



**«Московский государственный технический
университет
имени Н.Э. Баумана»
(МГТУ им.Н.Э. Баумана)**

Факультет РТ

Кафедра РЛ1 «Радиоэлектронные системы и устройства»

Домашнее задание №2

по курсу «Электроника»

Анализ и синтез усилительного каскада на биполярном транзисторе

Вариант № 27

Выполнил студент группы РТ1-41 Иванов В.В.
Преподаватель Крайний В. И.

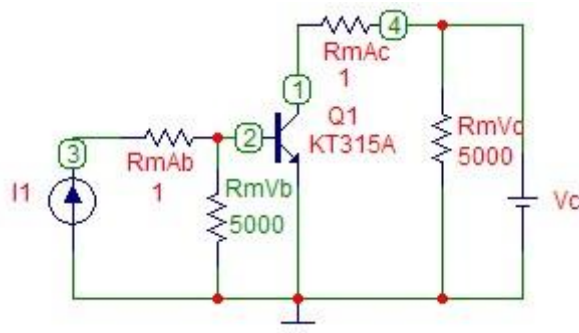
Москва 2020

1. Расчет параметров модели заданного биполярного транзистора

Исходные параметры модели транзистора **КТ315А**: $I_s=21.11f$ $X_{ti}=3$
 $E_g=1.11$ $V_{af}=115$ $B_f=79.74$ $I_{se}=233.2f$ $N_e=1.417$ $I_{kf}=.2922$ $N_k=.6296$ $X_{tb}=1.5$
 $Br=1.3$ $I_{sc}=107.3f$ $N_c=1.298$ $I_{kr}=2.561$ $R_b=12$ $R_c=1.032$ $C_{jc}=8.988p$ $M_{jc}=.33$ $V_{jc}=.75$
 $F_c=.5$ $C_{je}=18.5p$ $M_{je}=.33$ $V_{je}=.75$ $T_r=244.3n$ $T_f=321.4p$ $I_{tf}=1$ $X_{tf}=2$ $V_{tf}=60$.

Из справочника [1] определяем максимальное значение коллекторного тока **180 мА**.

Схема для исследования выходных характеристик биполярного транзистора



Окно задания параметров построения выходных характеристик

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: Save ☐ Auto Scale Ranges ☐ Accumulate Plots

Page	P	X Expression	Y Expression	X Range	Y Range	>
1	1	v(1)	IC(Q1)	20,0,4	0.24,-0.06,0.06	

Семейство выходных характеристик

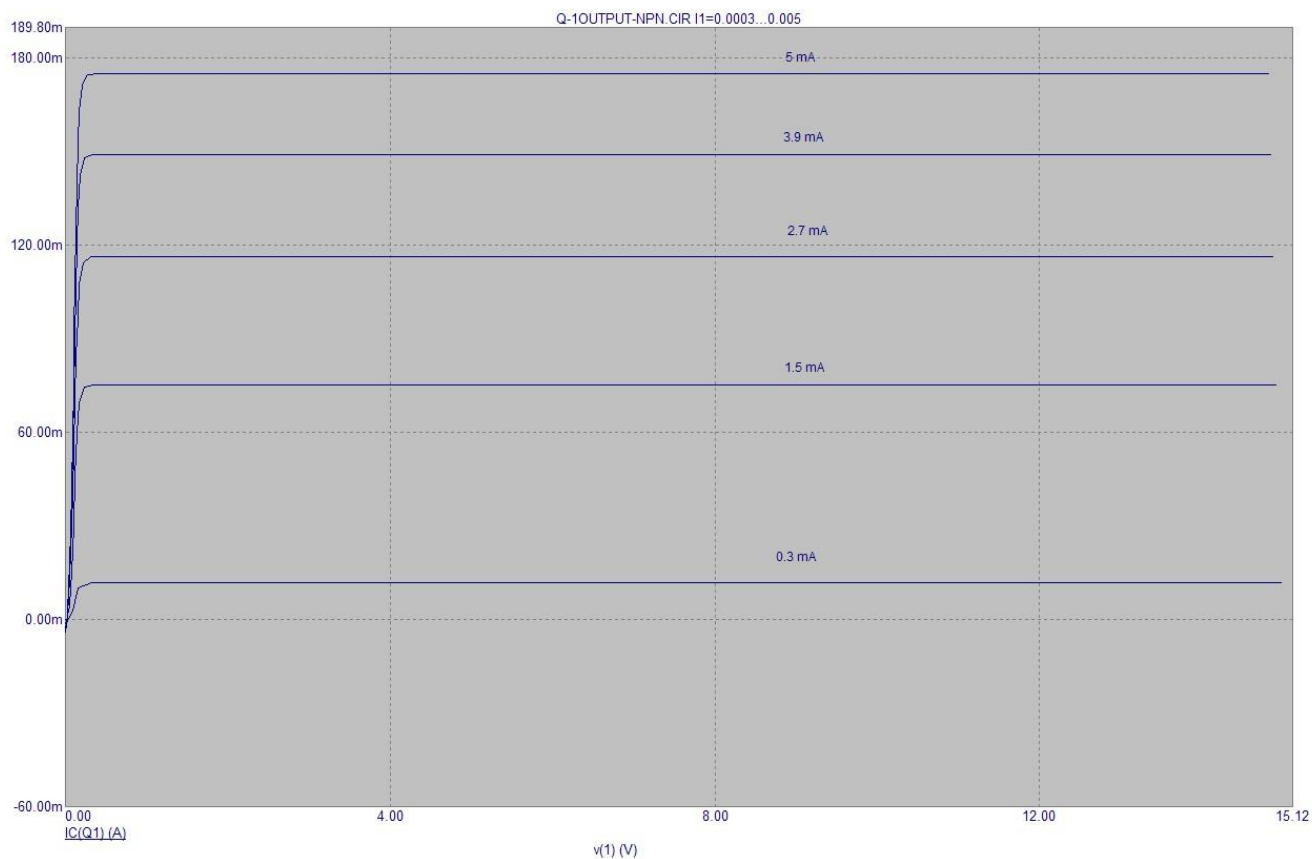
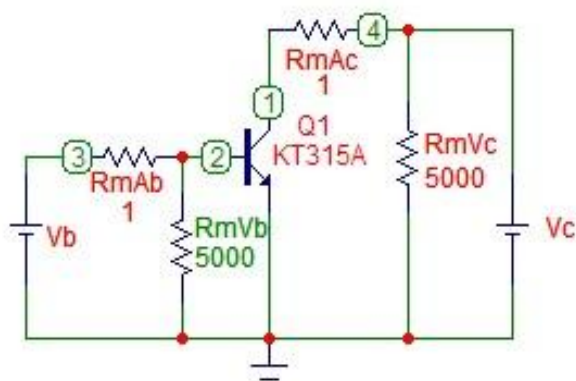


Схема для исследования входных характеристик биполярного транзистора



DC Analysis Limits

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

Sweep

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

Temperature

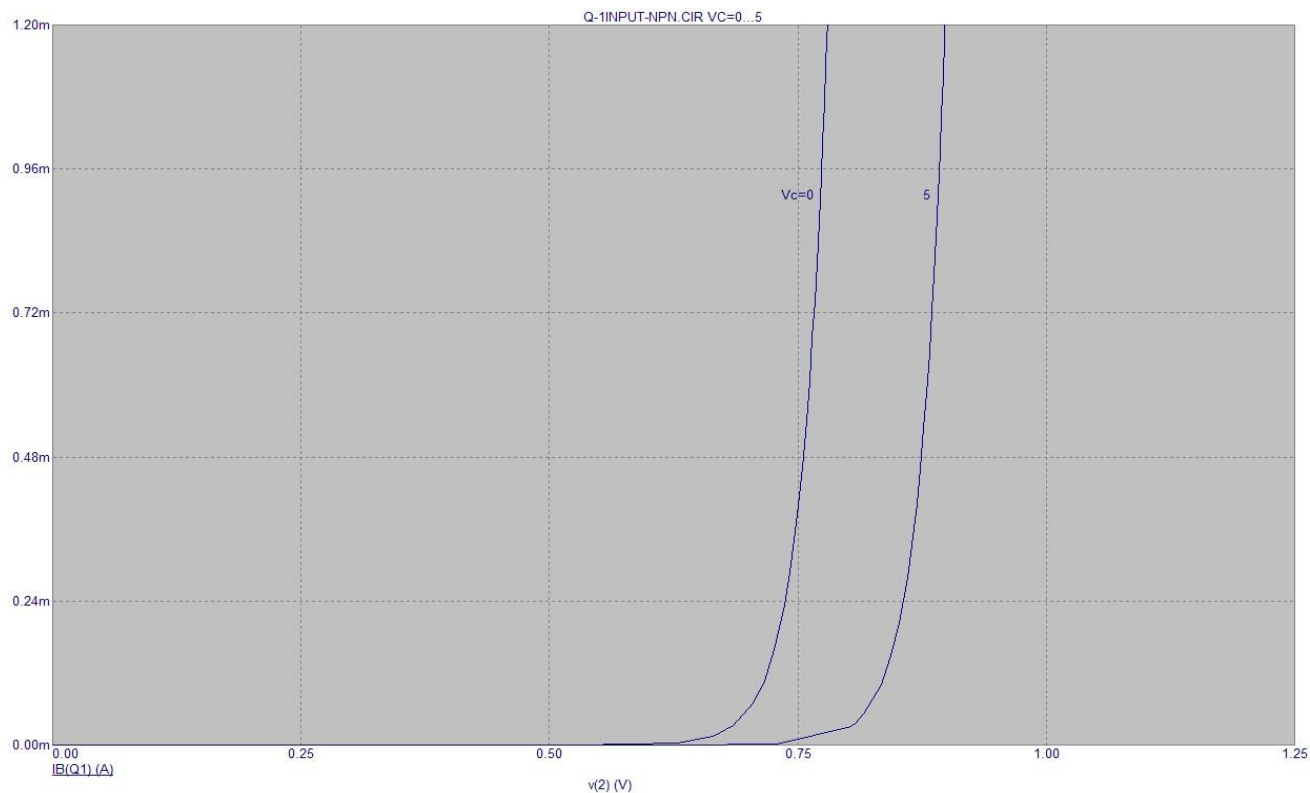
Method	Range
Linear	27

Number of Points: 10

Maximum Change %: 5

Run Options: Save ☐ Auto Scale Ranges ☐ Accumulate Plots

Page	P	X Expression	Y Expression	X Range	Y Range
1	1	v(2)	IB(Q1)	1.25,0,0.25	0.0012



Окно задания параметров построения входных характеристик

Семейство входных характеристик

Определение тока коллектора и напряжения база-эмиттер в режиме насыщения

Таблица 1

V_{ce}, B	0.163	0.181	0.216	0.235	0.272
$I_{c.нас}, A$	0.011	0.07	0.114	0.147	0.175
$I_B,$ A	0.0003	0.0015	0.0027	0.0039	0.005
V_{be}, B	0.862	0.903	0.920	0.928	0.936

V_{ce} — напряжение коллектор-эмиттер; $I_{c.нас}$ — ток насыщения коллектора;

I_B — ток базы; V_{be} — напряжение база-эмиттер.

