

Московский государственный технический университет им. Н.Э. Баумана

Факультет «Радиоэлектроника и лазерная техника»

Кафедра «Радиоэлектронные системы и устройства(РЛ1)»

---

Домашнее задание №2

по дисциплине

«Электроника»

Выполнили студенты группы РЛ6-41 и РЛ-49

Филимонов С.В.

Мухин Г. А.

Болотина Е. Е.

Проверил доцент

Крайний В.И.

Оценка в баллах \_\_\_\_\_

Москва, 2022

## ОГЛАВЛЕНИЕ

ОГЛАВЛЕНИЕ.....	2
СЕМИНАР 1.....	3
СЕМИНАР 2.....	12
СЕМИНАР 3.....	18
ВЫВОД.....	25
СПИСОК ИСПОЛЬЗОВАННОЙ ЛИТЕРАТУРЫ.....	25

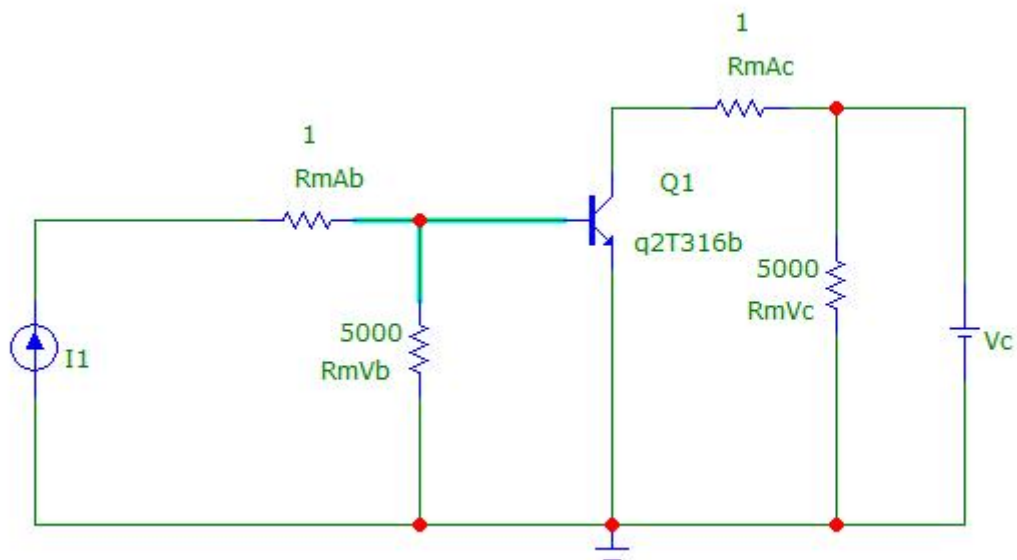
## СЕМИНАР 1

Исходные параметры модели транзистора **2Т316Б**:

Is=3.49f Xti=3 Eg=1.11 Vaf=102 Bf=74.97 Ne=1.483 Ise=44.72f Ikf=.1322  
 Xtb=1.5 Var=55 Br=.2866 Nc=2 Isc=447f Ikr=.254 Rb=66.7 Rc=7.33 Cjc=3.934p  
 Vjc=.65 Mjc=.33 Fc=.5 Cje=1.16p Vje=.69 Mje=.33 Tr=65.92n Tf=94.42p Itf=.15  
 Vtf=15 Xtf=2

**Схема для исследования выходных характеристик биполярного транзистора:**

**Схема для снятия выходных характеристик:**



**Окно задания параметров:**

DC Analysis Limits

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

Sweep

Variable	Method	Name	Range
Variable 1	Auto	VC	15,0,1
Variable 2	Linear	I1	5mA,0.3mA,1.2mA

Temperature

Method	Range
Linear	27

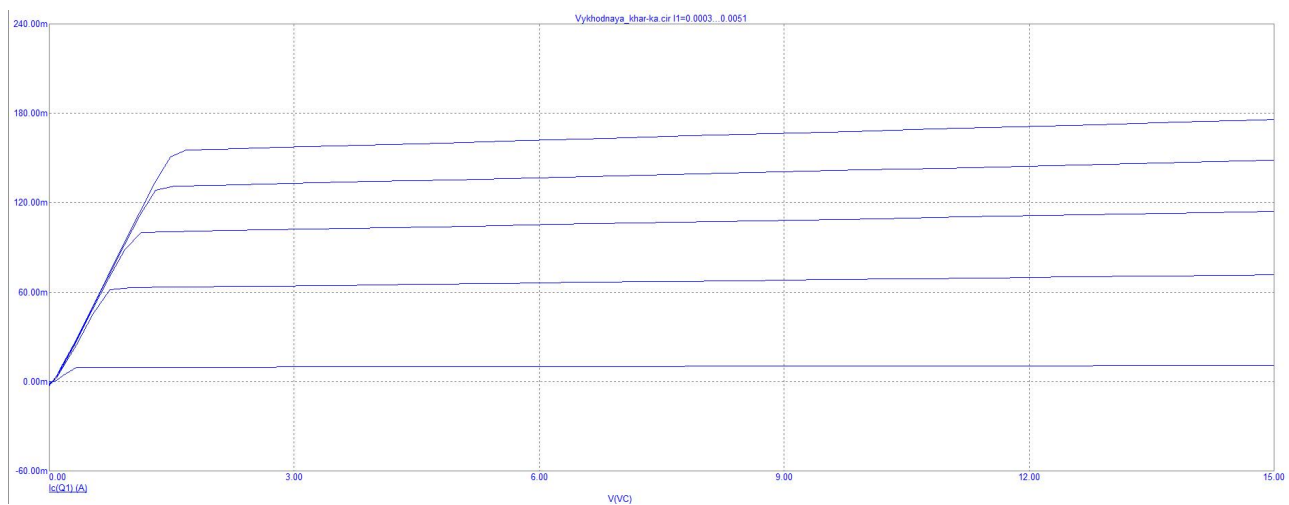
Number of Points: 20

Maximum Change %: 5

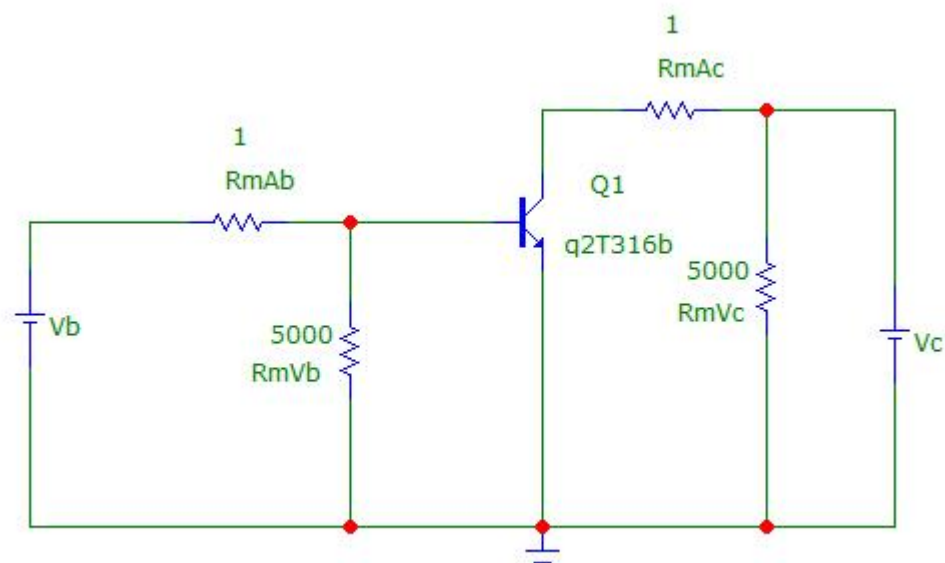
Run Options: Normal ☒ Auto Scale Ranges ☐ Accumulate Plots

Page	P	X Expression	Y Expression	X Range	Y Range
1	1	DCINPUT 1	Ic(Q1)	15,0,3	0.24,-0.06,0.06

Определяем из справочника биполярных транзисторов максимальное значение коллекторного тока **50 мА**.



**Схема для исследования входных характеристик биполярного транзистора:**



DC Analysis Limits

Run

Add

Delete

Expand...

Stepping...

Properties...

Help...

Sweep

	Method	Name	Range
Variable 1	Auto	VB	1,0,0.1
Variable 2	Linear	VC	5,0,5

Temperature

Method	Range
Linear	27

Number of Points

Maximum Change %

10

5

Run Options

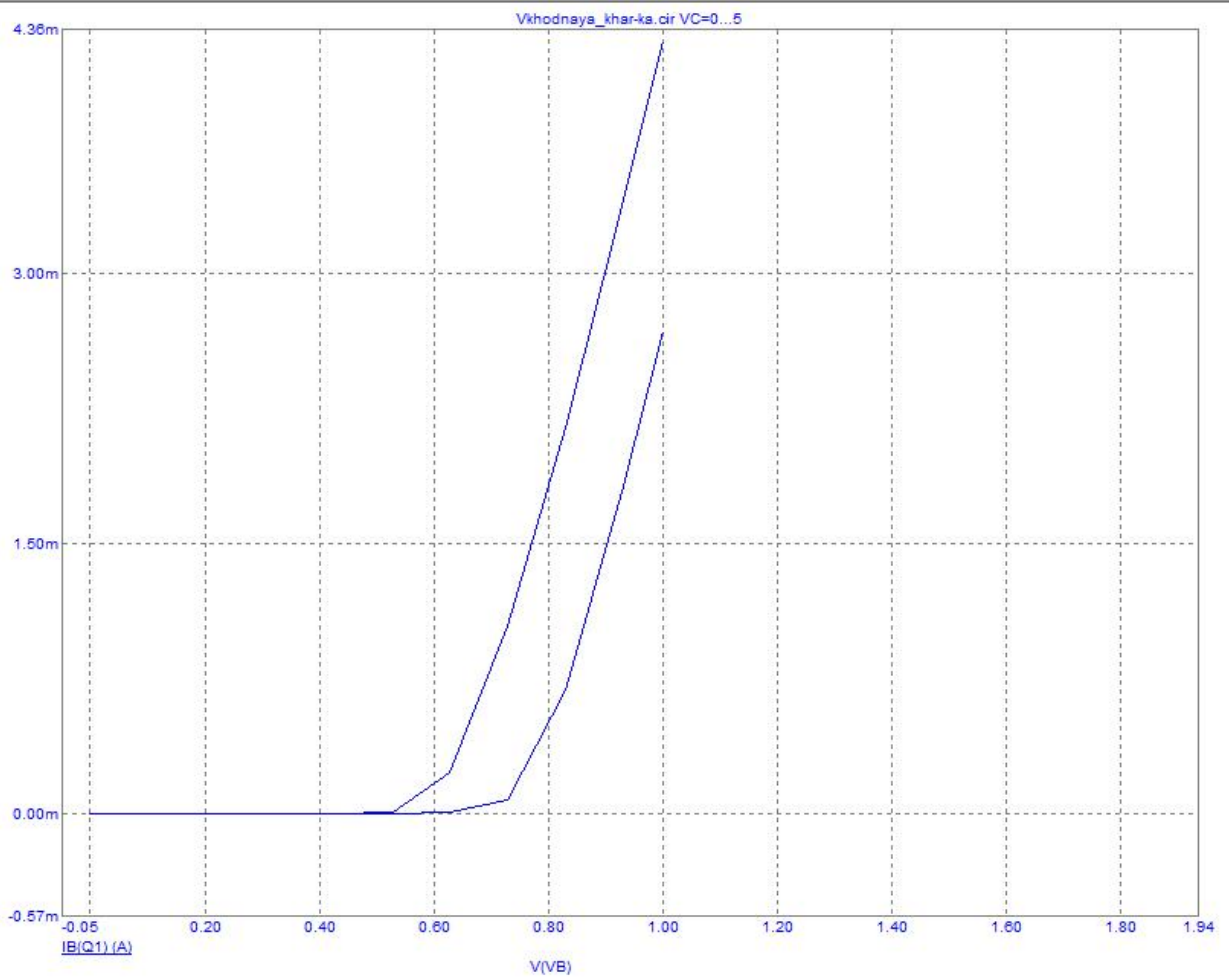
Normal

☒ Auto Scale Ranges

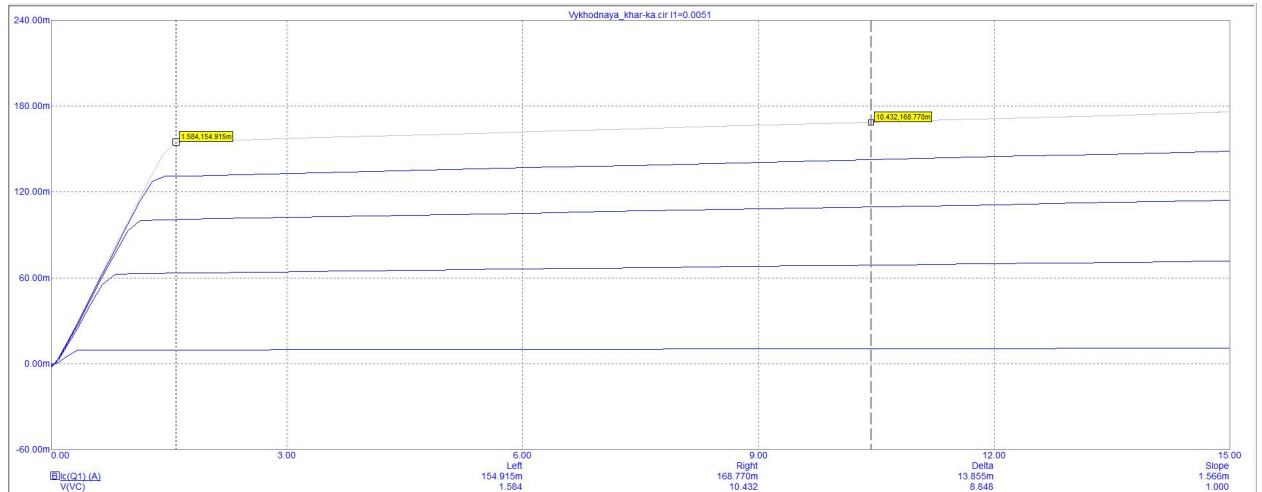
☐ Accumulate Plots

☐ Ignore Expression Errors

Page	P	X Expression	Y Expression	X Range	Y Range
1	1	DCINPUT1	IB(Q1)	1,0,0.2	0.006,-0.0015,0.0015



