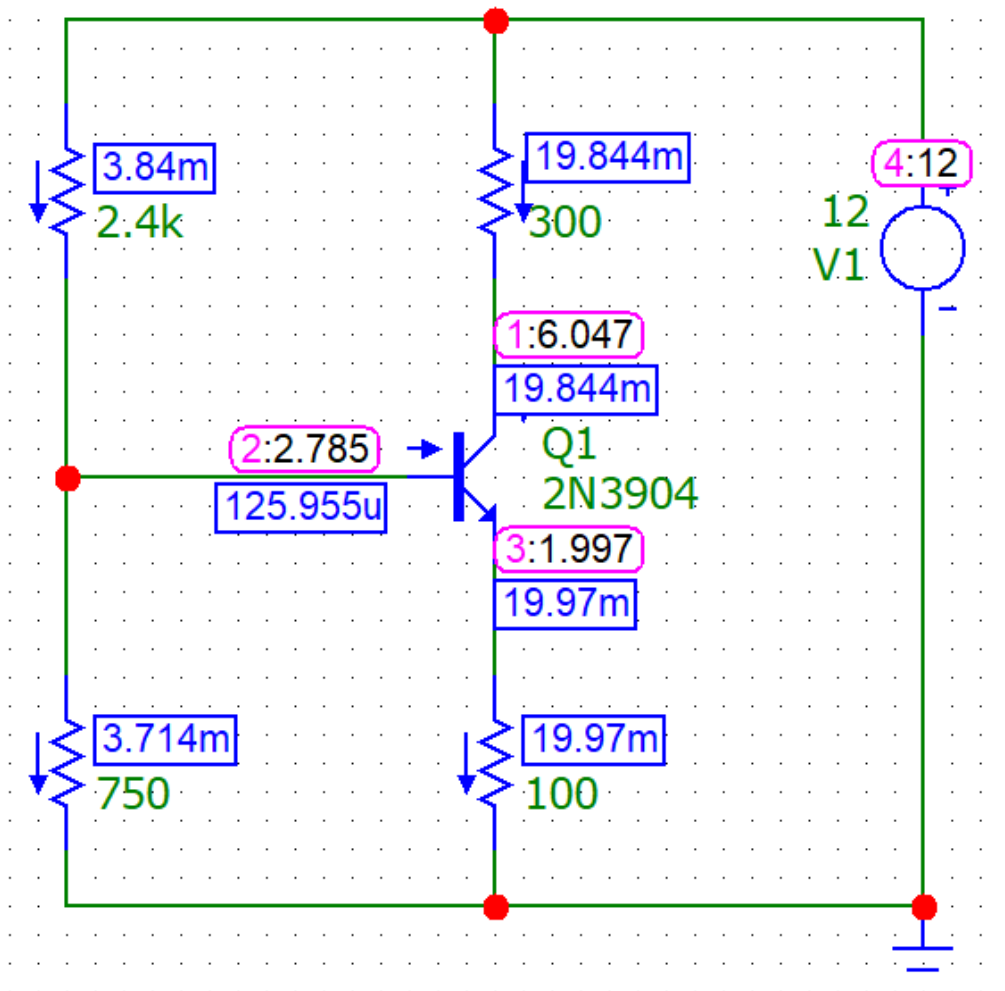




Правительство Российской Федерации
Федеральное государственное автономное образовательное учреждение
высшего образования
"Национальный исследовательский университет
"Высшая школа экономики"

Подбор реальных ЭРИ

Просто меняем пару резисторов (2650 заменил на 2.4к, а не на 2.7к т.к. в этом случае напряжение на коллекторе ближе к половине от 12В):