Расчет выходной проводимости

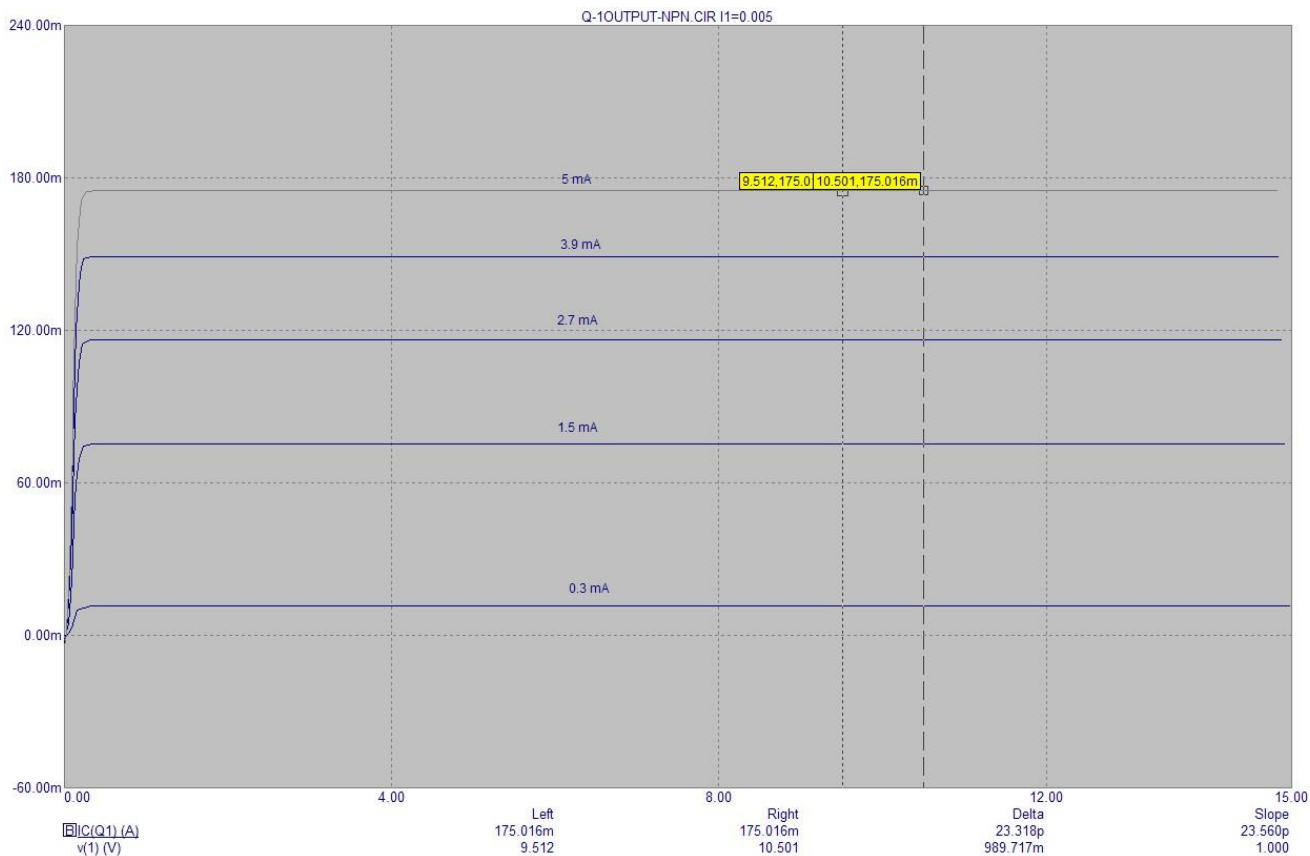


Таблица 2

V_{ce}, B	9.5	10.5
I_c, A	0.175016000000	0.175016000023

I_c – ток коллектора;

V_{ce} – напряжение коллектор-эмиттер.

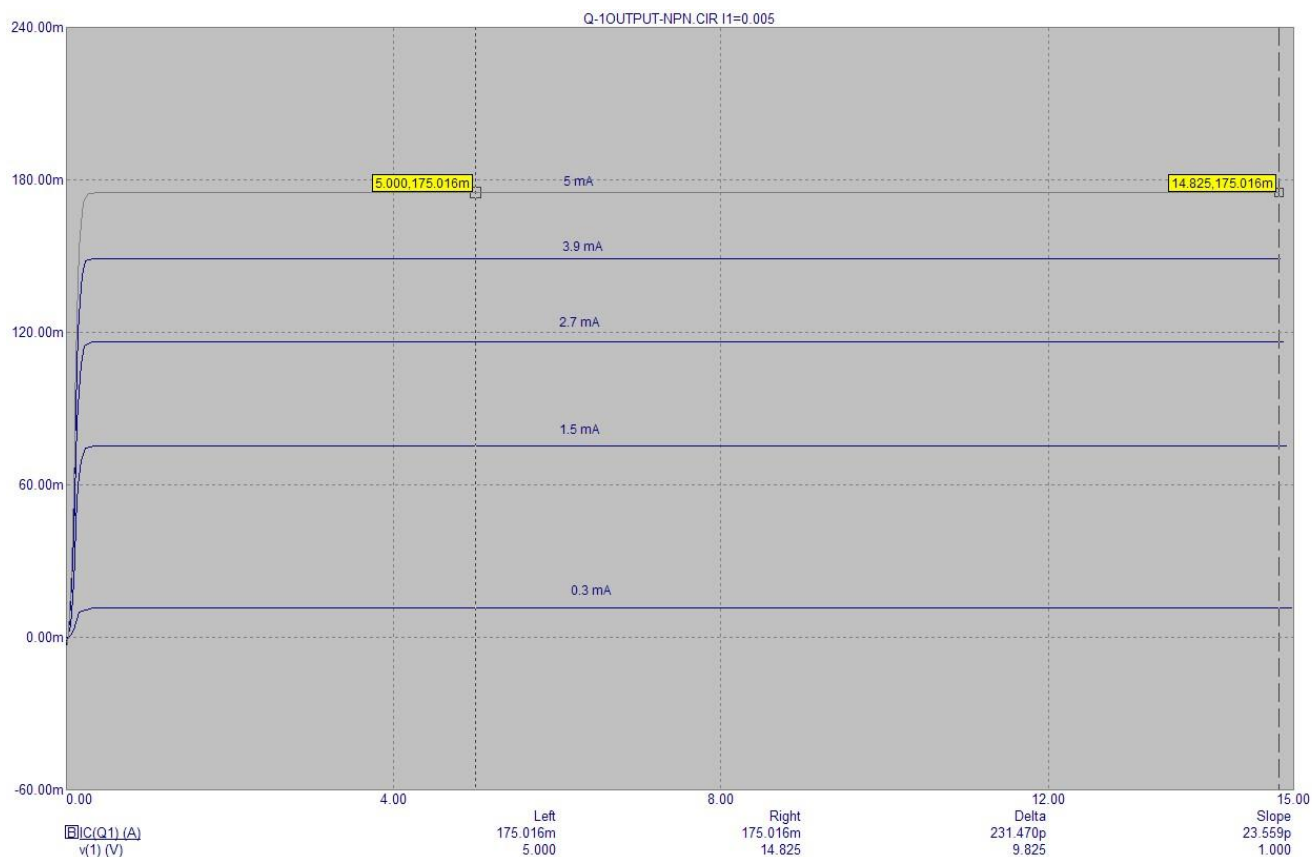
$$h_{0e} = \Delta I_c / \Delta V_{ce} = (0.175016000023 - 0.175016000000) / (10.5 - 9.5) = 0.000000000023.$$

Расчет статического коэффициента передачи по току

(при $V_{ce} = 5 B$)

Таблица 3

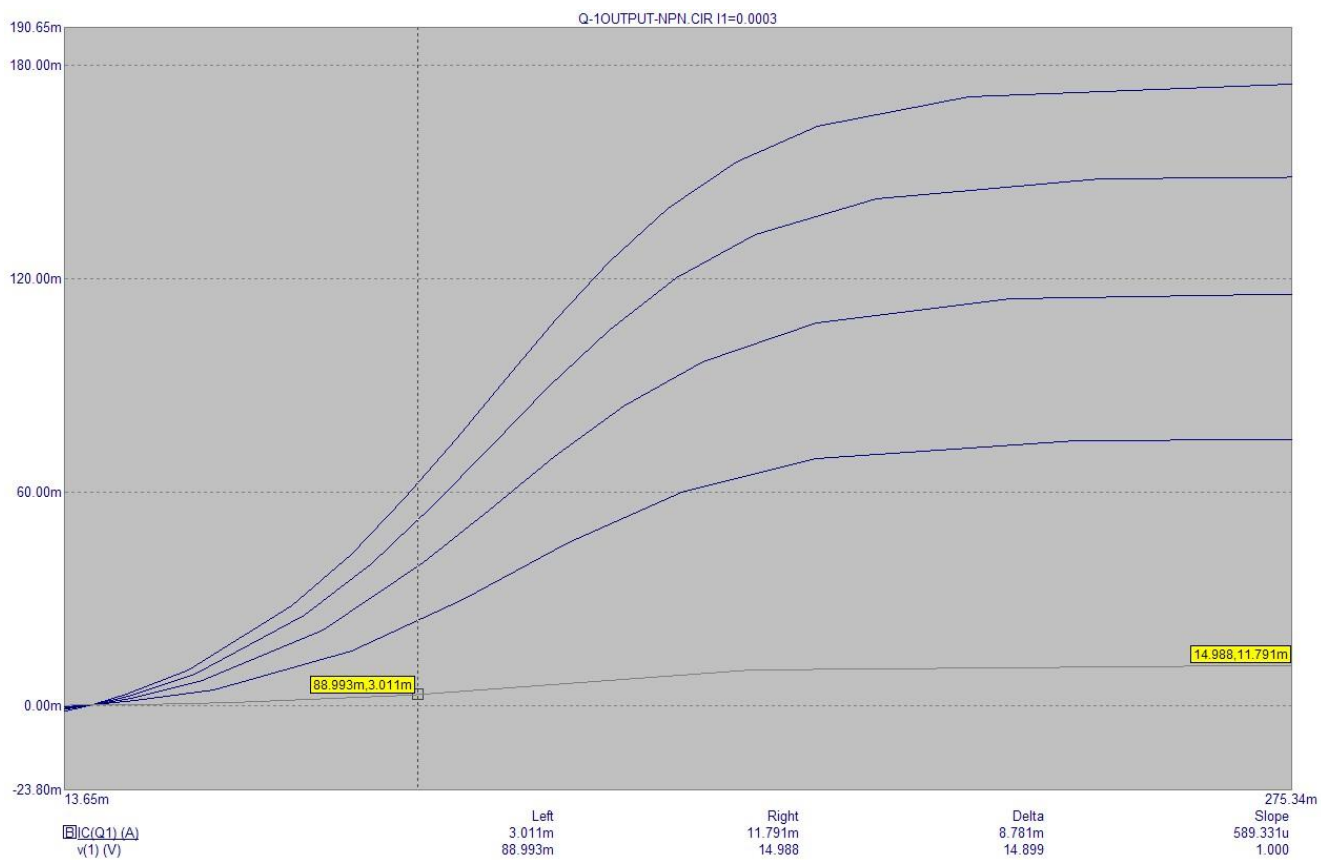
I_c, A	0.012	0.075	0.116	0.149	0.175
I_B, A	0.0003	0.0015	0.0027	0.0039	0.005
BF (I_c/I_B)	40	50	43	38	35



Определение напряжения насыщения V_{ce}
(при заданном $I_C/I_B=10$)

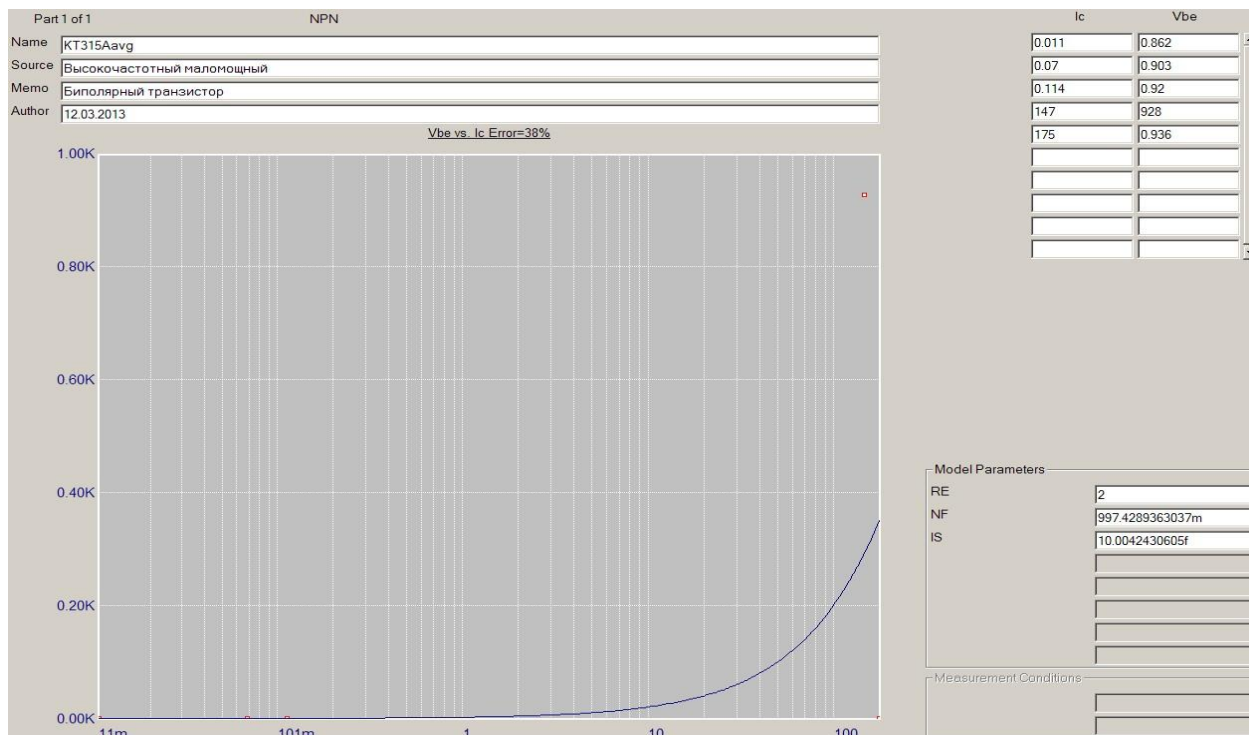
Таблица 4

$I_{c.нас}, A$	0.003	0.015	0.027	0.039	0.05
I_B, A	0.0003	0.0015	0.0027	0.0039	0.005
V_{ce}, B	0.088	0.074	0.075	0.079	0.08