## Определение тока коллектора и напряжения база-эмиттер в режиме



$V_{ce}, B$	0.33	0.746	0.927	1.305	1.485
$I_{c.нас}, A$	0.009316	0.061	0.088	0.128	0.151
$I_B, A$	0.0003	0.0015	0.0027	0.0039	0.005
$V_{be}, B$	0.778	0.905	1	1.09	1.174

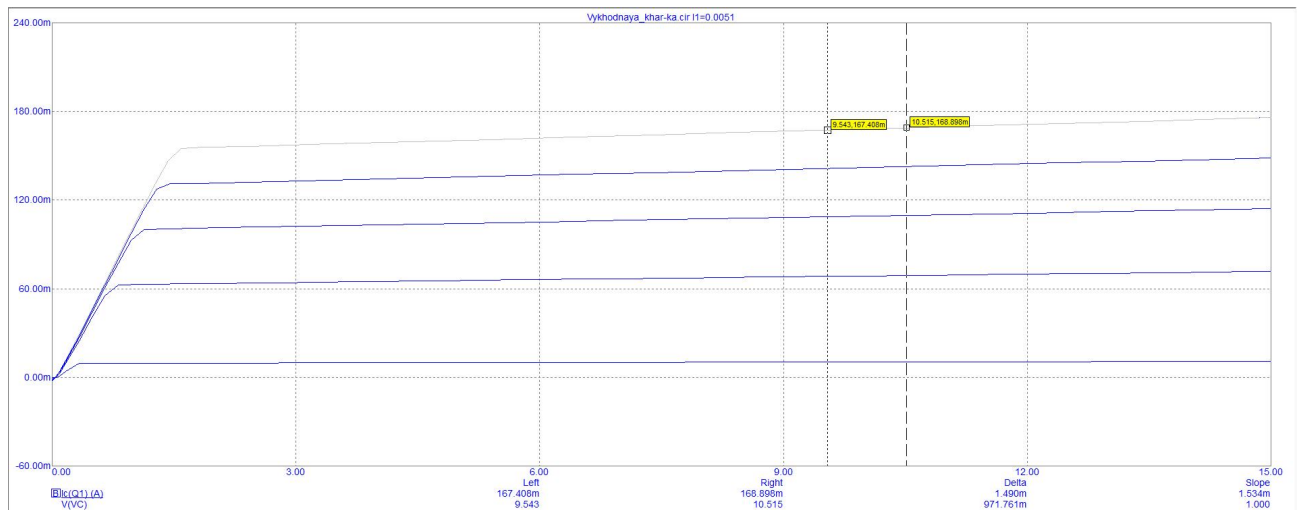
$V_{ce}$  – напряжение коллектор-эмиттер;

$I_{c.нас}$  – ток насыщения коллектора;

$I_B$  – ток базы;

$V_{be}$  – напряжение база-эмиттер.

## Расчет выходной проводимости

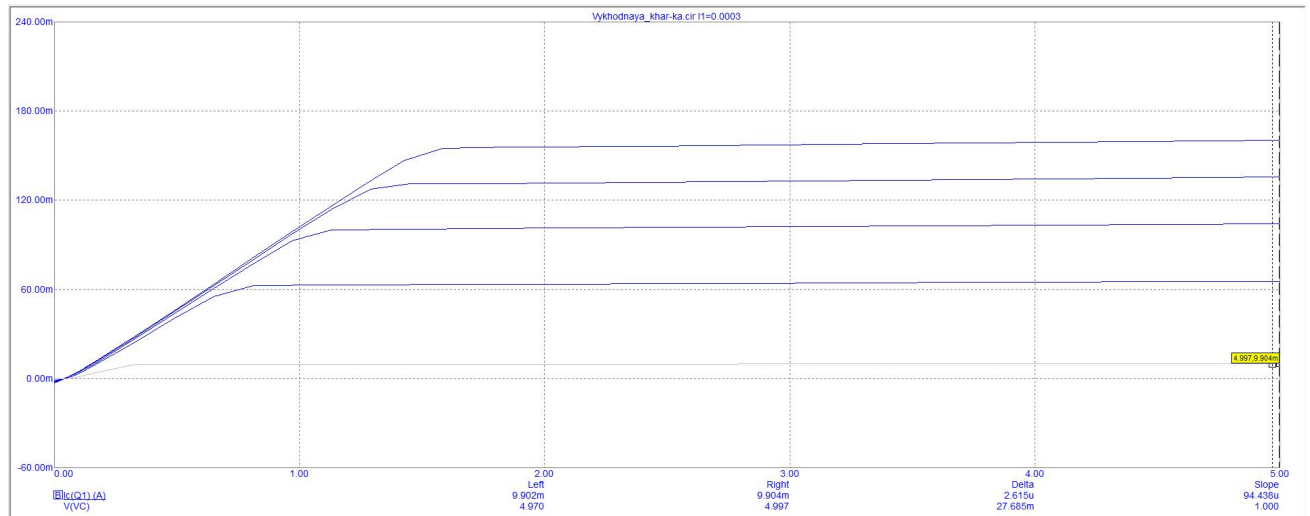


$V_{ce}, B$	9.512	10.515
$I_c, A$	0.167408	0.168896

$$h_{0e} = \Delta I_c / \Delta V_{ce} = (0.168896 - 0.167408) / (10.515 - 9.512) = 0.0015 \text{ См.}$$

## Расчет статического коэффициента передачи по току

(при  $V_{ce}=5\text{ В}$ )

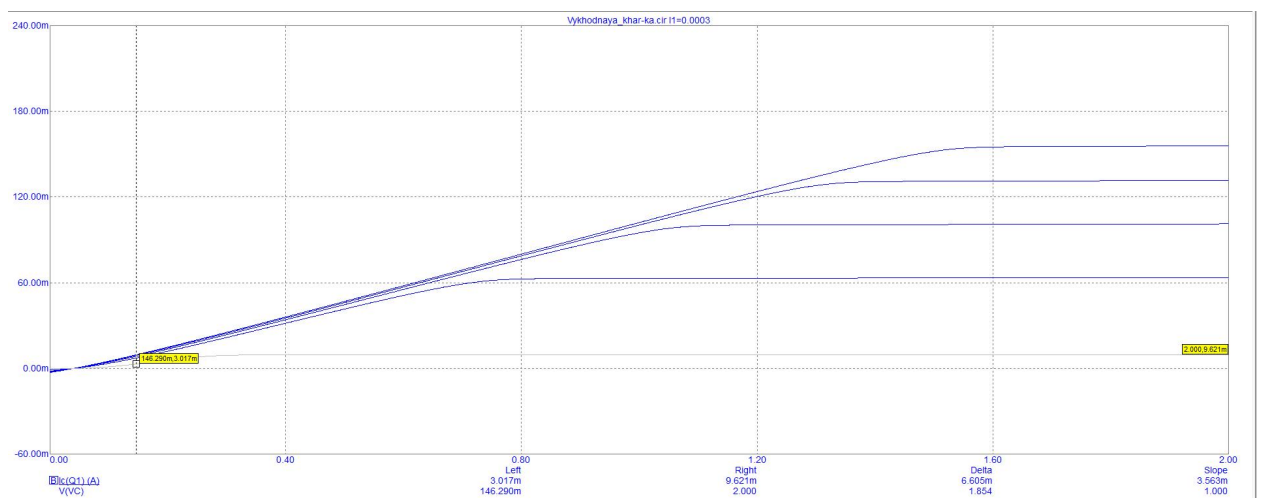


$I_c, \text{ A}$	0.0099	0.065	0.104	0.135	0.164
$I_b, \text{ A}$	0.0003	0.0015	0.0027	0.0039	0.005
BF ( $I_c / I_b$ )	33	43	38	35	33

## Определение напряжения насыщения $V_{ce}$

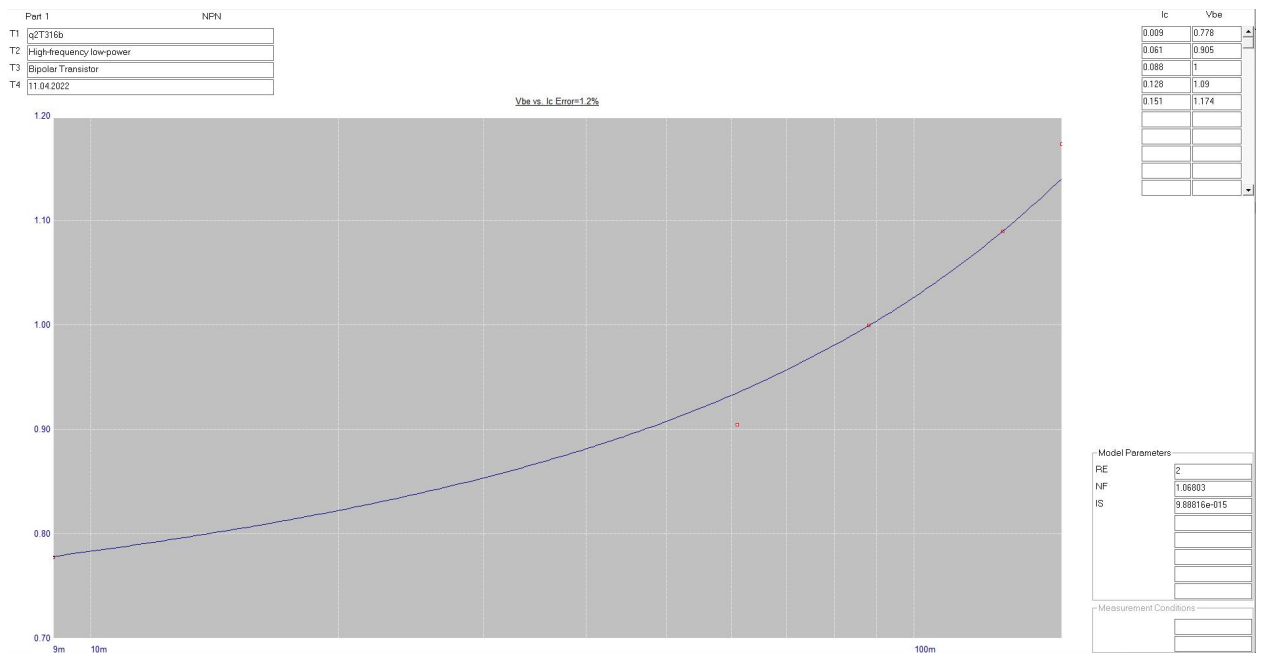
(при заданном  $I_c/I_b=10$ )

$I_{c, \text{нас}}, \text{ A}$	0.003	0.015	0.027	0.039	0.05
$I_b, \text{ A}$	0.0003	0.0015	0.0027	0.0039	0.005
$V_{ce}, \text{ B}$	0.146	0.232	0.333	0.435	0.528