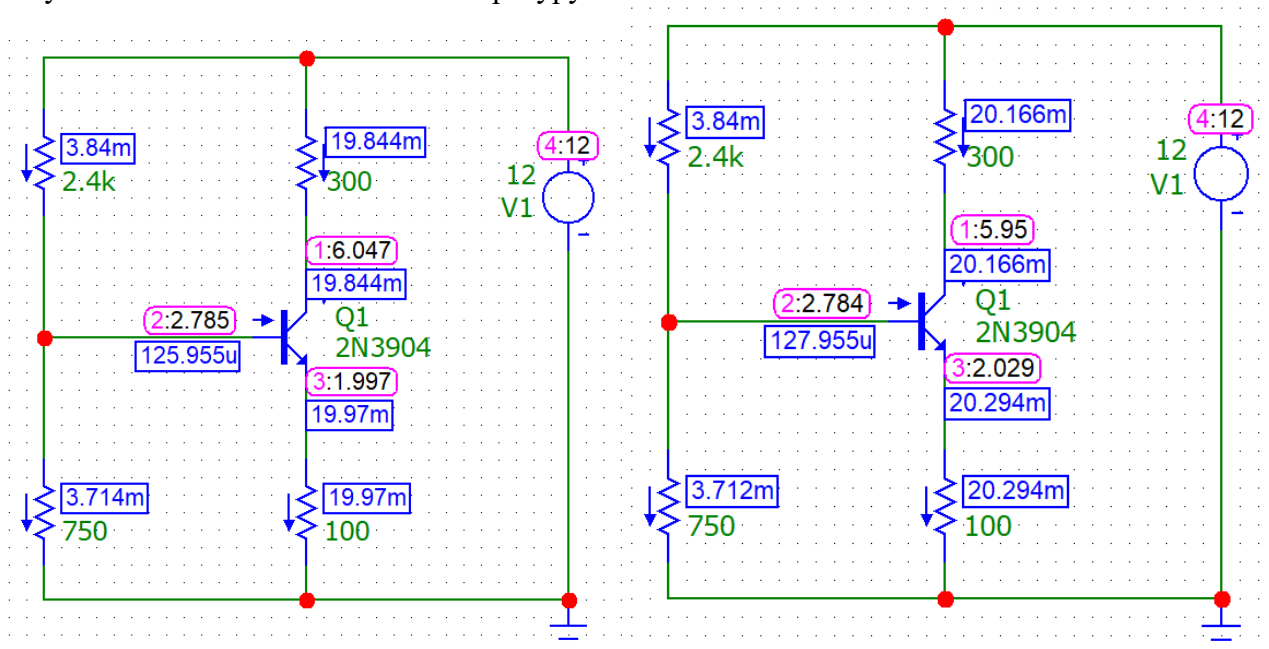




Правительство Российской Федерации
Федеральное государственное автономное образовательное учреждение
высшего образования
"Национальный исследовательский университет
"Высшая школа экономики"

Влияние температуры:

В dynamic DC – limits меняем температуру с 27 на 50:



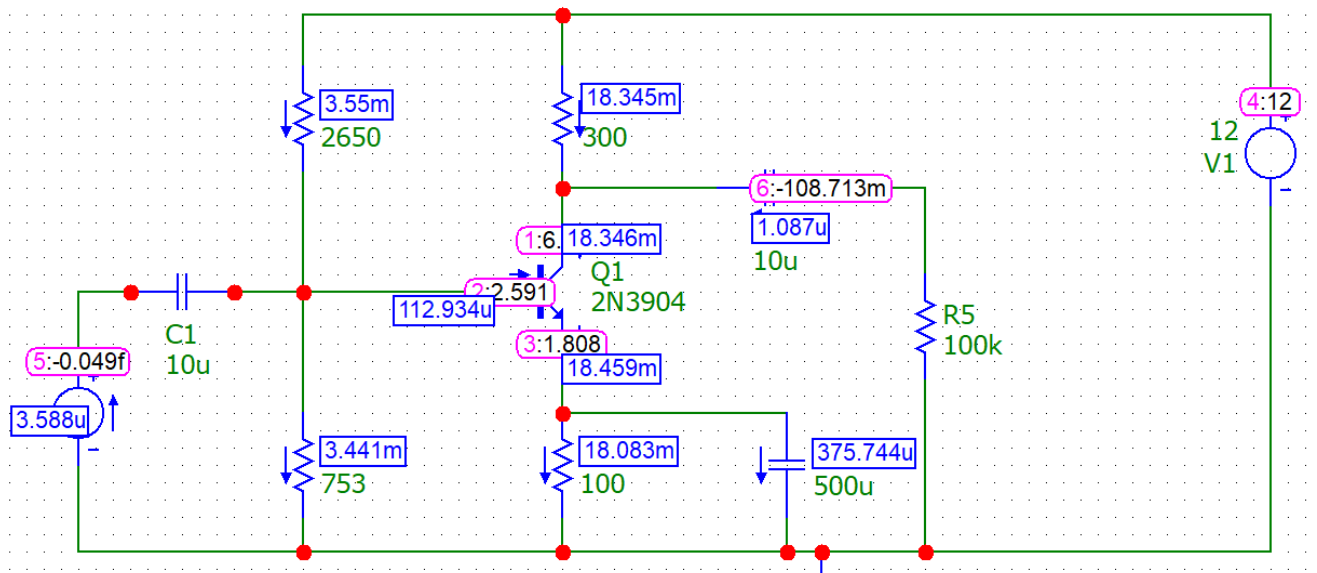
Слева 27°, справа 50°. Видно, например изменение напряжения коллектора на 0.1В.
Напряжение база-эмиттер изменилось на 0.03В.