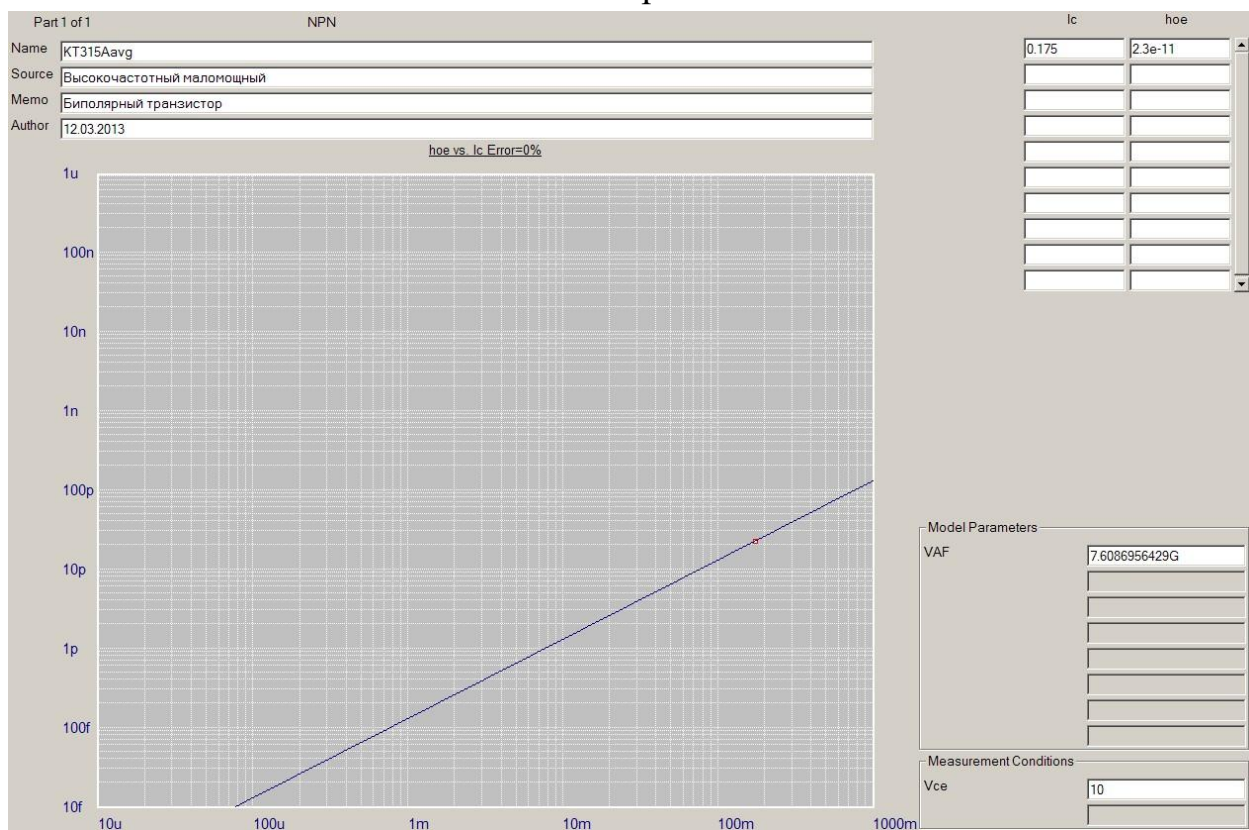


Расчет параметров модели биполярного транзистора в программе Model

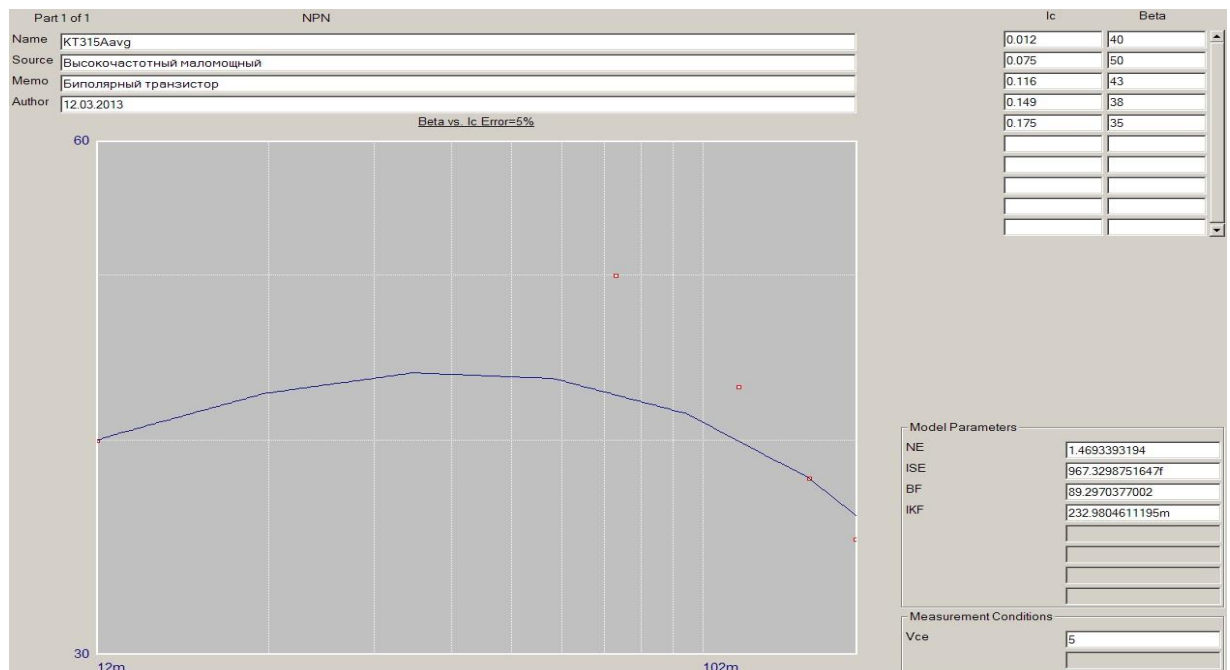
Окно расчетов 1



Окно расчетов 2



Окно расчетов 3



Окно расчетов 4

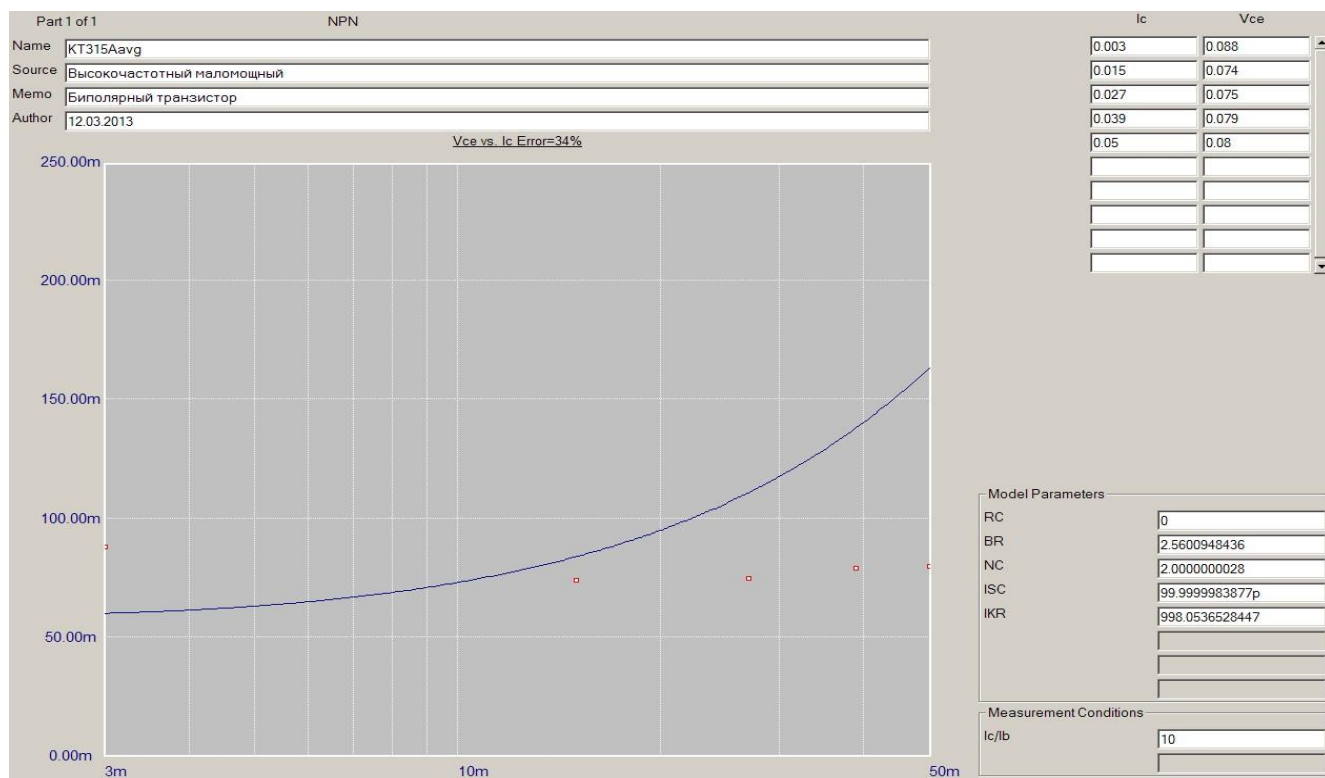
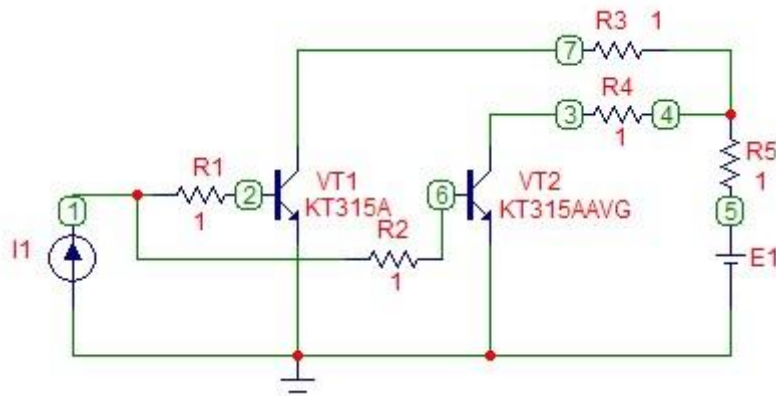


Схема для исследования выходных характеристик биполярного транзистора (совмещение характеристик)



R_1, R_2, R_3, R_4 – резисторы для уменьшения влияния транзисторов друг на друга;

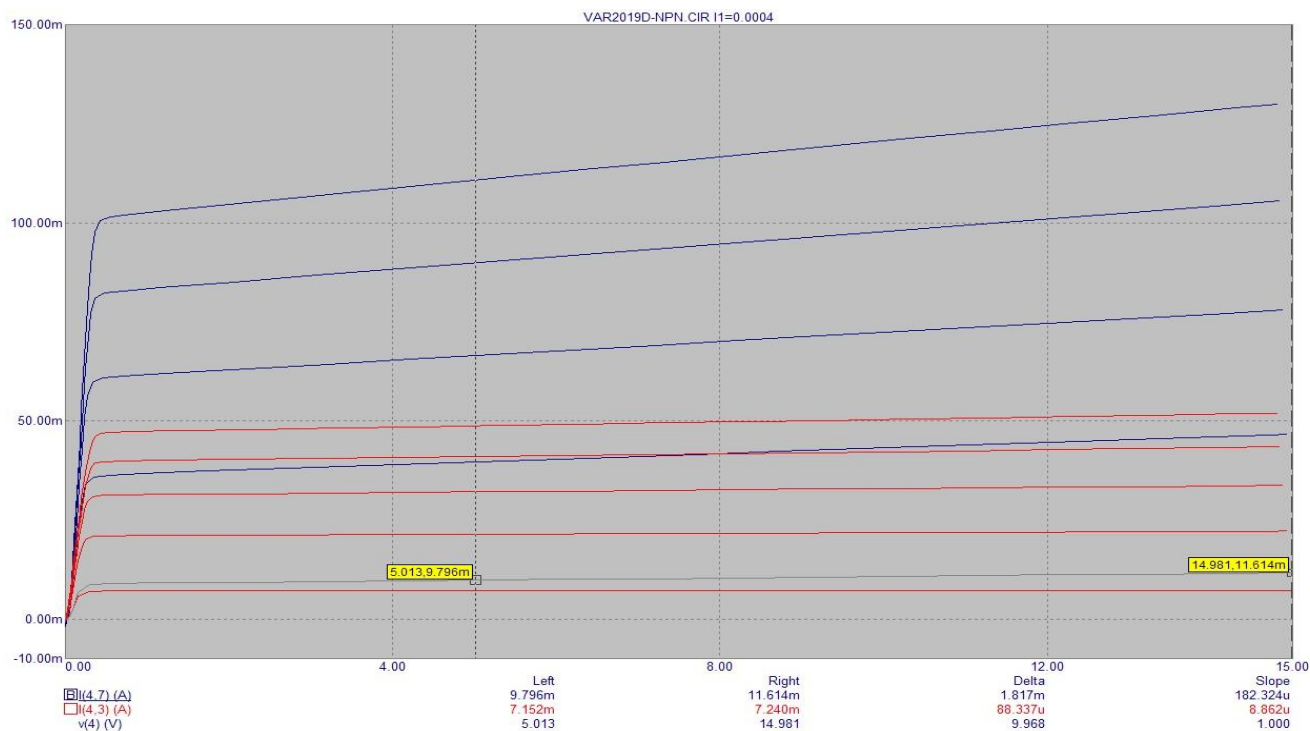
R_5 – внутреннее сопротивление источника.