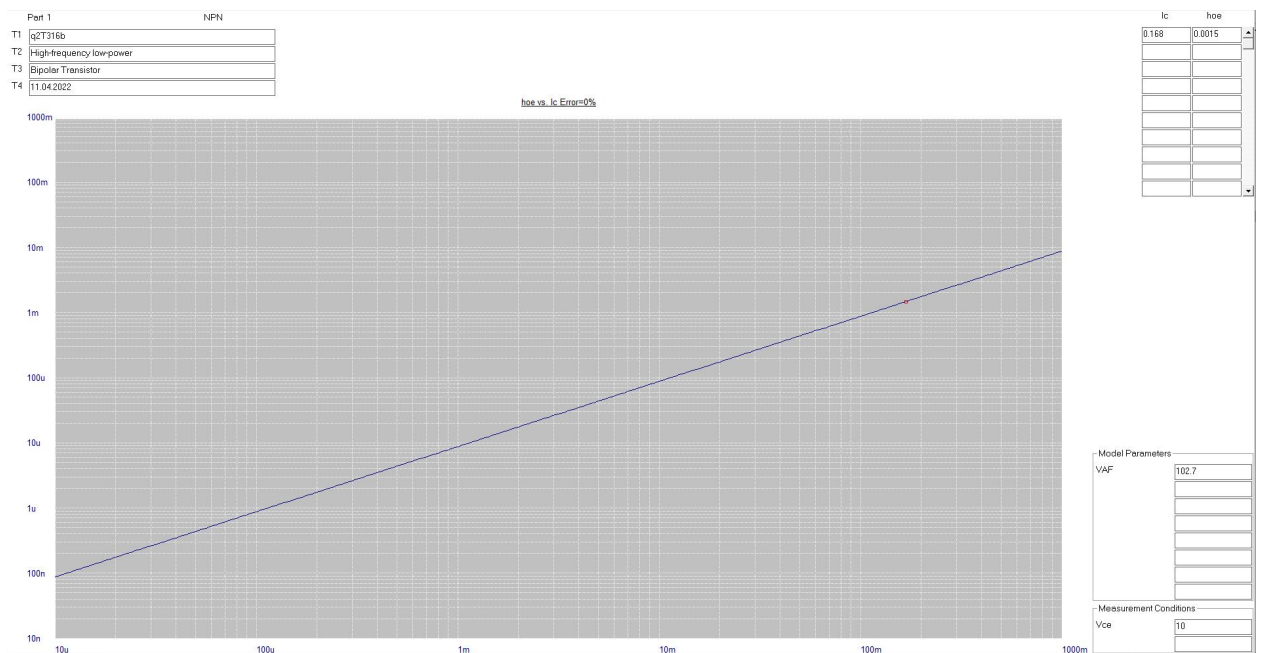


# Расчет параметров модели биполярного транзистора в программе Model

## Окно расчетов 1

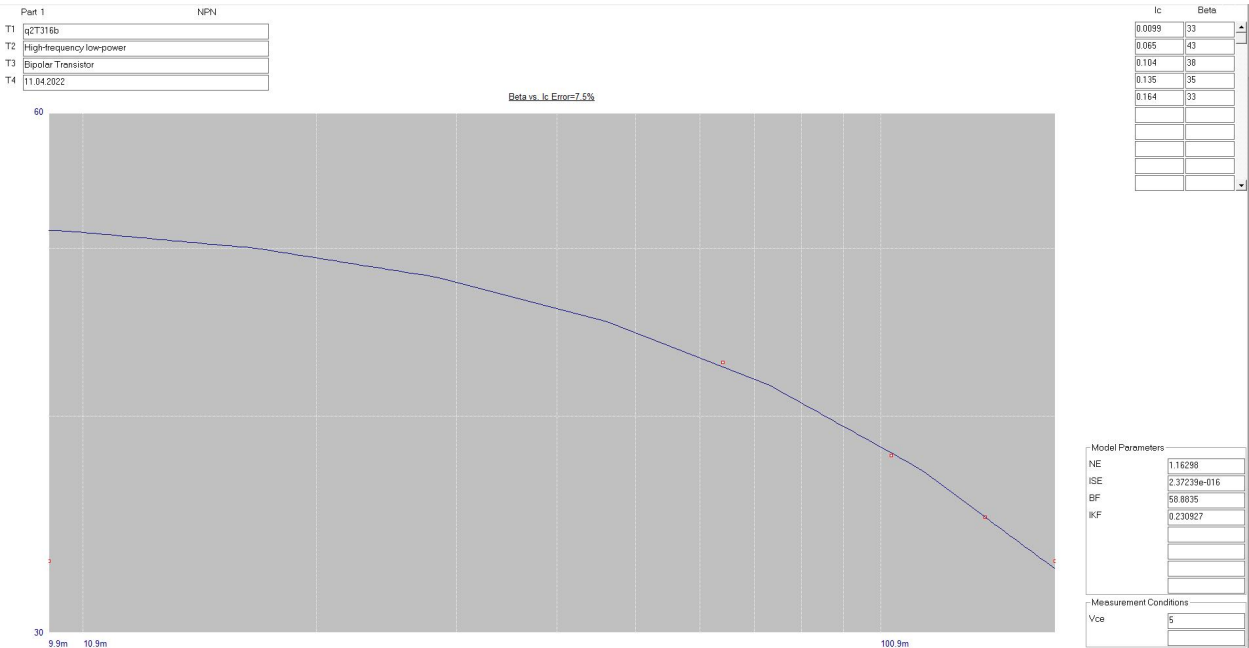


## Окно расчетов 2

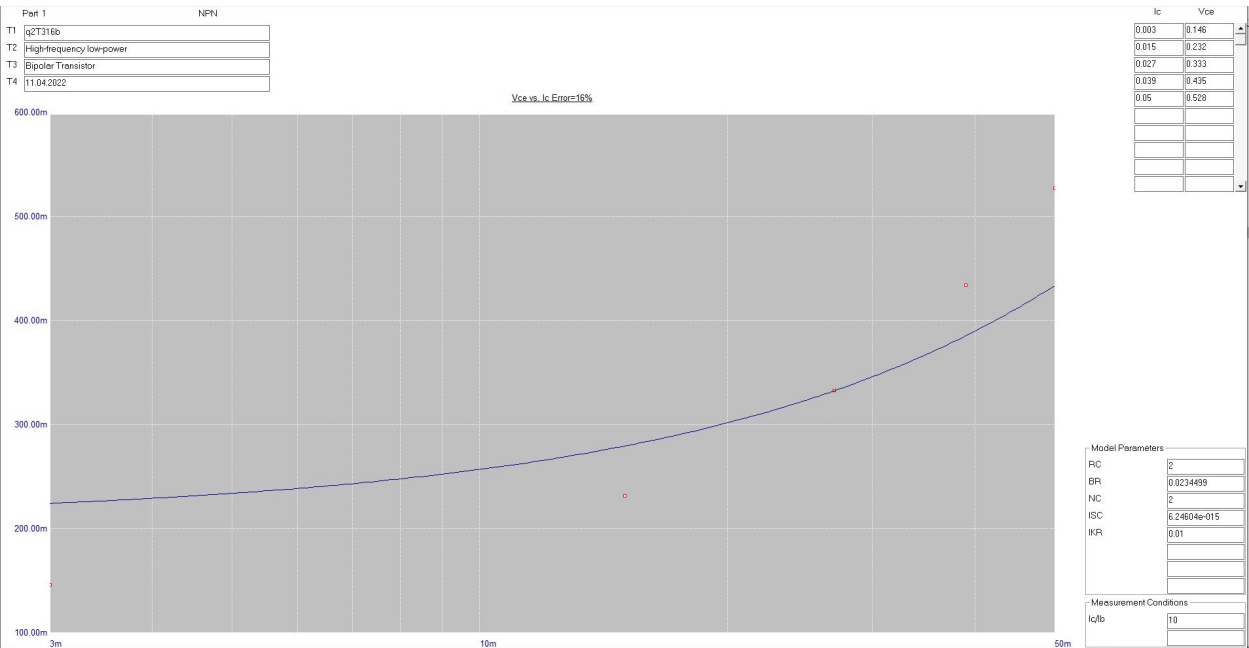




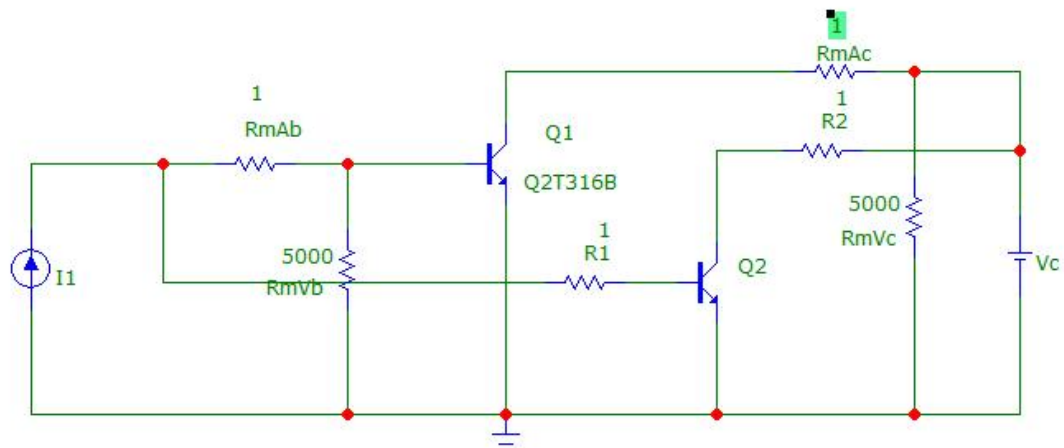
Окно расчетов 3



Окно расчетов 4



## Схема для исследования выходных характеристик биполярного транзистора (совмещение характеристик)



R1,R2,R3,R4 – резисторы для уменьшения влияния транзисторов друг на друга;

R5 – внутреннее сопротивление источника.

The screenshot shows the circuit diagram from the previous image on the left. On the right, the 'NPN:NPN Transistor' model configuration window is open. The 'Name' field is set to 'MODEL'. The 'Value' field is set to 'Q2T316BAVG'. The 'Display' section has 'Current', 'Power', and 'Condition' checked. The 'PART=Q2' and 'VALUE=Q2T316BAVG' are listed. The 'Model' list on the right shows various transistor models, with 'Q2T316BAVG' selected. The 'Enabled' checkbox is checked, and the 'Columns' are set to 3. The 'Help Bar' is visible. The 'Show Data on Exit' section is expanded, showing a table of parameters and their values.

Parameter	Value	Parameter	Value	Parameter	Value
LEVEL	1	AF	1	BF	58.8835
BR	23.4499M	CJC	5P	CJE	2P
CJS	0	EG	1.11	FC	.5
GAMMA	10p	IKF	230.927M	IKR	10M
IRB	0	IS	9.88816F	ISC	447F
ISE	2.372389E-016	ISS	0	ITF	10M
KF	0	MJC	500M	MJE	500M
MJS	0	NC	2	NE	1.16298
NF	1	NK	500m	NR	1
NS	1	PTF	0	QCO	0
QUASIMOD	0	RB	66.7	RBM	0
RC	2	RCO	0	RE	0
T_ABS	undefined	T_MEASURED	undefined	T_REL_GLOBAL	undefined
T_REL_LOCAL	undefined	TF	1N	TR	10N
TRB1	0	TRB2	0	TRC1	0
TRC2	0	TRE1	0	TRE2	0
TRM1	0	TRM2	0	VAF	102.7
VAR	55	VG	1.206	VJC	.65
VJE	.69	VJS	750m	VO	10
VTF	10	XCJC	1	XTB	1.5