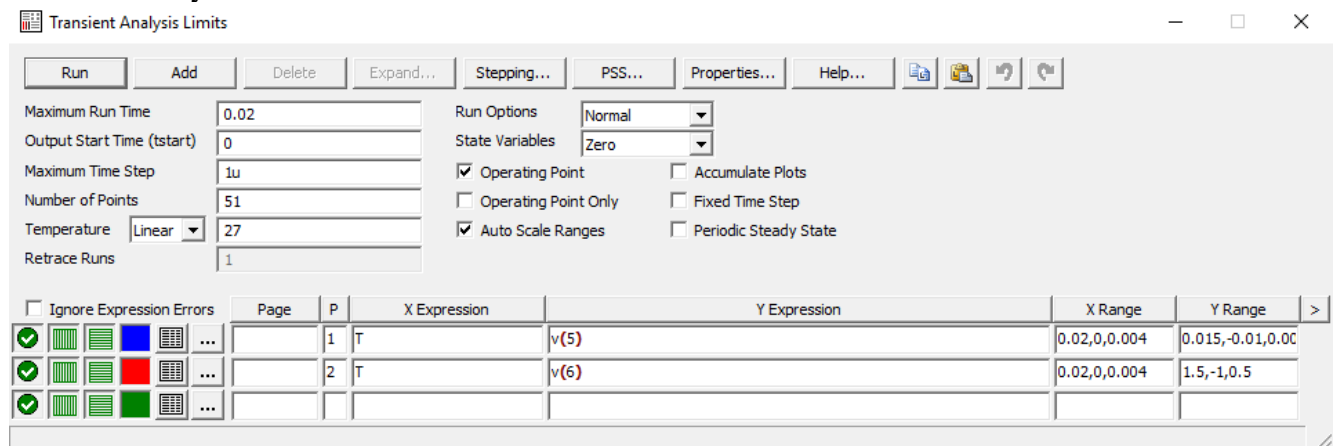
Правительство Российской Федерации
Федеральное государственное автономное образовательное учреждение
высшего образования
"Национальный исследовательский университет
"Высшая школа экономики"

Добавление конденсаторов и сопротивления нагрузки:

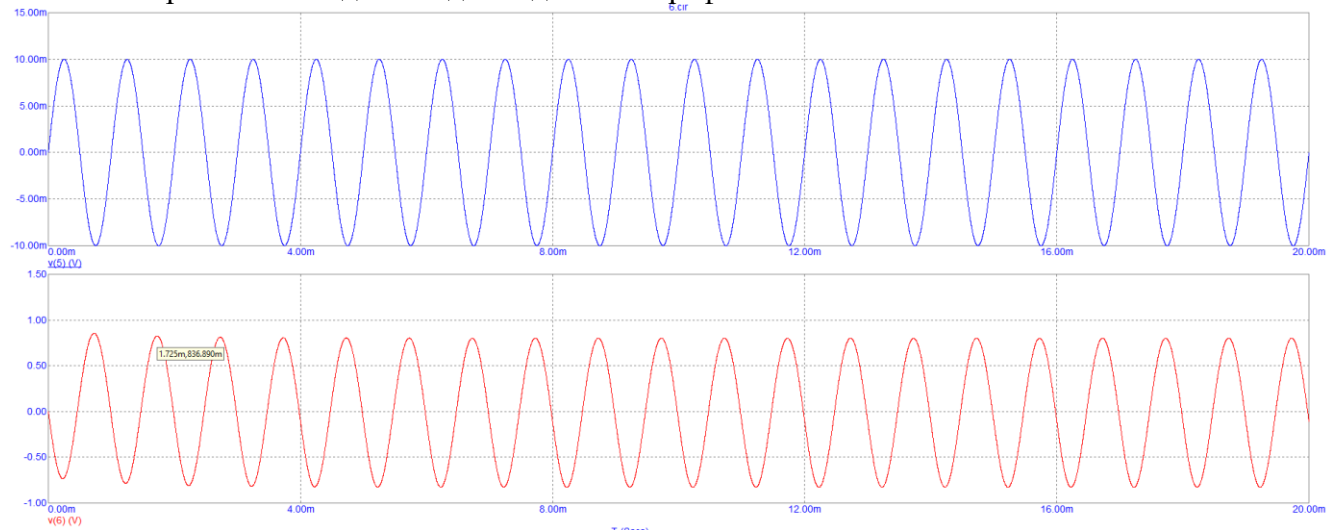
Источник напряжения V2 – sin, VA 10m, F0 1k. Остальное по дефолту.



Transient analysis:



1 и 2 во второй колонке делают два отдельных графика.



Усиление по напряжению примерно в 80 раз (836/10).



Правительство Российской Федерации
Федеральное государственное автономное образовательное учреждение
высшего образования
"Национальный исследовательский университет
"Высшая школа экономики"

Приложение:

Исходники маткада и микрокапа:

<https://github.com/Wicirelllis/miem-docs/tree/master/ИТСС/5-6> Компьютерный практикум