Параметры модели транзистора (KT315A AVG), полученные в программе Model:

BF=89.297037700233 BR=2.560094843646 CJC=5p
 CJE=2p IKF=232.980461119495m IKR=998.053652844685
 IS=10.004243060504f

ISC=99.999998387676p ISE=967.329875164675f ITF=10m MJC=500m
 MJE=500m NC=2.000000002758 NE=1.469339319372
 NF=997.428936303743m RE=1.999999999982 TF=1n TR=10n
 VAF=7.608695642874G VTF=10 XTF=500m

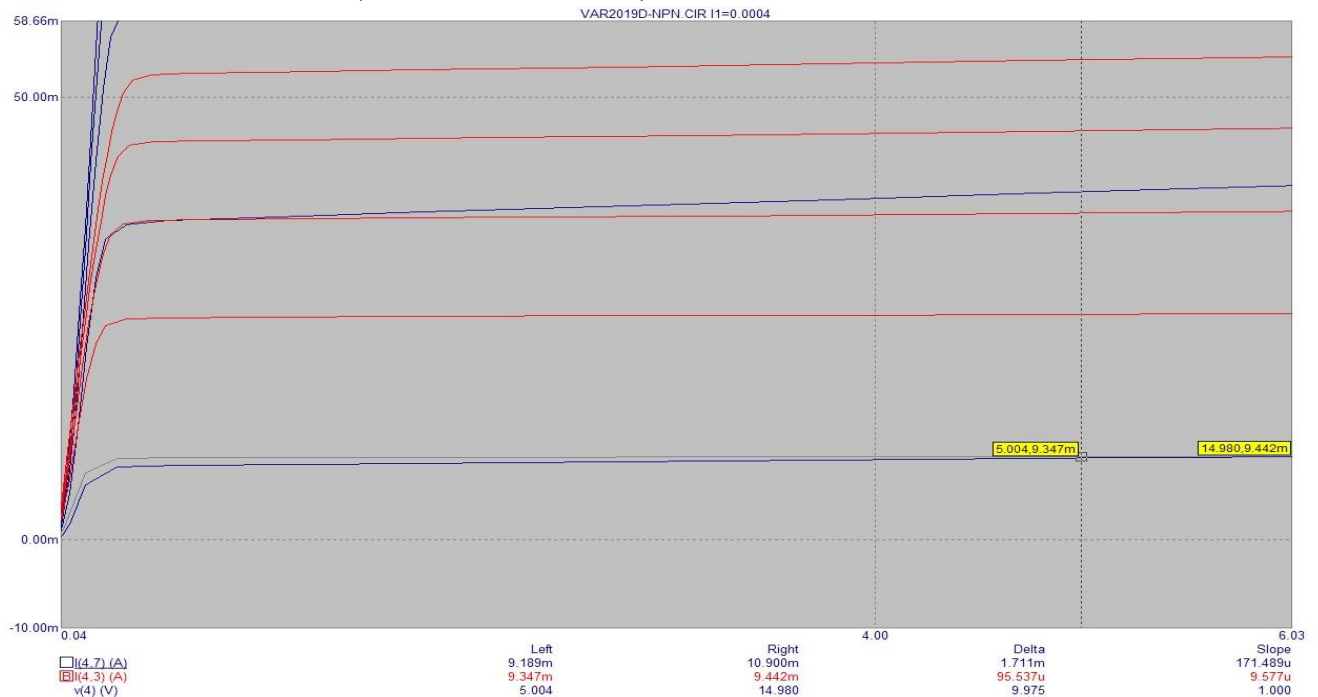
Семейство выходных характеристик транзисторов



Рассчитаем относительную погрешность:

$$\sigma = |(I_{c\text{синий}} - I_{c\text{красный}}) / I_{c\text{синий}} \cdot 100\% = |(9.796 - 7.152) / 9.796 \cdot 100\% = 27 \%$$

Поскольку погрешность не должна превышать 10%, то изменим значение IS=10 до 17 (для KT315A AVG).



Относительная погрешность: $\sigma = |(I_{c\text{синий}} - I_{c\text{красный}}) / I_{c\text{синий}} = |(9.189 - 9.347) / 9.189 \cdot 100\% = 1.7 \%$.

Эта погрешность удовлетворяет заданию.

Параметры модели транзистора **KT315A AVG** скорректированные:

BF=89.297037700233 BR=2.560094843646 CJC=5p CJE=2p

IKF=232.980461119495m IKR=998.053652844685 IS=17f

ISC=99.999998387676p ISE=967.329875164675f ITF=10m MJC=500m

MJE=500m NC=2.000000002758 NE=1.469339319372

NF=997.428936303743m RE=1.999999999982 TF=1n TR=10n

VAf=7.608695642874G VTF=10 XTF=500m

Параметры модели транзистора **KT315A** исходные:

Is=21.11f Xti=3 Eg=1.11 Vaf=115 Bf=79.74 Ise=233.2f Ne=1.417
Ikf=.2922 Nk=.6296 Xtb=1.5 Br=1.3 Isc=107.3f Nc=1.298 Ikr=2.561 Rb=12
Rc=1.032 Cjc=8.988p Mjc=.33 Vjc=.75 Fc=.5 Cje=18.5p Mje=.33 Vje=.75
Tr=244.3n Tf=321.4p Itf=1 Xtf=2 Vtf=60.

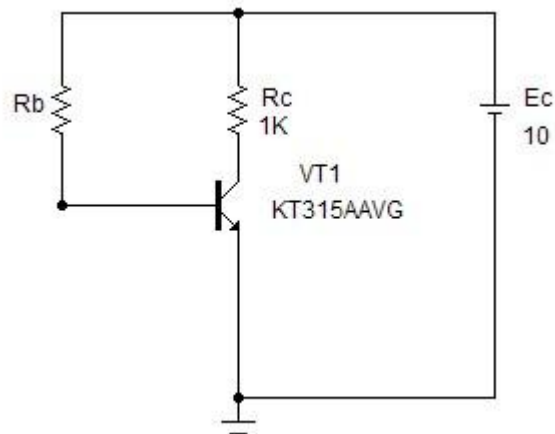
2. Расчет и настройка усилительного каскада

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

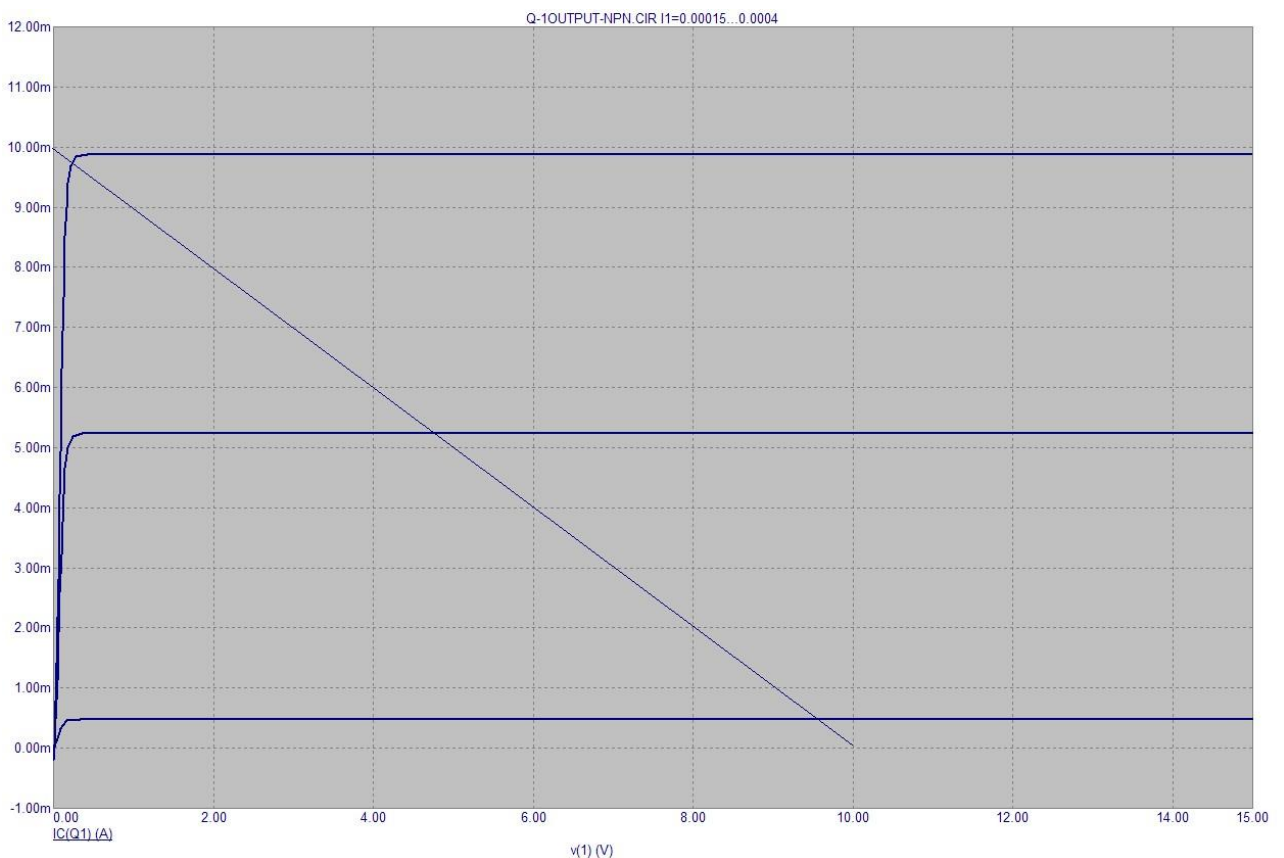
Так как рабочая точка должна лежать в середине нагрузочной прямой, то $U_{ce} = 5 \text{ В}$.