## Параметры модели транзистора (Q2T316BVG), полученные в программе Model:

BIPOLAR TRANSISTOR.LIB – Блокнот

Файл Правка Формат Вид Справка

\*\*\*\*\*

\* BIPOLAR TRANSISTOR.LIB

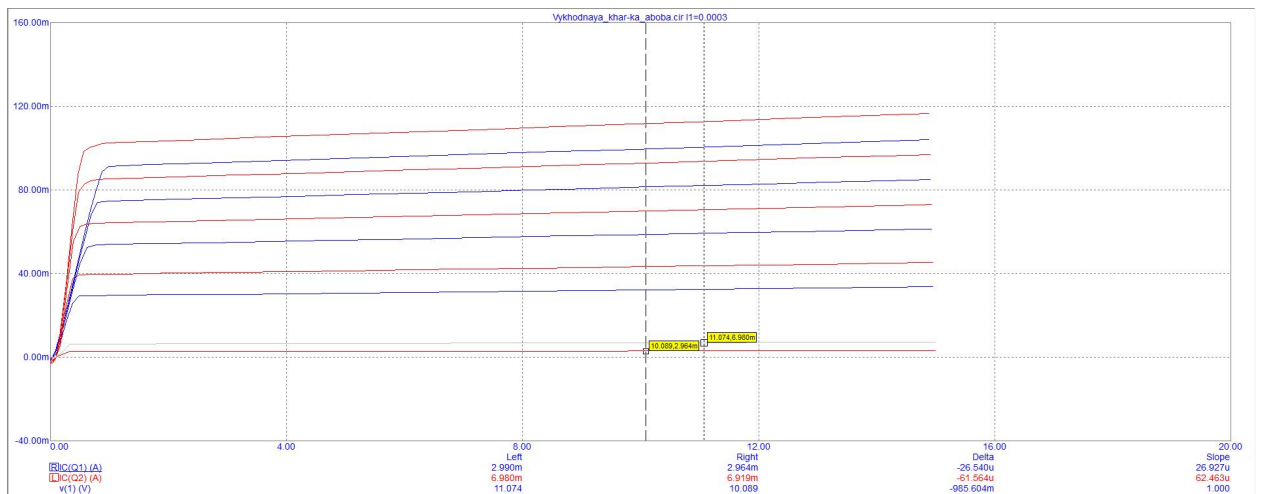
\*\*\*\*\*

\*\*\* Bipolar Transistor

```
.MODEL q2T316b NPN (IS=9.88816F BF=58.8835 NF=1.06803 VAF=102.7 IKF=230.927M  
+ ISE=2.372389e-016 NE=1.16298 BR=23.4499M IKR=10M ISC=6.24604F NC=2 RE=2 RC=2  
+ CJE=2P MJE=500M CJC=5P MJC=500M TF=1N XTF=500M VTF=10 ITF=10M TR=10N)
```

## Параметры исходного транзистора, заданного по условию (Q2T316B):

```
.model q2T316b NPN(Is=3.49f Xti=3 Eg=1.11 Vaf=102 Bf=74.97 Ne=1.483  
+ Ise=44.72f Ikf=.1322 Xtb=1.5 Var=55 Br=.2866 Nc=2 Isc=447f Ikr=.254  
+ Rb=66.7 Rc=7.33 Cjc=3.934p Vjc=.65 Mjc=.33 Fc=.5 Cje=1.16p Vje=.69  
+ Mje=.33 Tr=65.92n Tf=94.42p Itf=.15 Vtf=15 Xtf=2)
```



$$\sigma = |(I_{c \text{ синий}} - I_{c \text{ красный}})| / I_{c \text{ синий}} \cdot 100\% = |(11.074 - 10.089) / 11.074 \cdot 100\% = 8.89471\%$$

Поскольку погрешность не превышает 10%, то изменять ничего не нужно, и мы получили идеальную модель биполярного транзистора.

## СЕМИНАР 2

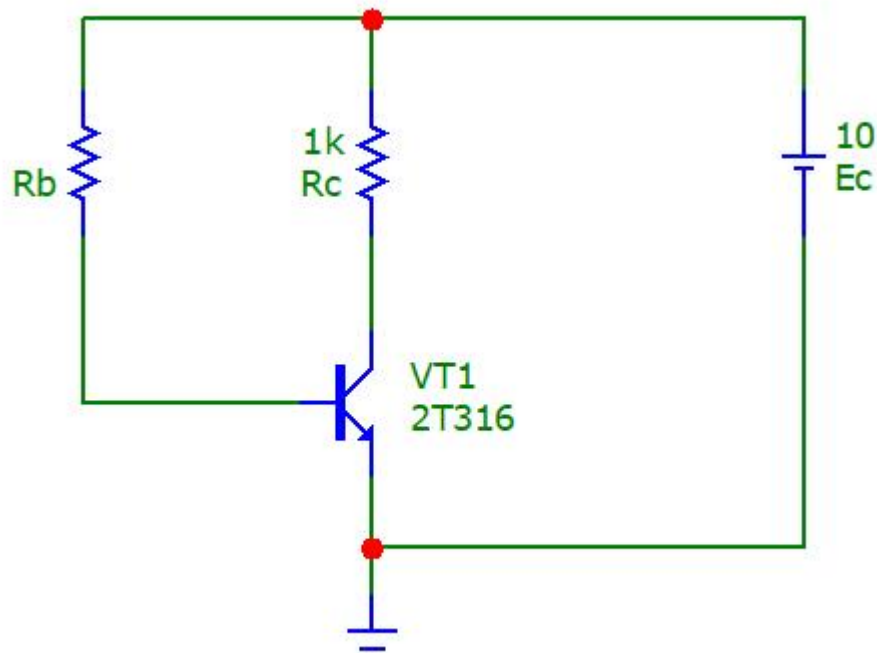
### Расчет и настройка усилительного каскада

Задано:  $R_c = 1 \text{ кОм}$ ,  $E_c = 10 \text{ В}$ .

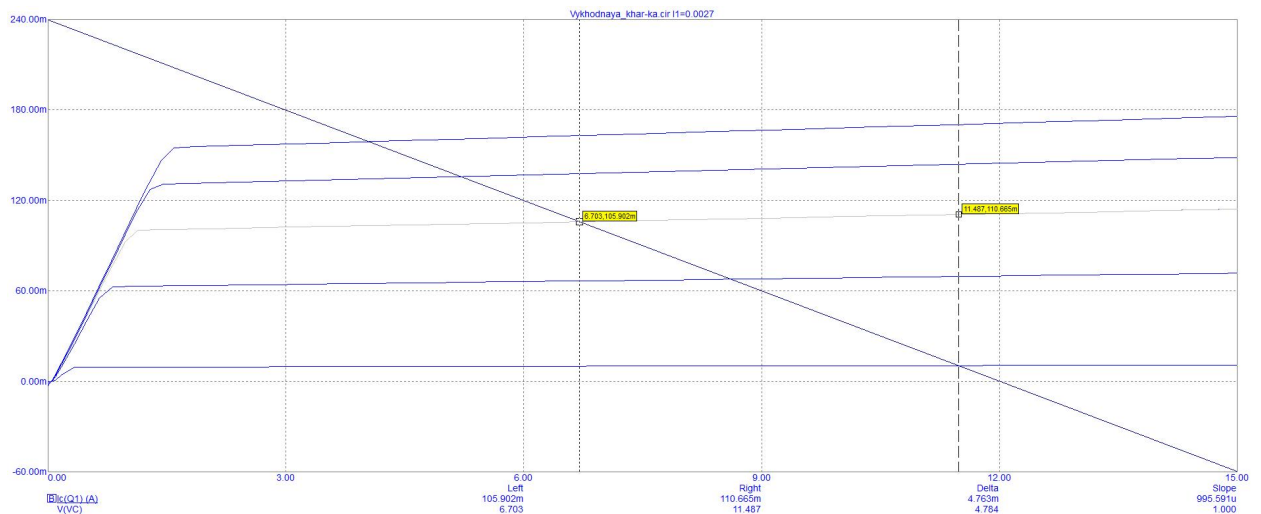
Так как рабочая точка должна лежать в середине нагрузочной прямой, то  $U_{ce} = 5 \text{ В}$ .

Используя закон Кирхгофа, рассчитаем  $I_c = (E_c - U_{ce})/R_c = 5 \text{ мА}$ .

Схема для настройки имеет вид:



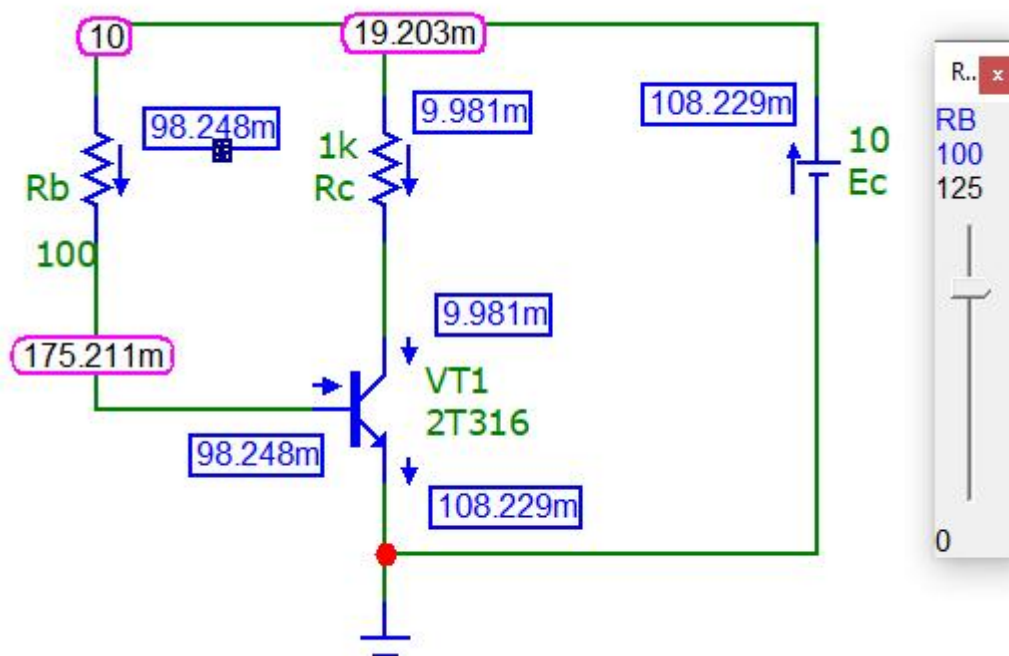
На семействе выходных характеристик построим нагрузочную прямую.



Видно, что рабочая точка имеет следующие параметры:

$U_{ce} = 6.703$  В,  $I_c = 105.9$  мА. При этом  $I_{cmin} = 11.8$  мА и  $I_{cmax} = 161.8$  мА

Используя динамический анализ по постоянному току (Dynamic DC) на основе полученных данных при помощи функции Slider определяем значение сопротивления резистора  $R_b$ .

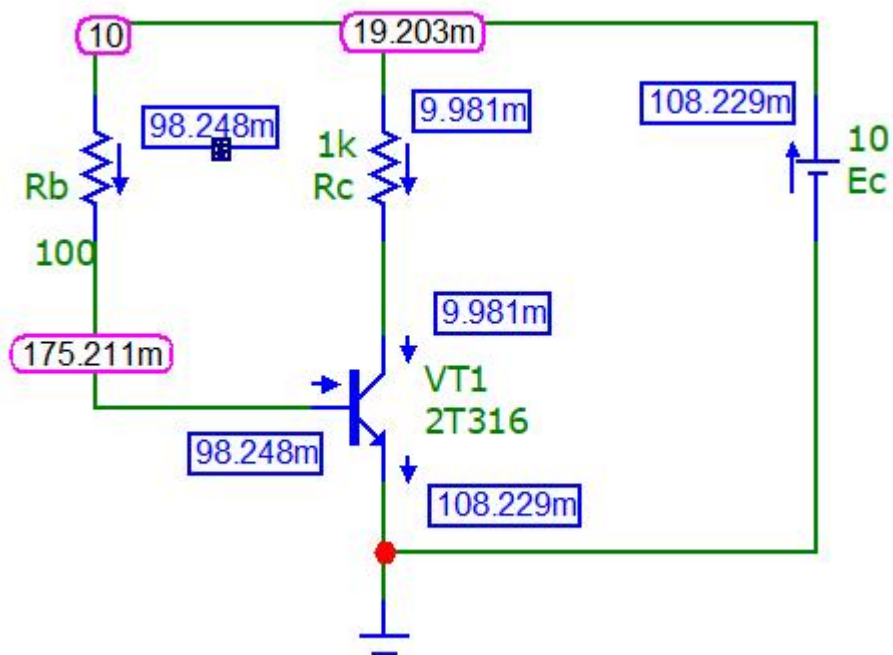


Получаем  $R_b \approx 100$  Ом.

Выбираем резистор в соответствии с сеткой E24 с номинальным значением сопротивления  $R_b = 100$  Ом.

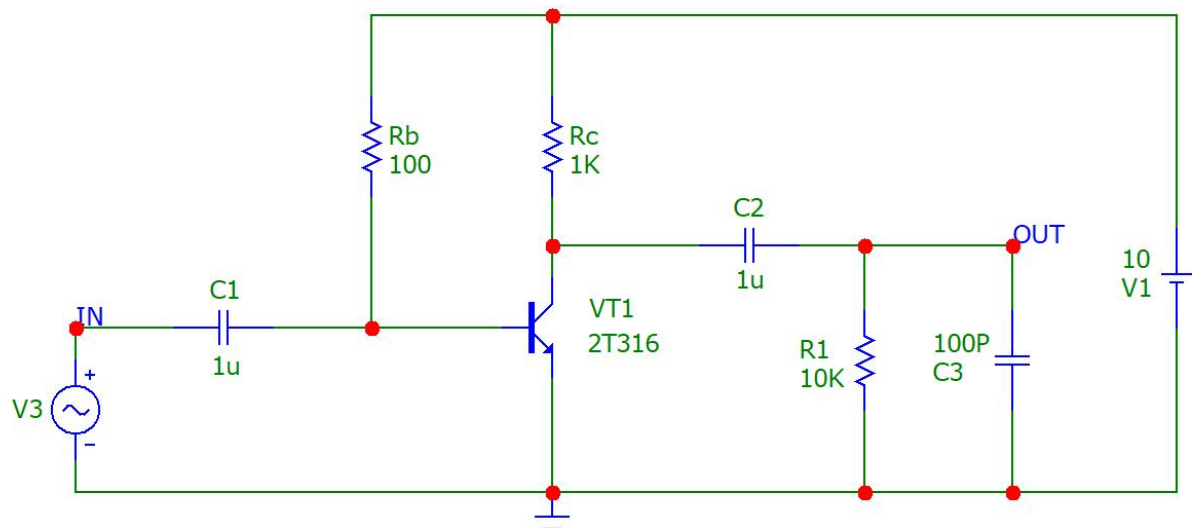
E24	Номинальное сопротивление							
1,0	0,01 Ом	0,1 Ом	1 Ом	10 Ом	100 Ом	1 кОм	10 кОм	100 кОм
1,1	0,011 Ом	0,11 Ом	1,1 Ом	11 Ом	110 Ом	1,1 кОм	11 кОм	
1,2	0,012 Ом	0,12 Ом	1,2 Ом	12 Ом	120 Ом	1,2 кОм	12 кОм	
1,3	0,013 Ом	0,13 Ом	1,3 Ом	13 Ом	130 Ом	1,3 кОм	13 кОм	
1,5	0,015 Ом	0,15 Ом	1,5 Ом	15 Ом	150 Ом	1,5 кОм	15 кОм	
1,6	0,016 Ом	0,16 Ом	1,6 Ом	16 Ом	160 Ом	1,6 кОм	16 кОм	
1,8	0,018 Ом	0,18 Ом	1,8 Ом	18 Ом	180 Ом	1,8 кОм	18 кОм	
2,0	0,02 Ом	0,2 Ом	2,0 Ом	20 Ом	200 Ом	2,0 кОм	20 кОм	
2,2	0,022 Ом	0,22 Ом	2,2 Ом	22 Ом	220 Ом	2,2 кОм	22 кОм	
2,4	0,024 Ом	0,24 Ом	2,4 Ом	24 Ом	240 Ом	2,4 кОм	24 кОм	
2,7	0,027 Ом	0,27 Ом	2,7 Ом	27 Ом	270 Ом	2,7 кОм	27 кОм	
3,0	0,03 Ом	0,3 Ом	3,0 Ом	30 Ом	300 Ом	3,0 кОм	30 кОм	
3,3	0,033 Ом	0,33 Ом	3,3 Ом	33 Ом	330 Ом	3,3 кОм	33 кОм	
3,6	0,036 Ом	0,36 Ом	3,6 Ом	36 Ом	360 Ом	3,6 кОм	36 кОм	
3,9	0,039 Ом	0,39 Ом	3,9 Ом	39 Ом	390 Ом	3,9 кОм	39 кОм	
4,3	0,043 Ом	0,43 Ом	4,3 Ом	43 Ом	430 Ом	4,3 кОм	43 кОм	
4,7	0,047 Ом	0,47 Ом	4,7 Ом	47 Ом	470 Ом	4,7 кОм	47 кОм	
5,1	0,051 Ом	0,51 Ом	5,1 Ом	51 Ом	510 Ом	5,1 кОм	51 кОм	
5,6	0,056 Ом	0,56 Ом	5,6 Ом	56 Ом	560 Ом	5,6 кОм	56 кОм	
6,2	0,062 Ом	0,62 Ом	6,2 Ом	62 Ом	620 Ом	6,2 кОм	62 кОм	
6,8	0,068 Ом	0,68 Ом	6,8 Ом	68 Ом	680 Ом	6,8 кОм	68 кОм	
7,5	0,075 Ом	0,75 Ом	7,5 Ом	75 Ом	750 Ом	7,5 кОм	75 кОм	
8,2	0,082 Ом	0,82 Ом	8,2 Ом	82 Ом	820 Ом	8,2 кОм	82 кОм	
9,1	0,091 Ом	0,91 Ом	9,1 Ом	91 Ом	910 Ом	9,1 кОм	91 кОм	

При этом получаем

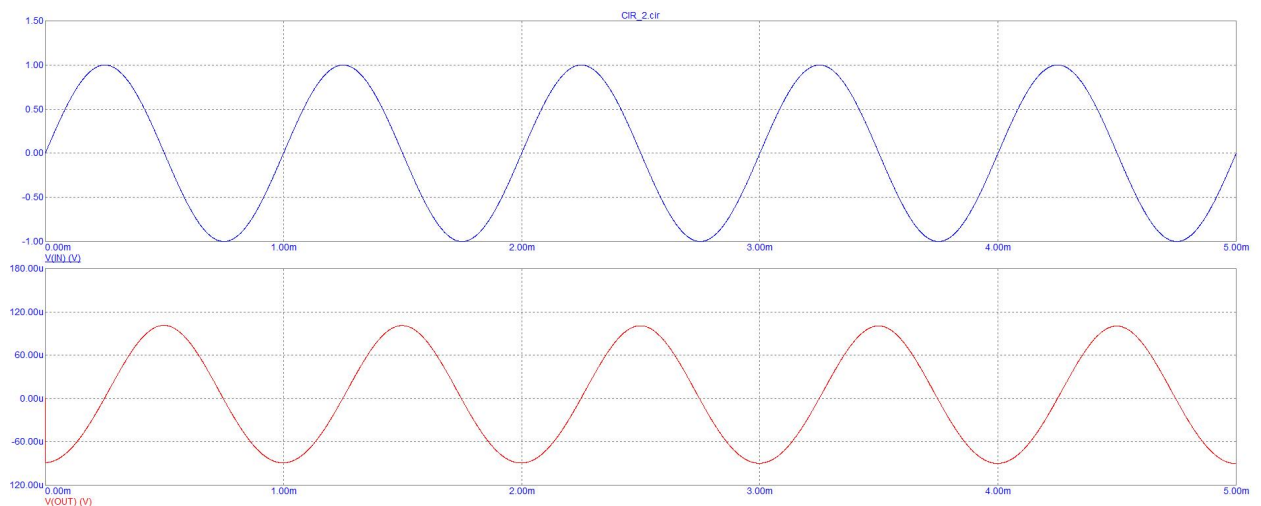
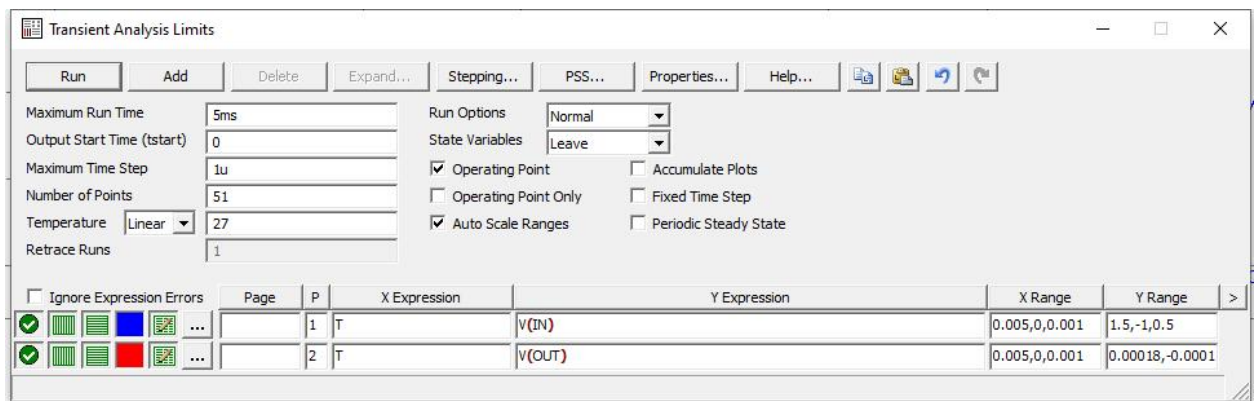


Дополним каскад, рассчитанный по постоянному току, виртуальным генератором сигналов (Voltage Source).

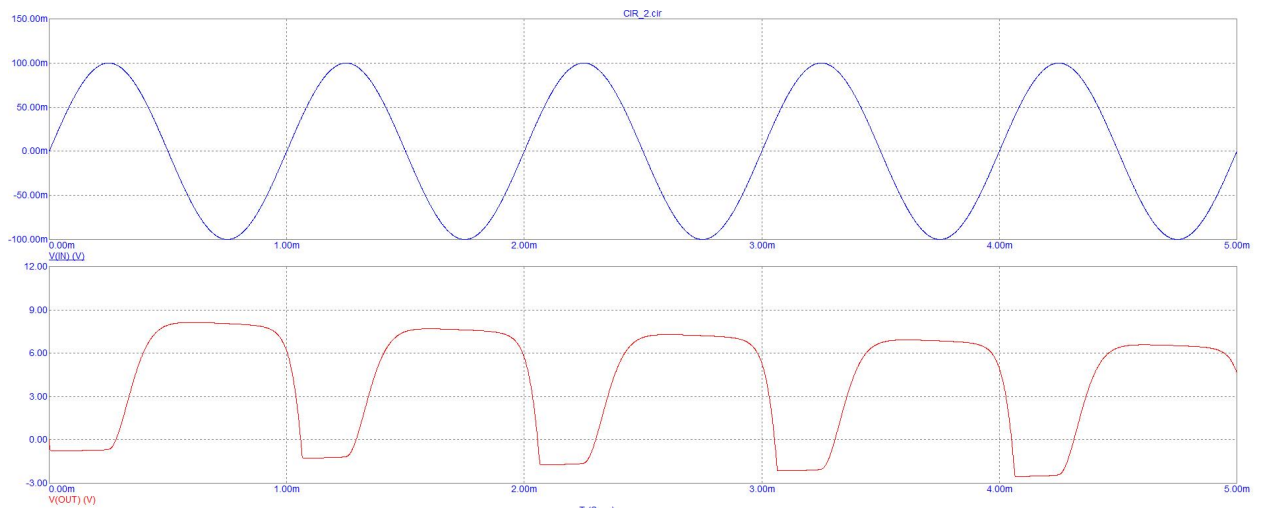




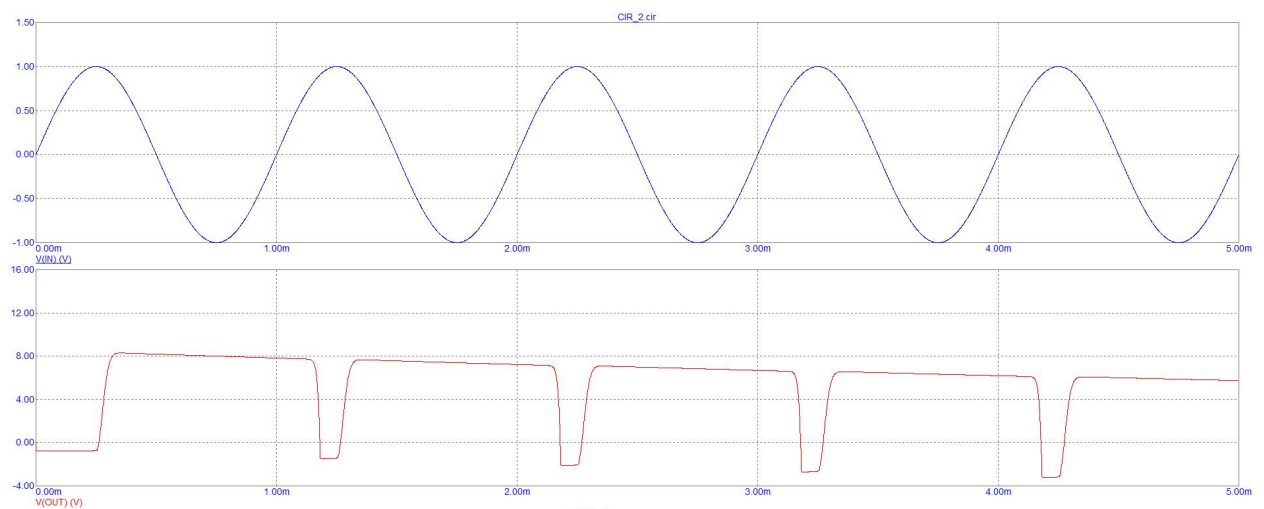
Проведем анализ работы схемы во временной области при различных амплитудах входного сигнала, задав частоту генератора входного сигнала 1 кГц. Окно параметров:



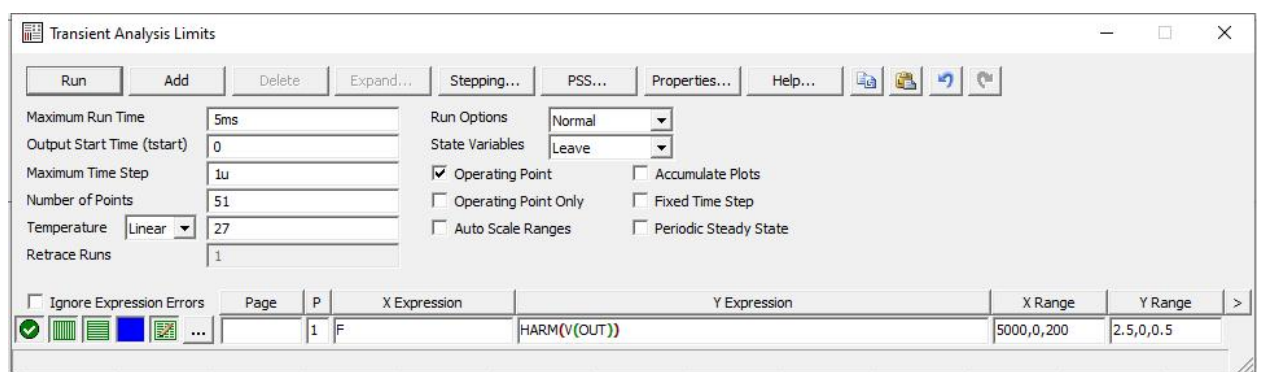
Увеличим амплитуду входного сигнала до 100 мВ.



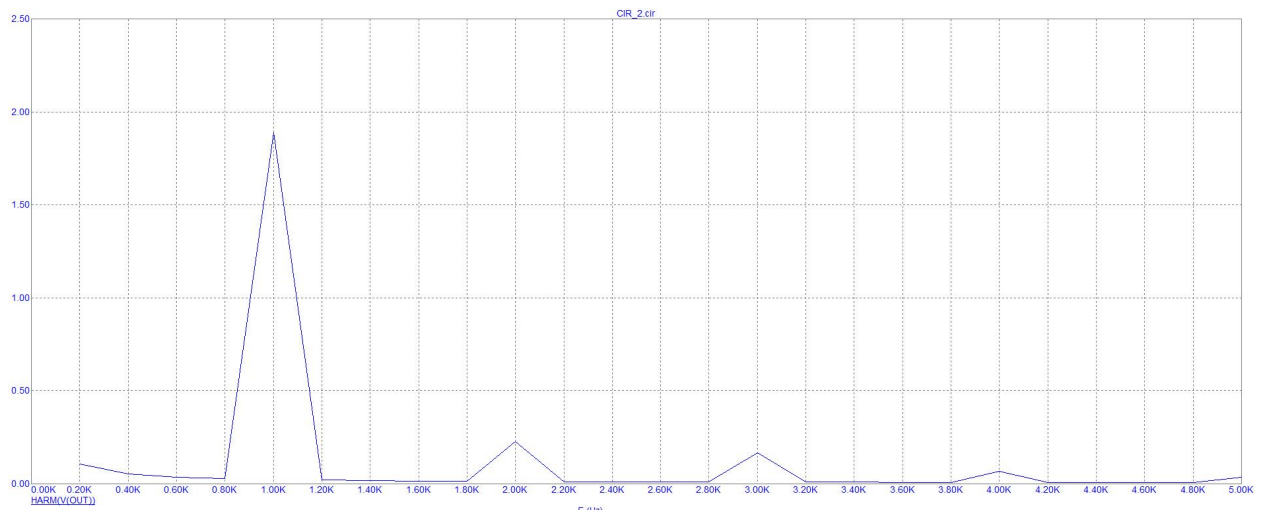
Увеличим амплитуду входного сигнала до 1 В.



Определим спектр сигнала на выходе усилительного каскада при амплитуде сигнала на входе 10 мВ. Окно задания анализа имеет вид :







Определим коэффициент нелинейных искажений  $K$  по первым пяти гармоникам. Для этого воспользуемся программой MatLab, в которую перенесем данные графика и проведем расчет.

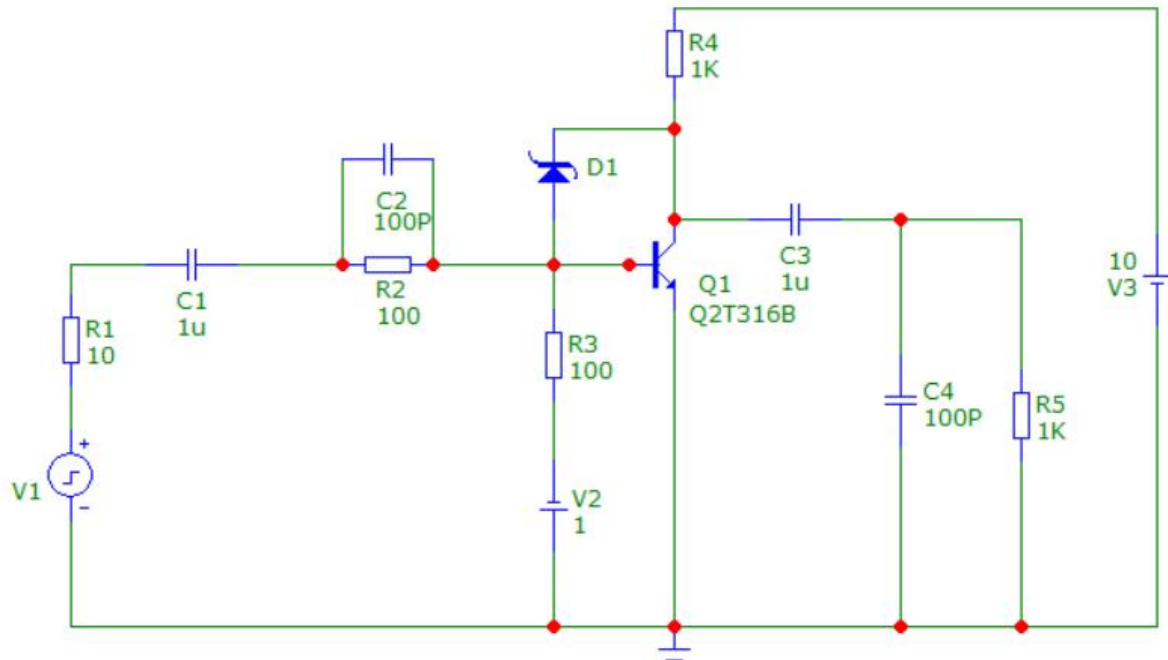
```
x = ciror1.Variables;
x = x(1:5, 1);
y = ciror2.Variables;
y = y(1:5, 1);
sqrt(sum(y(10:5:end).^2)) / y(5)
```

ans = 0.0865

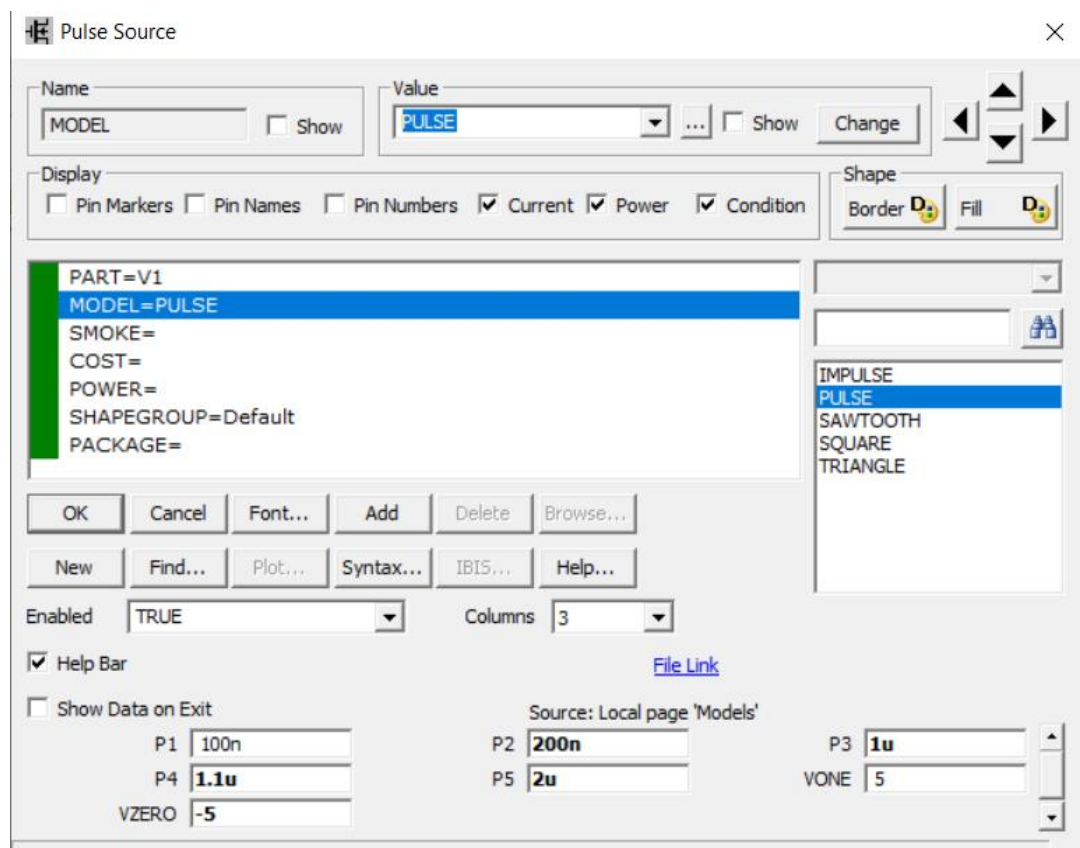
Таким образом, коэффициент нелинейных искажений составил 8.65%.

## СЕМИНАР 3

**3.1 Анализ по переменному току** - исследование временных диаграмм напряжений на входе и на выходе. Определение амплитуды входного импульса, переводящего схему в ключевой режим.



Зададим параметры генератора:



Зададим параметры для проведения анализа.

Transient Analysis Limits

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

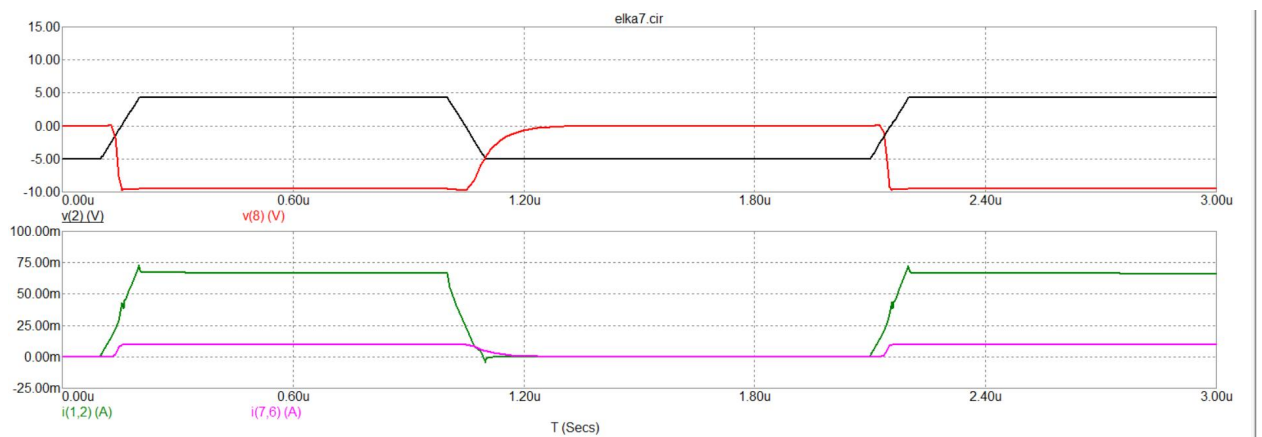
Maximum Run Time: 3u  
 Output Start Time (tstart): 100N  
 Maximum Time Step: 0  
 Number of Points: 51  
 Temperature: Linear 27  
 Retrace Runs: 1