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

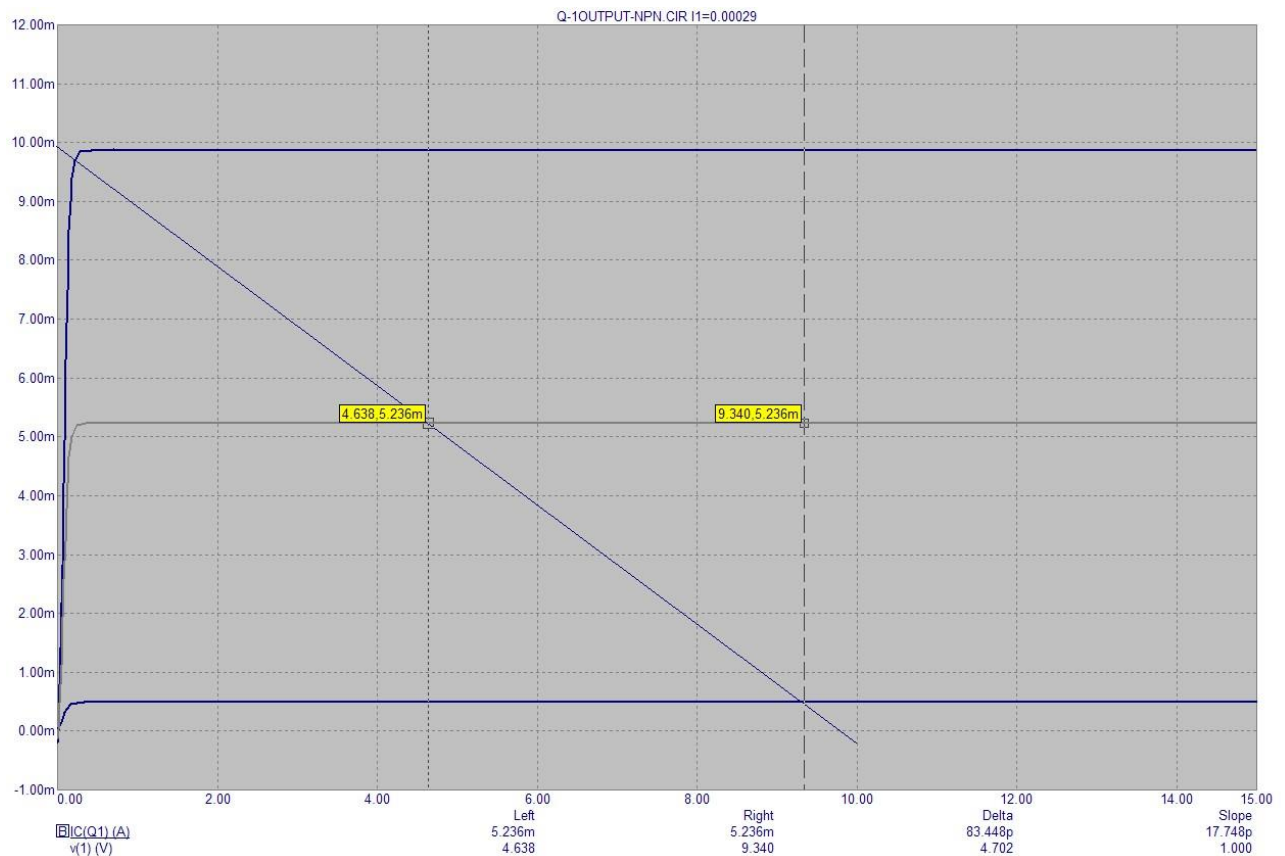
Схема для настройки имеет вид:



На семействе выходных характеристик построим нагрузочную прямую.

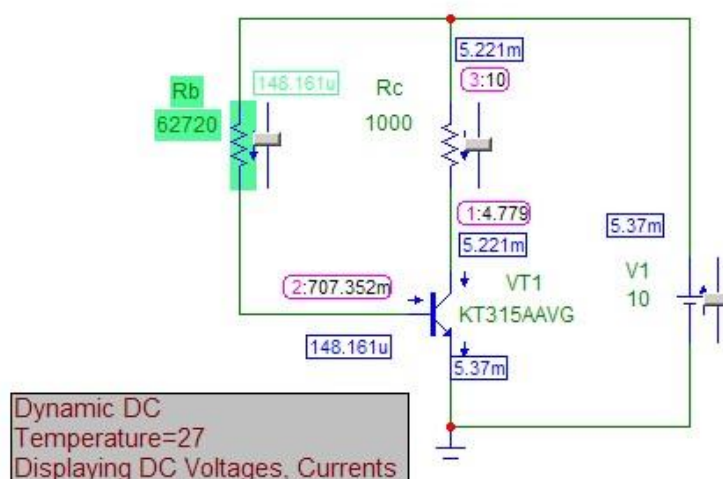


Определим реальные значения напряжения и тока.

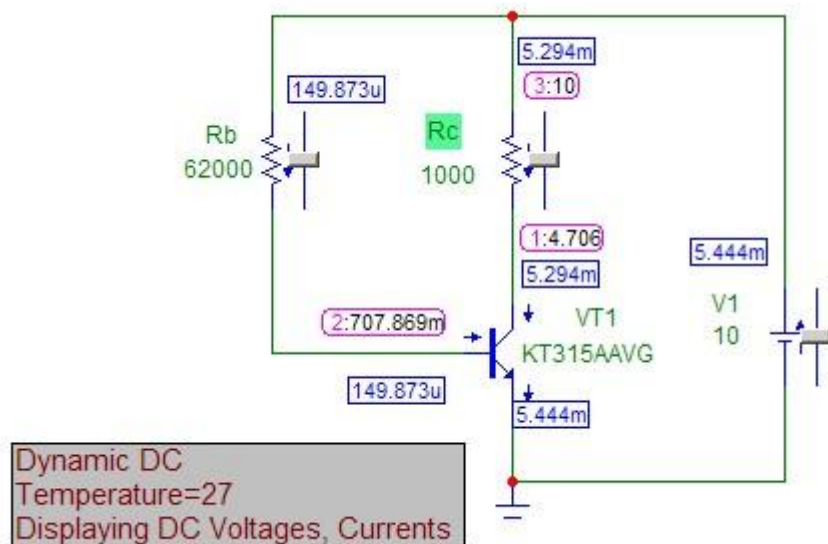


Видно, что рабочая точка имеет следующие параметры:

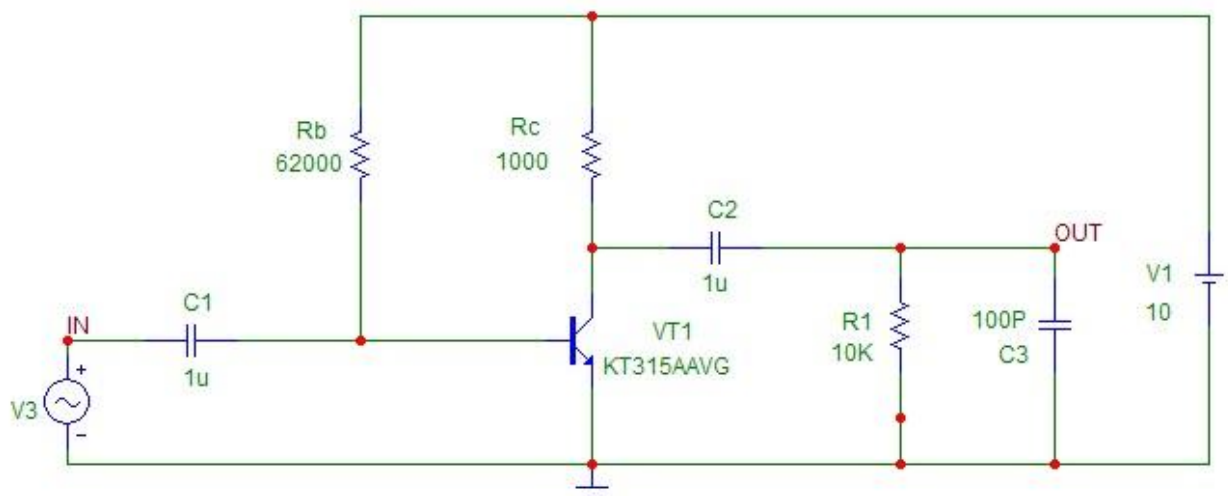
$U_{ce}=4.638$ В , $I_c=5.236$ мА. При этом $I_{c_{мин}}=0.495$ мА и $I_{c_{макс}}=9.859$ мА. Используя динамический анализ по постоянному току (Dynamic DC) на основе полученных данных при помощи функции Slider определяем значение сопротивления резистора R_b .



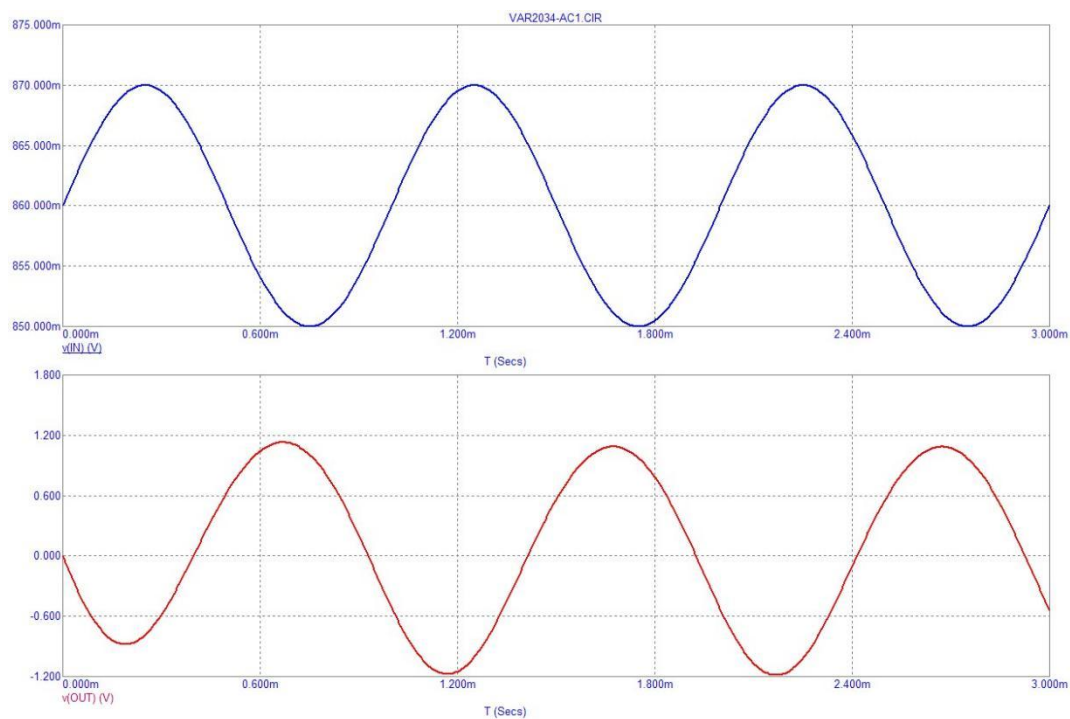
Получаем $R_b \approx 62.72$ кОм. Выбираем резистор в соответствии с сеткой E24 с номинальным значением сопротивлением $R_b=62$ кОм. При этом получаем



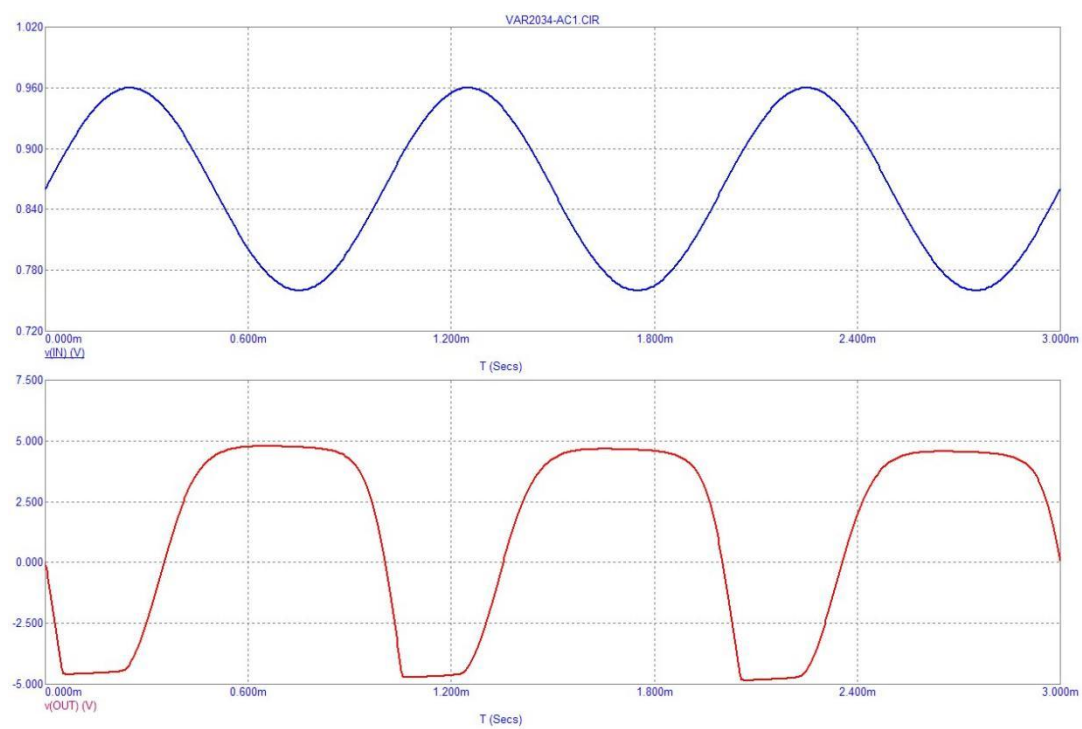
Дополним каскад, рассчитанный по постоянному току, виртуальным генератором сигналов (Voltage Source).



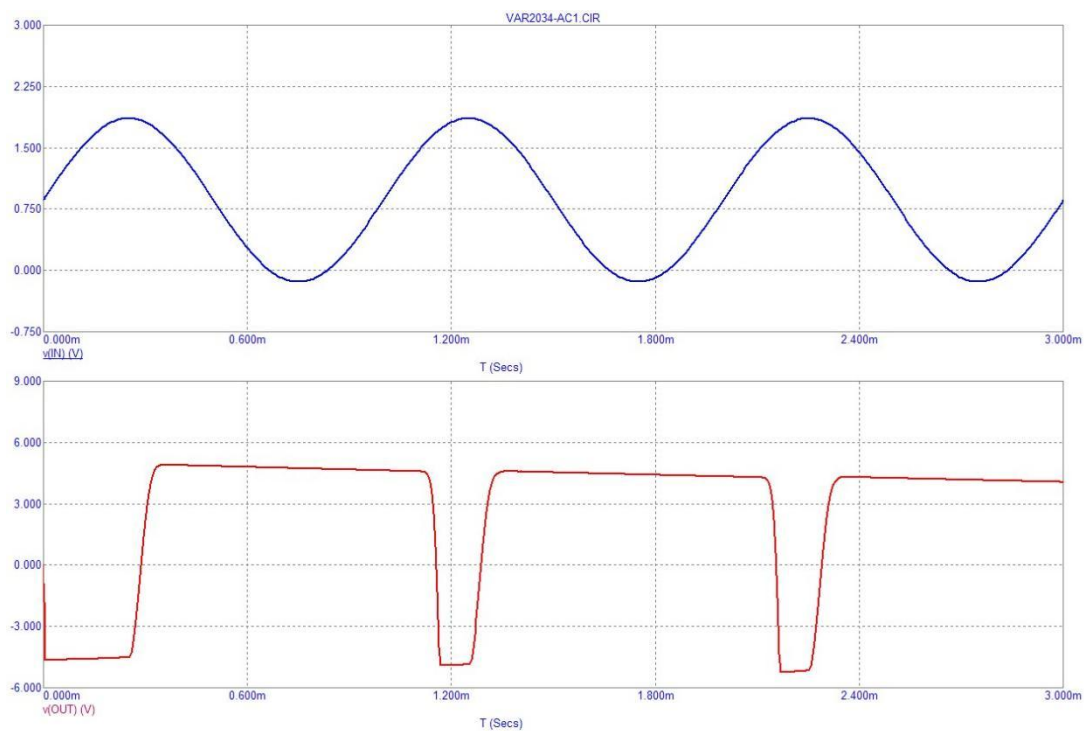
Проведем анализ работы схемы во временной области при различных амплитудах входного сигнала, задав частоту генератора входного сигнала 1 кГц.



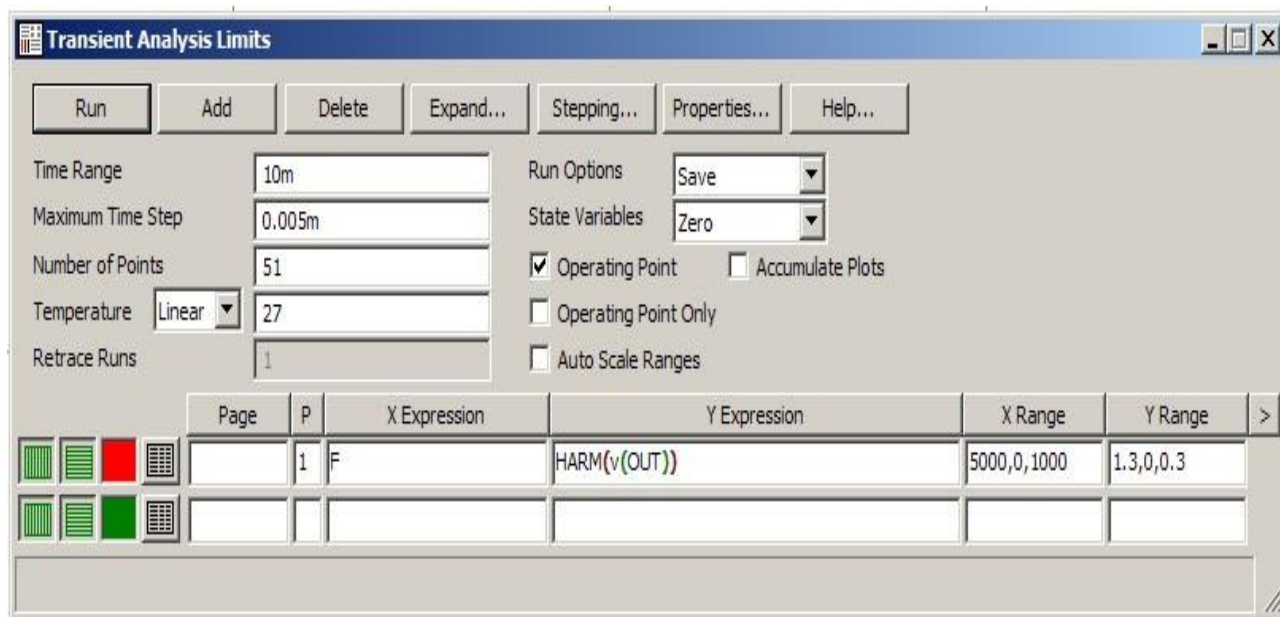
Увеличим амплитуду входного сигнала до 100 мВ.



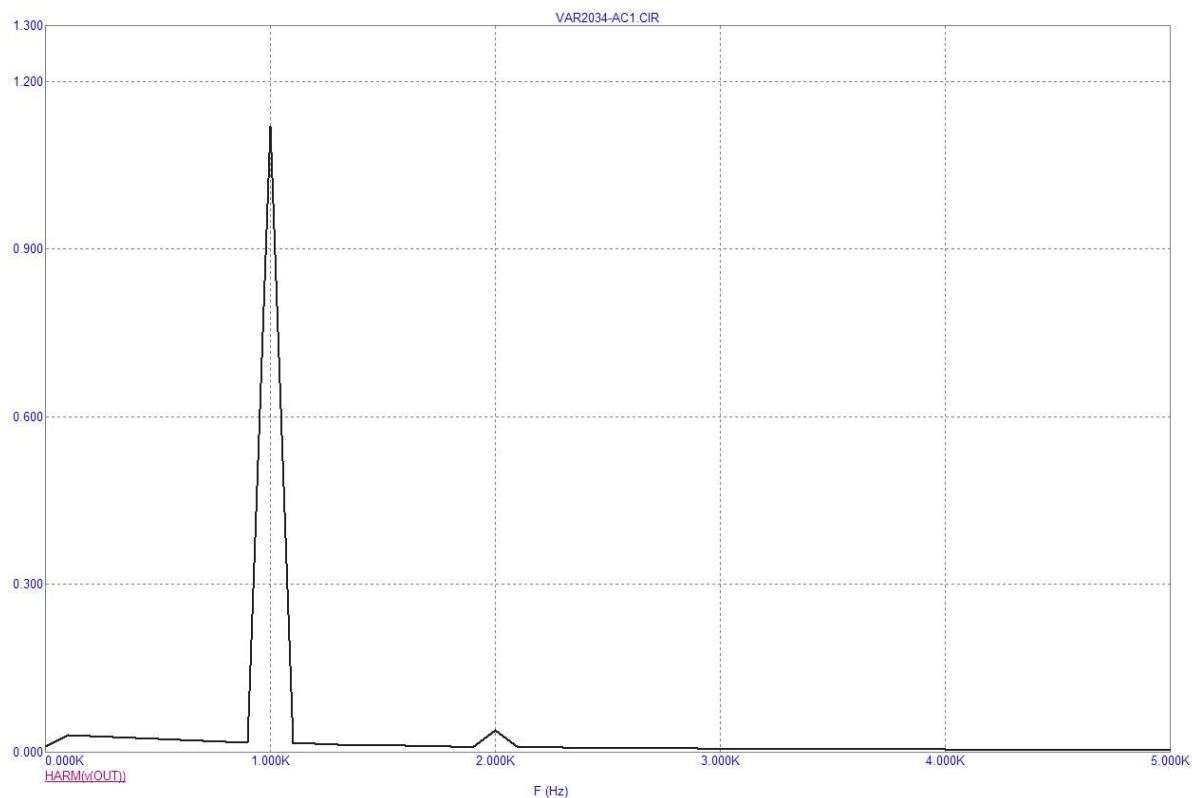
Увеличим амплитуду входного сигнала до 1 В.



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



Вид спектра сигнала:



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

$\text{HARM} := \text{READPRN}("C:\MC9\DATA\VAR2034-AC1.TNO")$

	0	1
36	$3.6 \cdot 10^3$	$5 \cdot 10^{-3}$
37	$3.7 \cdot 10^3$	$5 \cdot 10^{-3}$
38	$3.8 \cdot 10^3$	$5 \cdot 10^{-3}$
39	$3.9 \cdot 10^3$	$4 \cdot 10^{-3}$
40	$4 \cdot 10^3$	$4 \cdot 10^{-3}$
41	$4.1 \cdot 10^3$	$4 \cdot 10^{-3}$
42	$4.2 \cdot 10^3$	$4 \cdot 10^{-3}$
43	$4.3 \cdot 10^3$	$4 \cdot 10^{-3}$
44	$4.4 \cdot 10^3$	$4 \cdot 10^{-3}$
45	$4.5 \cdot 10^3$	$4 \cdot 10^{-3}$
46	$4.6 \cdot 10^3$	$4 \cdot 10^{-3}$
47	$4.7 \cdot 10^3$	$4 \cdot 10^{-3}$
48	$4.8 \cdot 10^3$	$4 \cdot 10^{-3}$
49	$4.9 \cdot 10^3$	$4 \cdot 10^{-3}$
50	$5 \cdot 10^3$	$3 \cdot 10^{-3}$
51	$5.1 \cdot 10^3$...

$i := 1..5$

$F_i :=$	$U_i :=$
1000	1.119
2000	0.039
3000	0.005
4000	0.004
5000	0.003

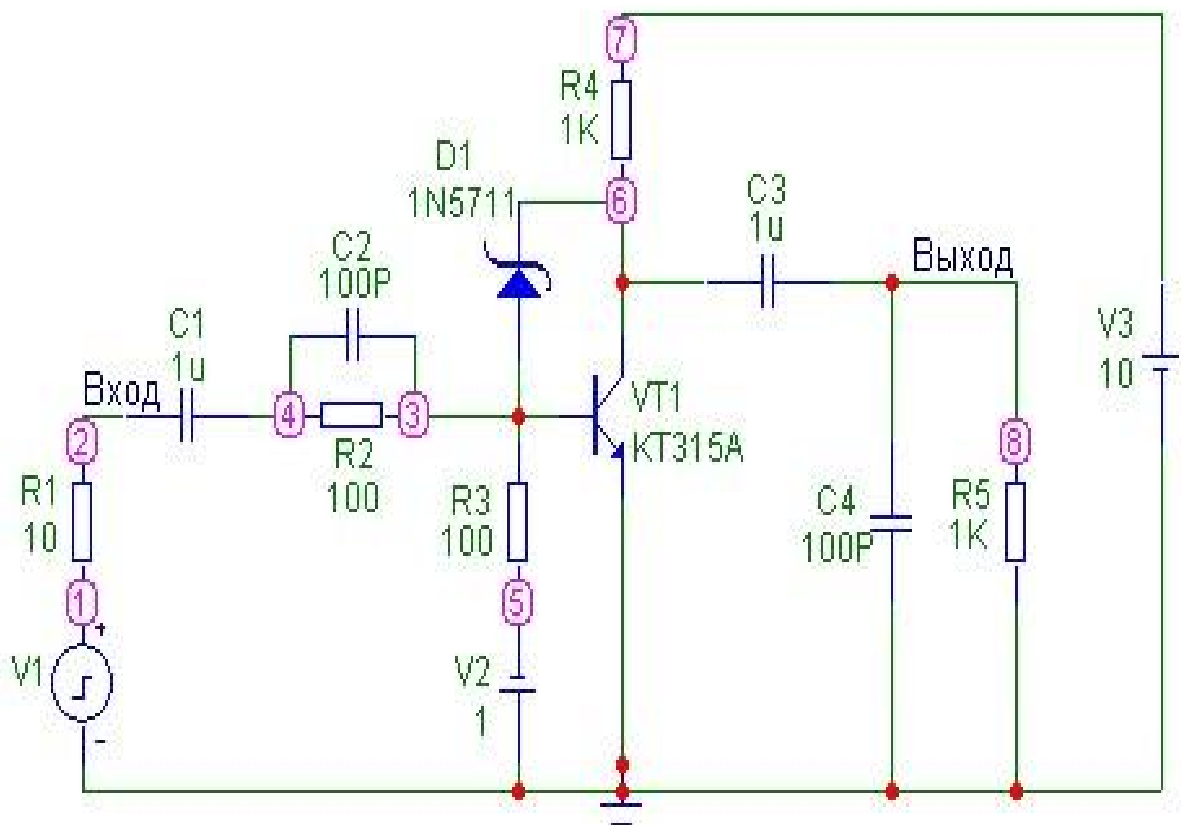
$$K_{\text{нл}} := \frac{\sqrt{\sum_{i=2}^5 (U_i)^2}}{U_1} = 0.035$$

Таким образом, коэффициент нелинейных искажений составил 3.5%.