Run Options: Normal  
 State Variables: Zero  
☒ Operating Point  
☐ Operating Point Only  
☐ Auto Scale Ranges  
☐ Accumulate Plots  
☐ Fixed Time Step  
☐ Periodic Steady State

☐ Ignore Expression Errors

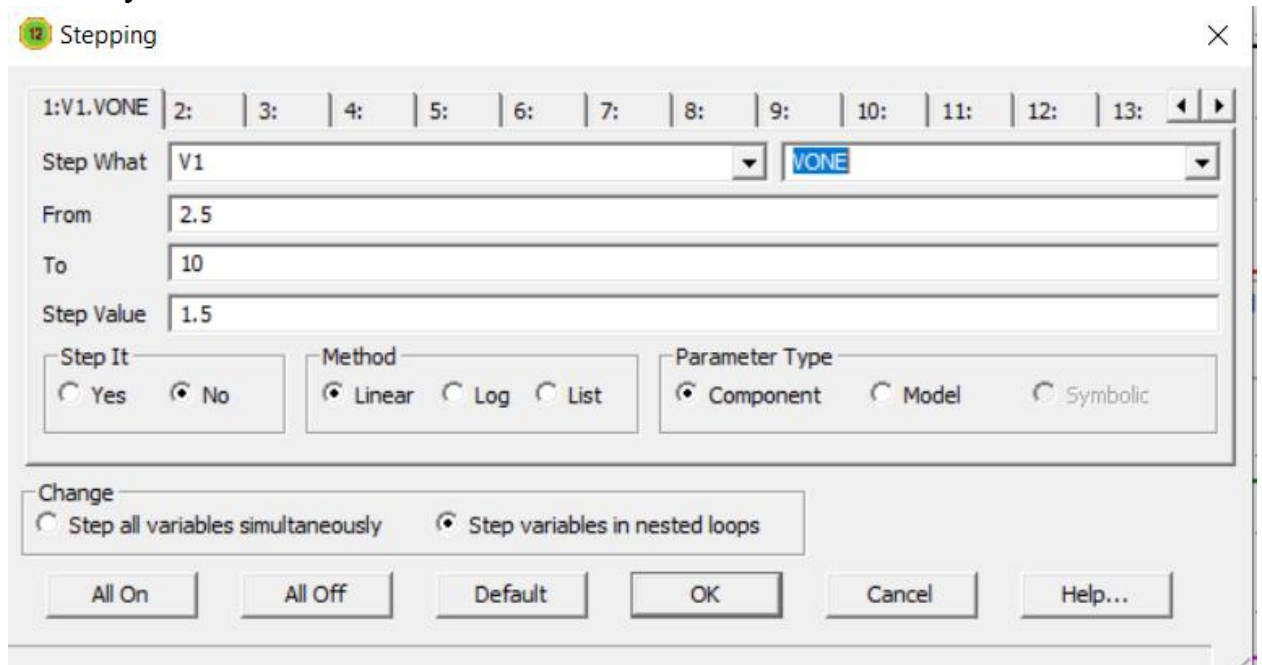
	Page	P	X Expression	Y Expression	X Range	Y Range
<input checked="" type="checkbox"/>	1	1	T	v(1)	3e-6, 1e-7, 5.8e-7	10, -15, 5
<input checked="" type="checkbox"/>	1	1	T	v(8)	3e-6, 1e-7, 5.8e-7	10, -15, 5
<input checked="" type="checkbox"/>	2	2	T	I(1,2)	3e-6, 1e-7, 5.8e-7	0.12, -0.03, 0.03
<input checked="" type="checkbox"/>	2	2	T	I(7,6)	3e-6, 1e-7, 5.8e-7	0.12, -0.03, 0.03

Результаты проведения анализа – временные диаграммы

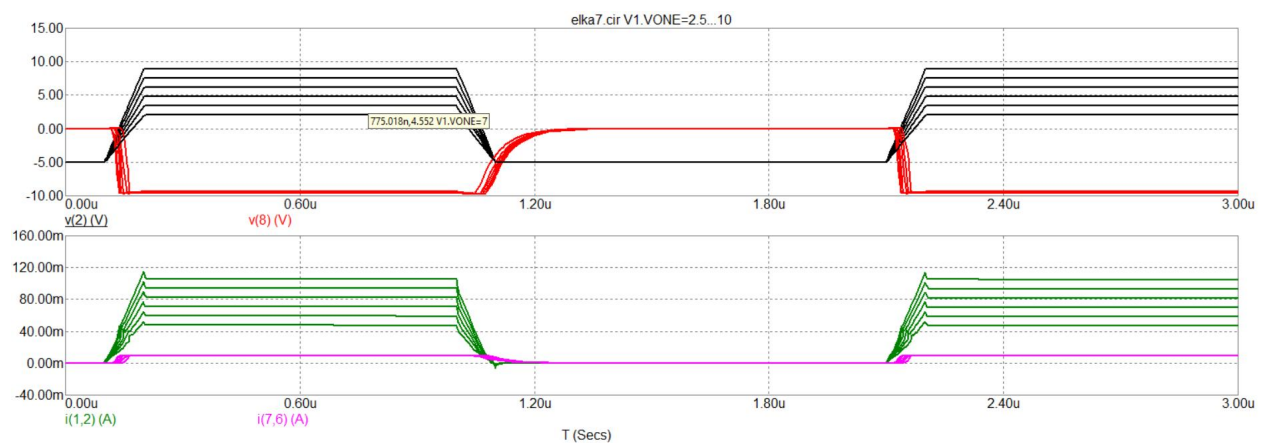


### 3.2. Многовариантный анализ.

Окно задания многовариантного анализа для исследования изменения амплитуды входного сигнала на амплитуды



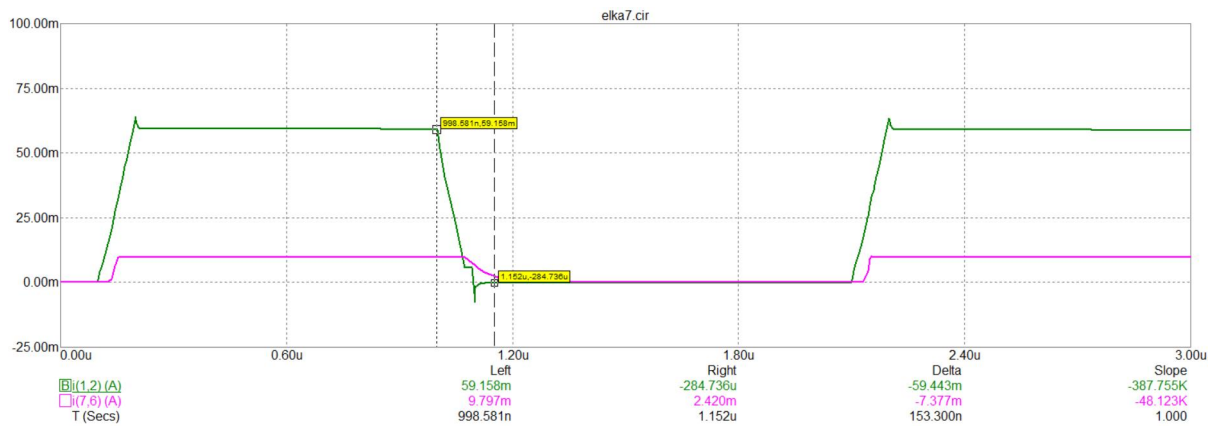
Результат многовариантного анализ



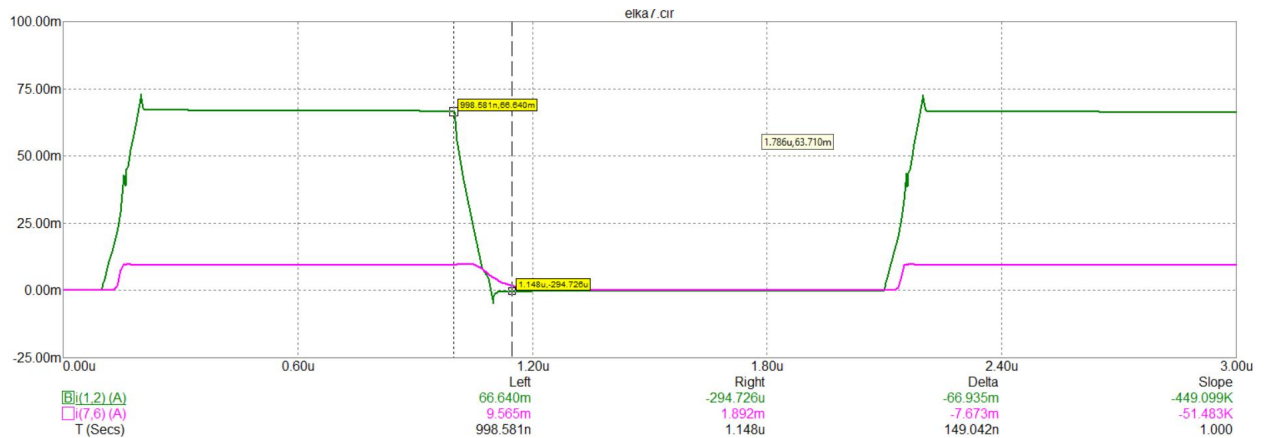
Далее определяется коэффициент насыщения:  $K_{\text{нас}} = I_{\text{бнас}} / I_{\text{бгр}}$ , где  $I_{\text{бнас}}$  - ток насыщения базы,  $I_{\text{бгр}}$  - граничное значение тока баз

### 3.3. Влияние диода Шотки.

#### Временные диаграммы без диода Шотки



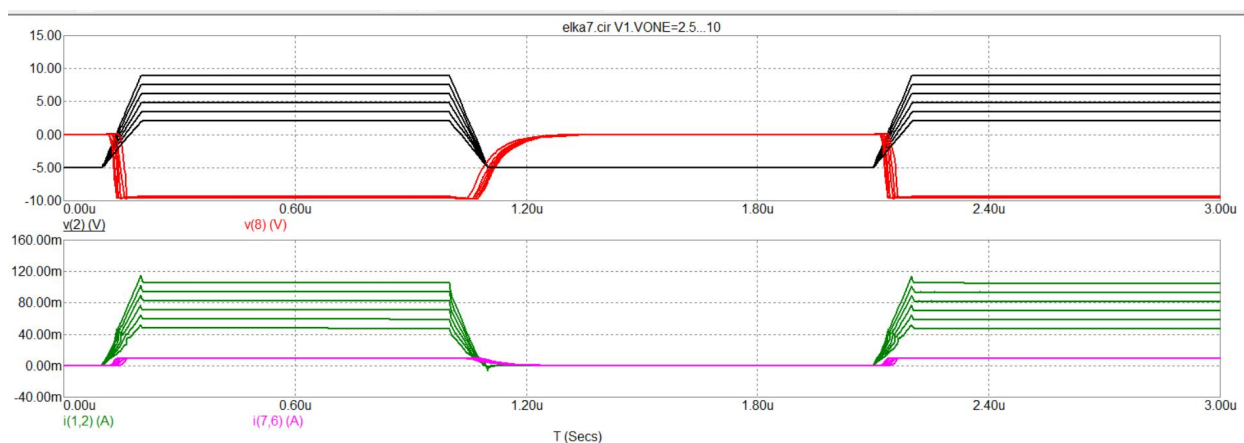
#### Временные диаграммы с диодом Шотки



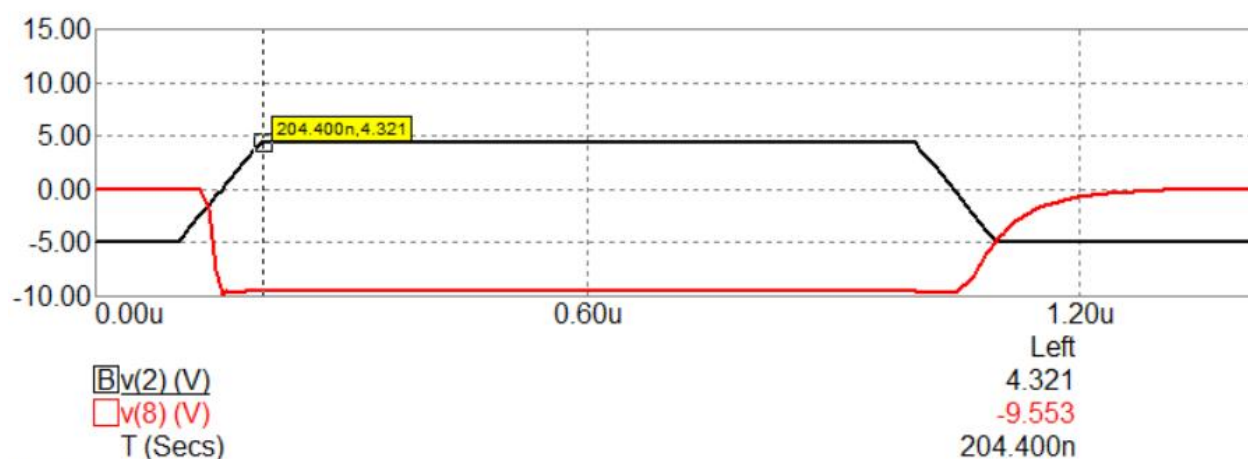
Из временных диаграмм видно, что время рассасывания неосновных носителей без диода  $t_{pac} = 154$  нс, а при наличии диода  $t_{pac} = 150$  нс (см. Delta). Таким образом, быстродействие увеличивается на 4 нс.

### 3.4. Определение коэффициента насыщения

Временные диаграммы при многовариантном анализе



Получаем временные диаграммы, представленные на рисунках. Видно, что срабатывание ключа происходит при амплитуде входного импульса  $V = 2,02$  В, при этом ток базы  $I_6 = I_{6гр} = 47,5$  мА.



V, В	$I_6$ , мА
2,02	47,5
3,41	58,9
4,79	70,5
6,17	82,1
7,55	93,7
8,94	105,3

Тогда коэффициент насыщения тока базы  $K_{нас} = I_{6нас}$

$K_{нас}$  (при  $V = 3,41$  В)  $= 58,9 / 47,5 = 1.24$ ;

$K_{нас}$  (при  $V = 4,79$  В)  $= 70,5 / 47,5 = 1,48$ ;

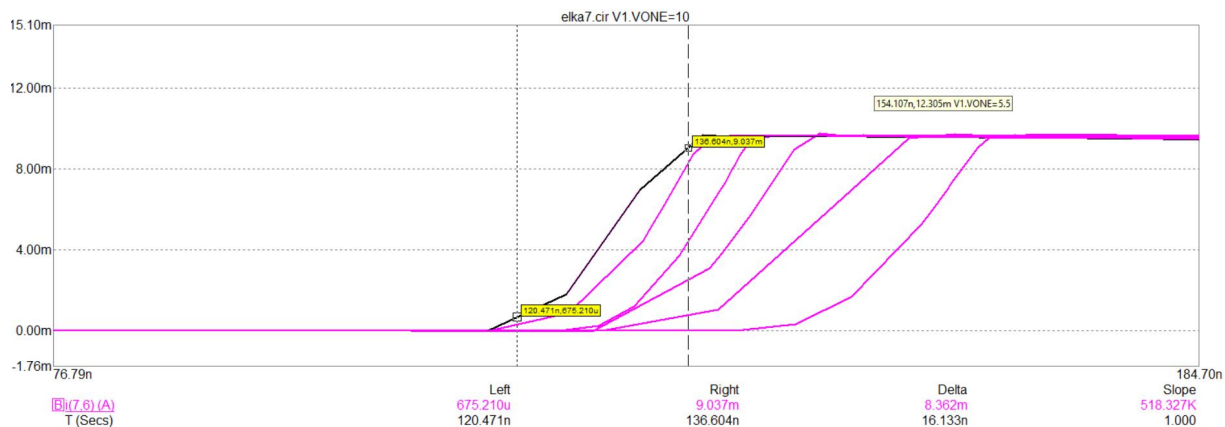
$K_{\text{нас}}$  (при  $V = 6,17 \text{ В}$ ) =  $82,1 / 47,5 = 1,72$ ;

$K_{\text{нас}}$  (при  $V = 7,55 \text{ В}$ ) =  $93,7 / 47,5 = 1,97$ ;

$K_{\text{нас}}$  (при  $V = 8,94 \text{ В}$ ) =  $105,3 / 47,5 = 2,21$

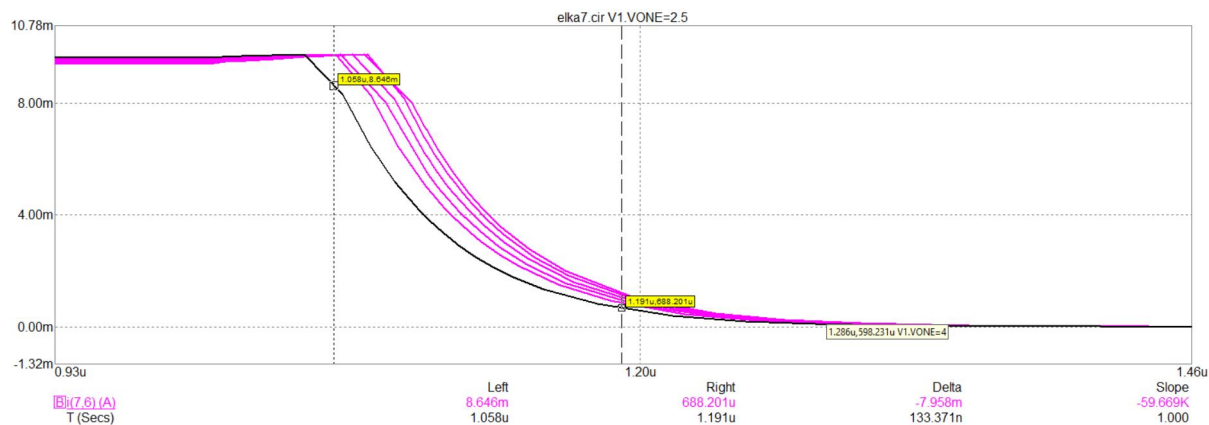
### 3.5. Определение длительности фронта.

Передние фронты импульсов



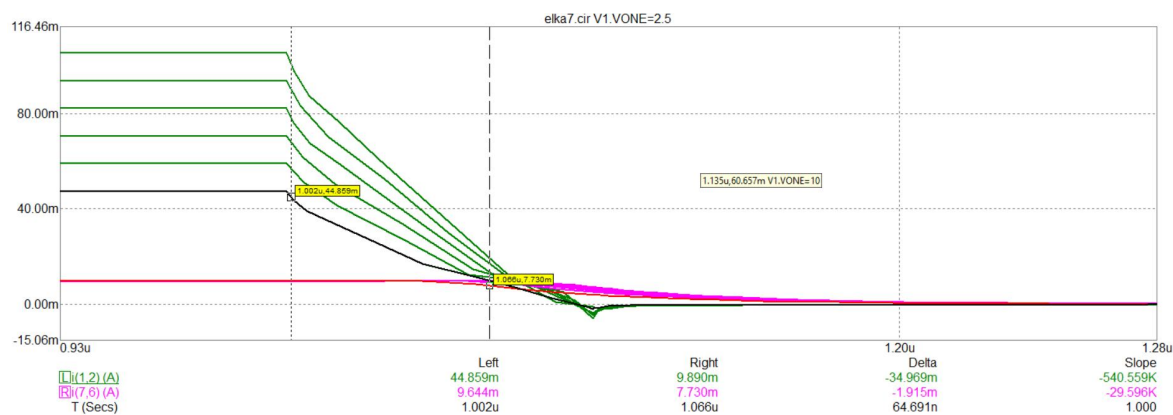
### 3.6. Определение длительности среза.

Задние фронты импульсов коллекторного тока



### 3.7. Определение времени рассасывания

Определение времени рассасывания неосновных носителей в базе



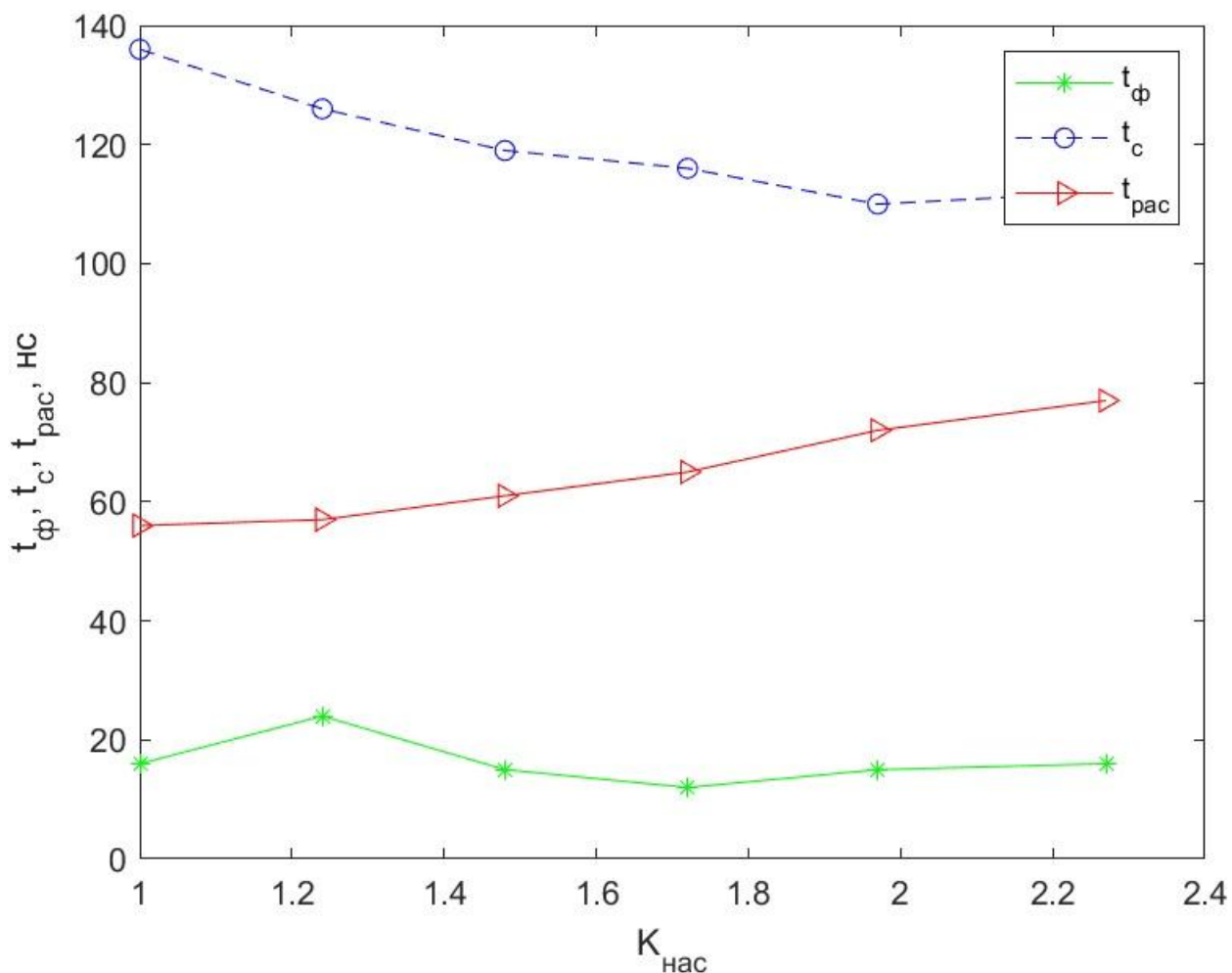
### 3.8. Построение графиков.

По полученным результатам можно составить следующую таблицу.

$K_{нас}$	$t_{\phi}, HC$	$t_c, HC$	$t_{pac}, HC$
1	16	136	56
1,24	24	126	57
1,48	15	119	61
1,72	12	116	65
1,97	15	110	72
2,27	16	112	77

На основании полученных временных диаграмм строятся графики зависимостей  $t_{\phi}$ ,  $t_c$  и  $t_{pac}$  от коэффициента насыщения для тока коллектора, где  $t_{\phi}$  — длительность фронта,  $t_c$  — длительность среза и  $t_{pac}$  — время рассасывания неосновных носителей в базе.





## ВЫВОД

в результате проведённой работы были определены параметры модели библиотечного биполярного транзистора КТ315А, после чего он был добавлен в библиотеку программы Micro-Cap 9. Был создан и исследован каскад усиления на основе полученного транзистора, проведен расчет по постоянному току, проведен анализ работы по переменному току получен спектр сигнала на выходе и рассчитан коэффициент нелинейных искажений. Проведено исследование работы ключа на заданном биполярном транзисторе с нелинейной обратной связью.

## СПИСОК ИСПОЛЬЗОВАННОЙ ЛИТЕРАТУРЫ

1. Полупроводниковые приборы : Транзисторы. Справочник / В.Л.Аронов, А.В.Баюков, А.А.Зайцев и др. Под общ. ред. Н.Н.Горюнова. – 2-е изд., перераб. – М.: Энергоатомиздат, 1985 904с.,ил.