3. Исследование ключа на биполярном транзисторе с нелинейной обратной связью

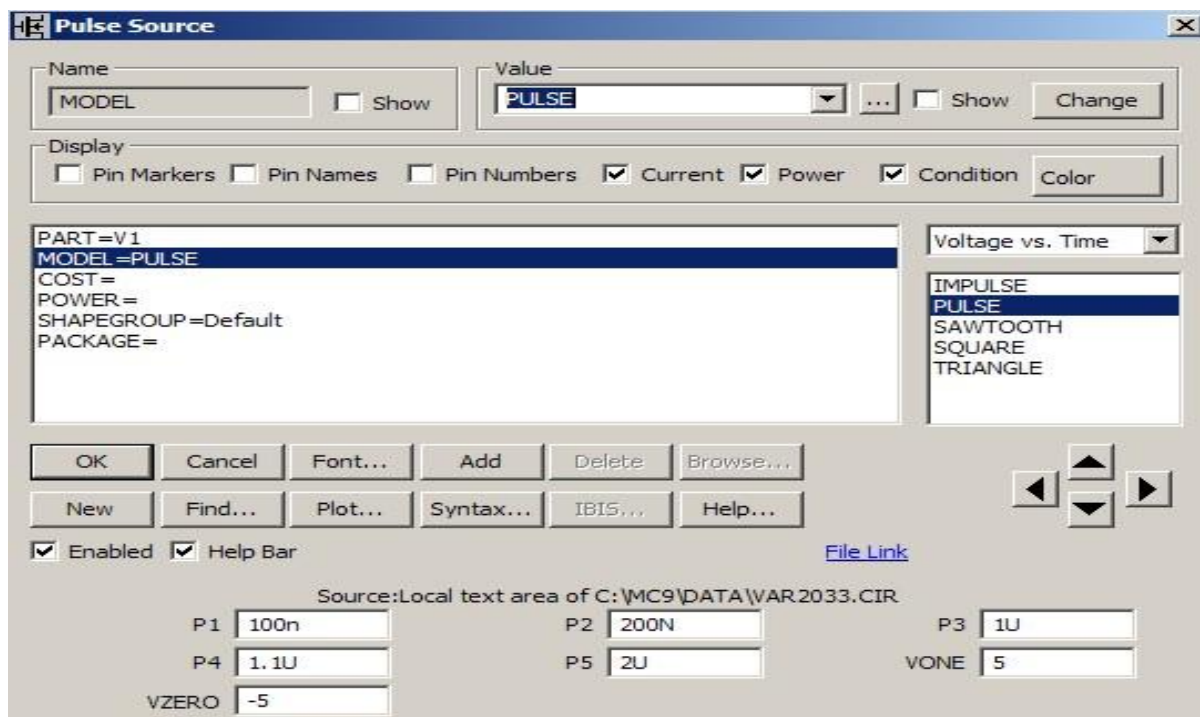
Создание принципиальной схемы ключа на биполярном транзисторе с нелинейной обратной связью.

Ключ с нелинейной обратной связью



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

Окно задания параметров импульсного генератора.

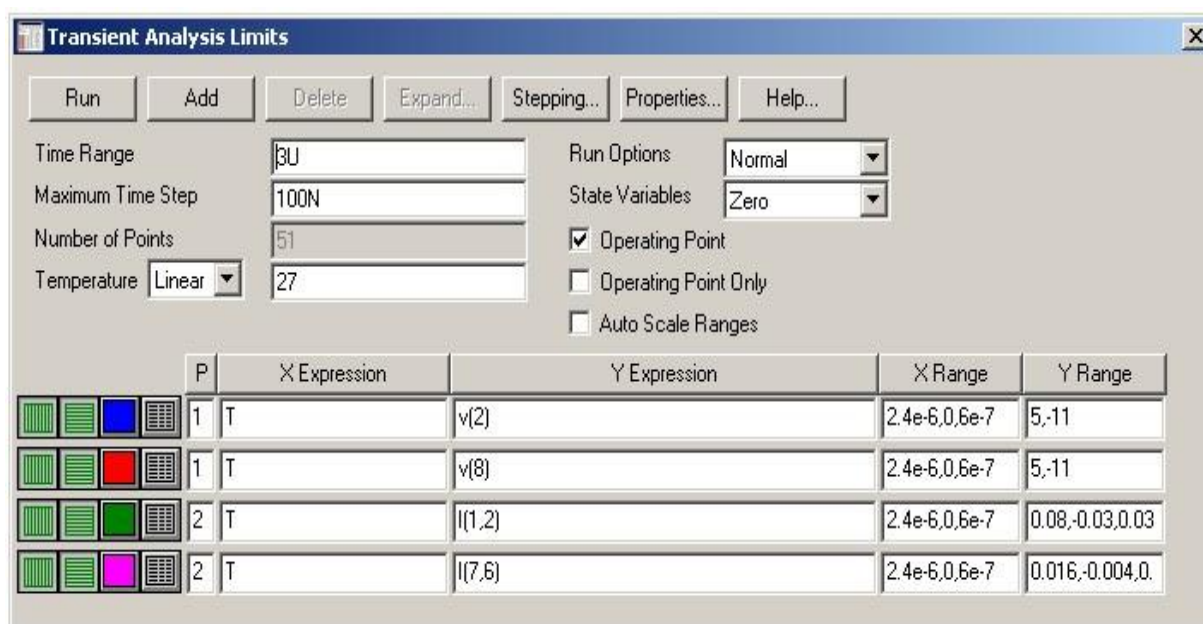


The **Pulse Source** dialog box is used to configure a pulse generator. It includes fields for Name (MODEL), Value (PULSE), and various display options like Pin Markers, Pin Names, Pin Numbers, Current, Power, and Condition. A list of pulse shapes (IMPULSE, PULSE, SAWTOOTH, SQUARE, TRIANGLE) is available for selection. The bottom section contains input fields for parameters P1 through P5 and VZERO, along with a Source field and a File Link.

Source: Local text area of C:\MC9\DATA\VAR.2033.CIR

P1	100n	P2	200N	P3	1U
P4	1.1U	P5	2U	VONE	5
VZERO	-5				

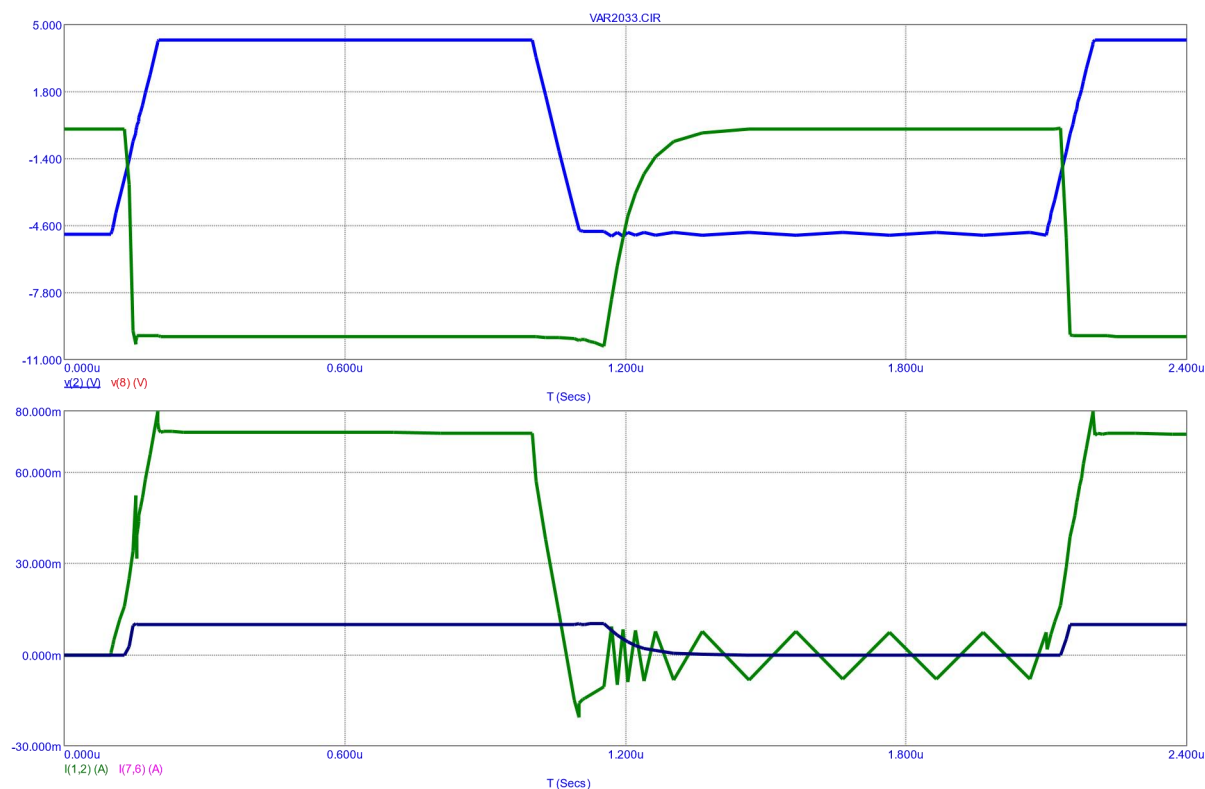
Окно задания параметров для проведения анализа.



The **Transient Analysis Limits** dialog box is used to set up transient analysis parameters. It includes buttons for Run, Add, Delete, Expand..., Stepping..., Properties..., and Help... The main section contains fields for Time Range, Maximum Time Step, Number of Points, and Temperature. The Run Options section includes checkboxes for Operating Point, Operating Point Only, and Auto Scale Ranges. A table at the bottom lists the analysis results for different components.

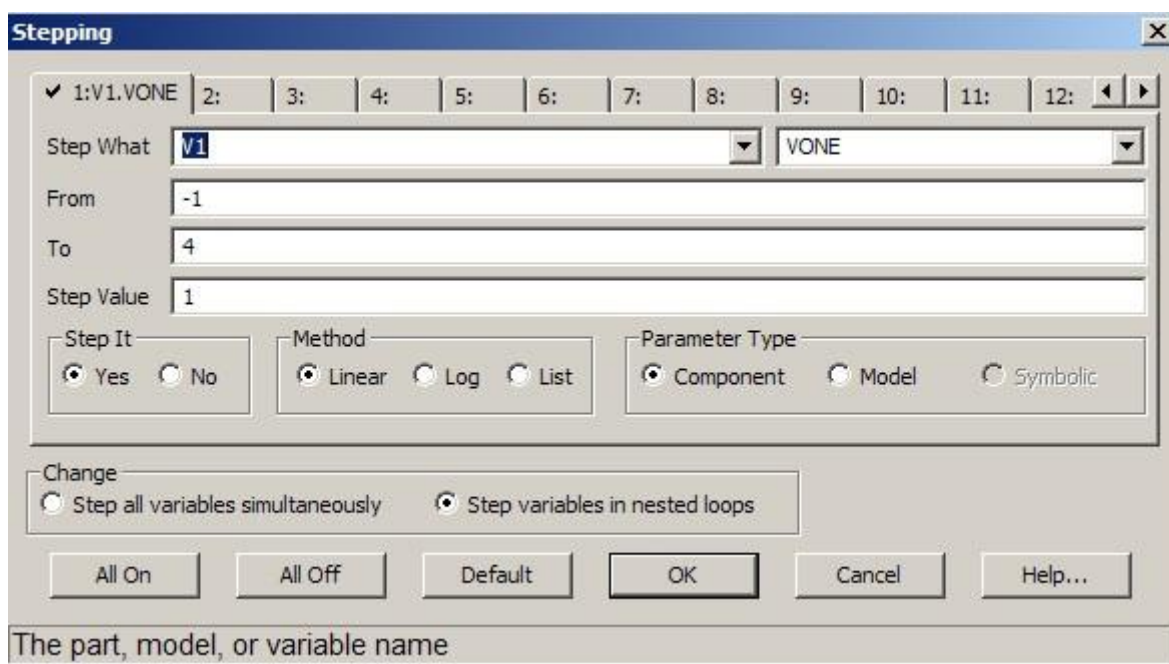
	P	X Expression	Y Expression	X Range	Y Range
	1	T	v(2)	2.4e-6,0.6e-7	5,-11
	1	T	v(8)	2.4e-6,0.6e-7	5,-11
	2	T	I(1.2)	2.4e-6,0.6e-7	0.08,-0.03,0.03
	2	T	I(7.6)	2.4e-6,0.6e-7	0.016,-0.004,0.

Результаты проведения анализа – временные диаграммы.

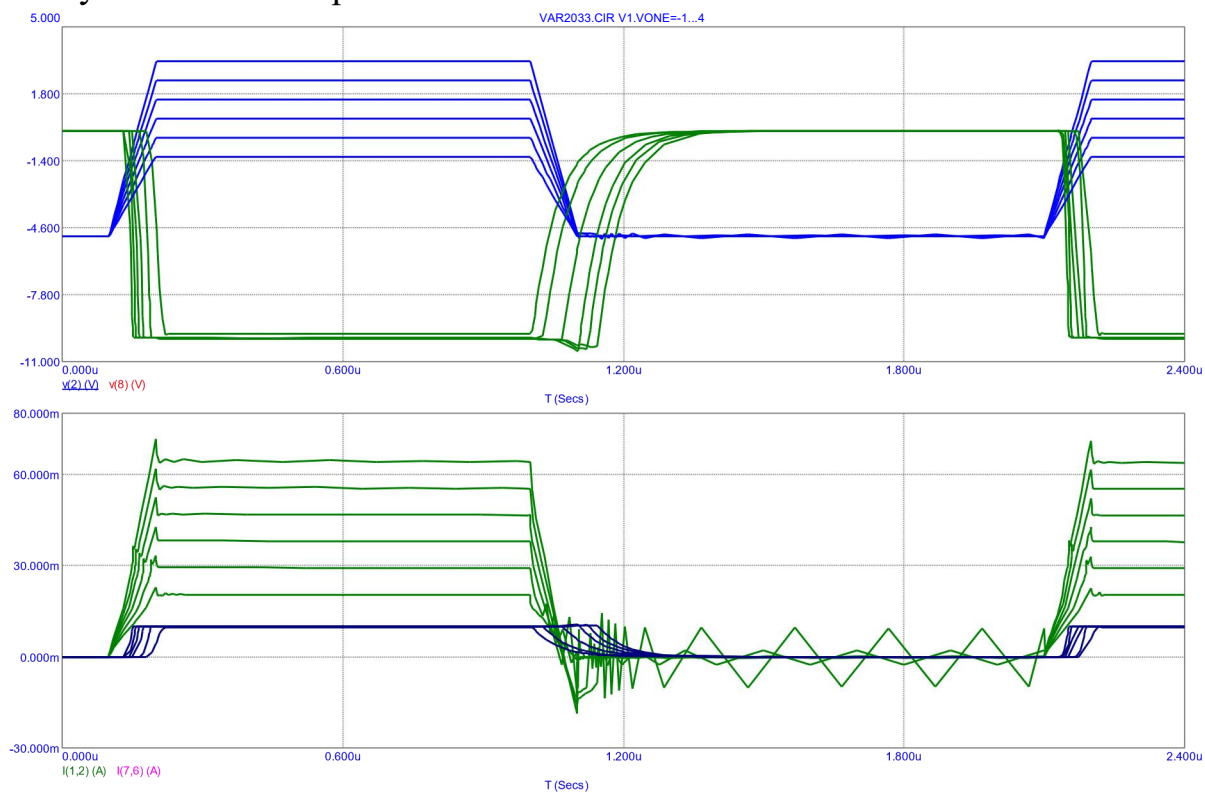


3.2. Многовариантный анализ.

Окно задания многовариантного анализа для исследования изменения амплитуды входного сигнала на амплитуды входного и выходного токов.



Результат многовариантного анализа.



Далее определяется коэффициент насыщения:

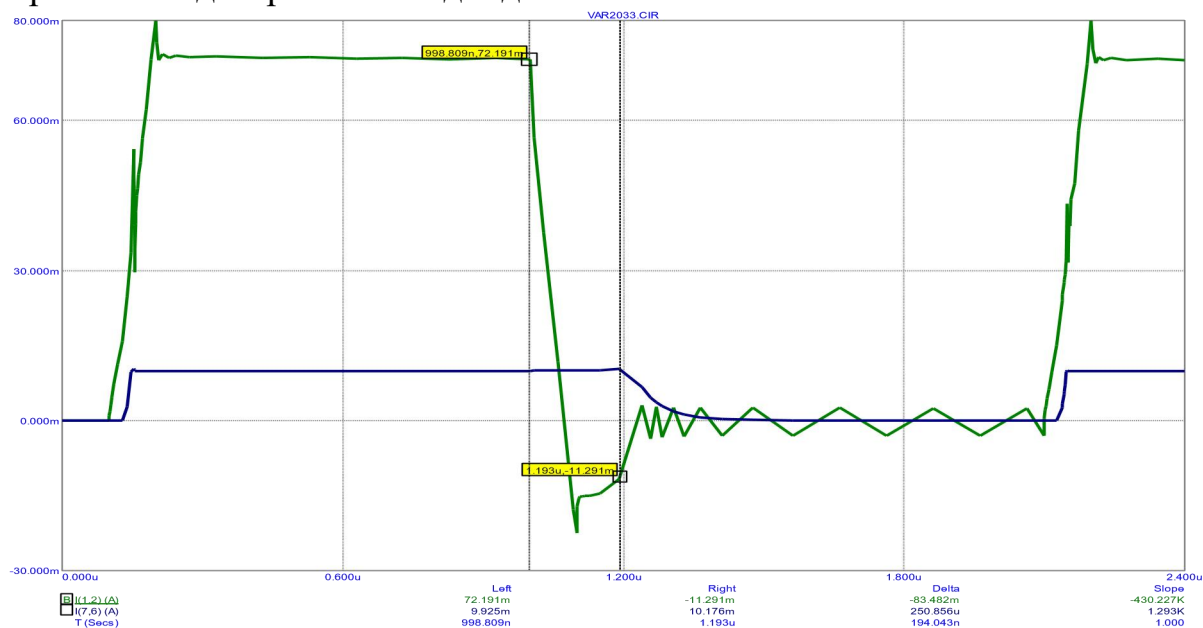
$$K_{\text{нас}} = I_{\text{Бнас}} / I_{\text{Бгр}},$$

где $I_{\text{Бнас}}$ - ток насыщения базы, $I_{\text{Бгр}}$ -

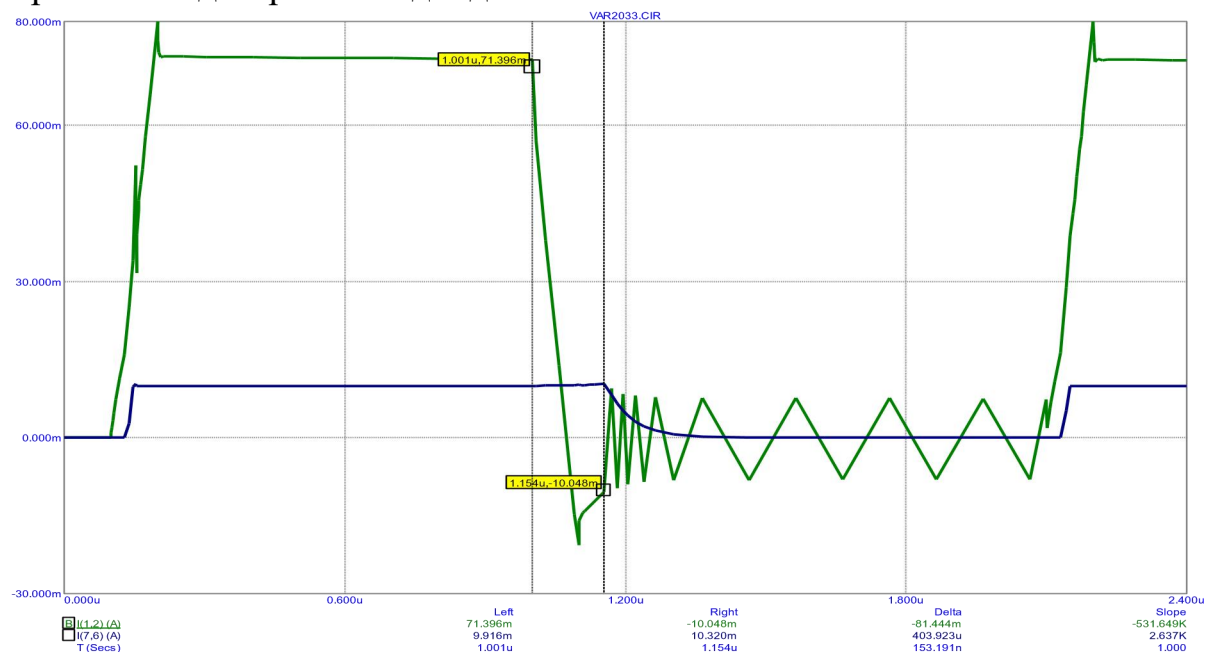
граничное значение тока базы.

3.3. Влияние диода Шоттки.

Временные диаграммы без диода Шоттки.



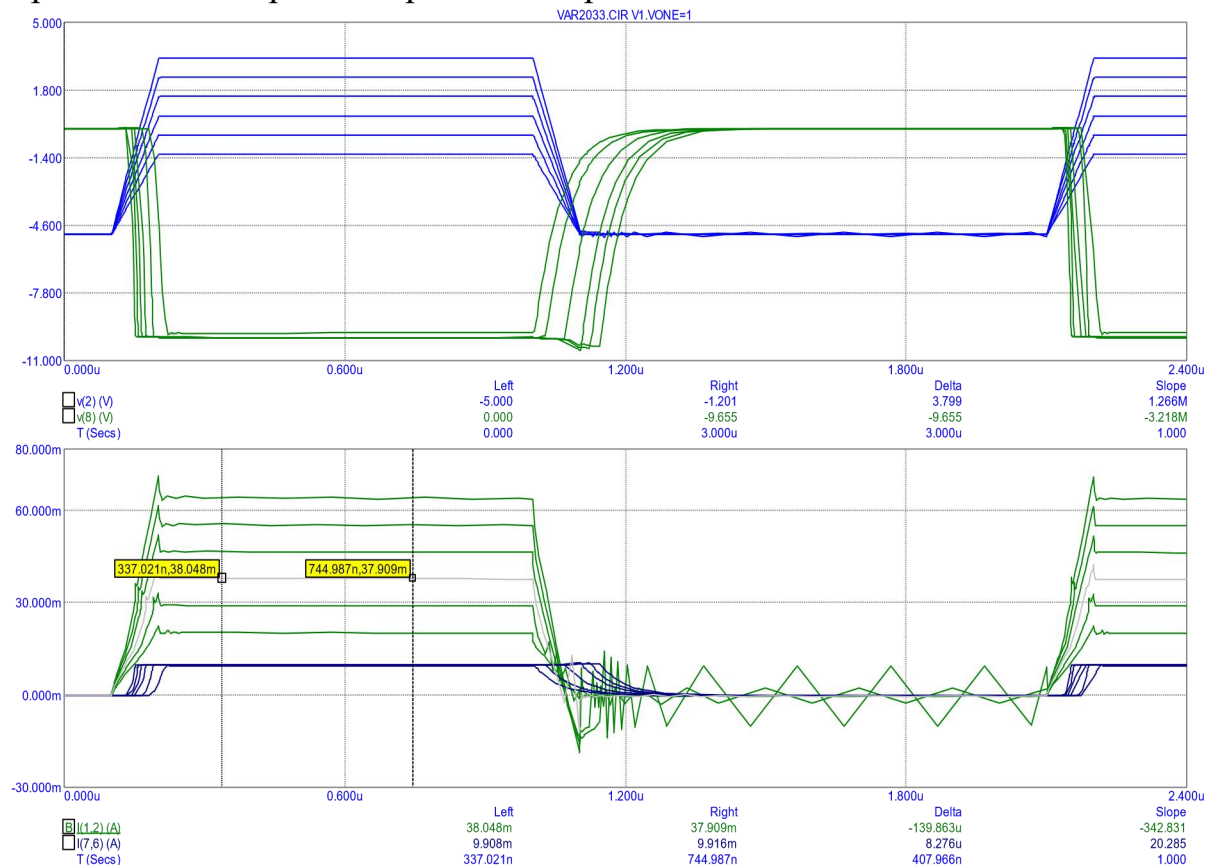
Временные диаграммы с диодом Шоттки.



Из временных диаграмм видно, что время рассасывания неосновных носителей без диода $\tau_{\text{рас}} = 194$ нс, а при наличии диода $\tau_{\text{рас}} = 153$ нс (см. Delta). Таким образом, быстродействие увеличивается на 41 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 $V = 4 \text{ В}$, при этом ток базы $I_b = I_{bgr} = 0.02 \text{ А}$.

При $V = 5 \text{ В}$ $I_b = 0.030 \text{ А}$;
 $V = 5.7 \text{ В}$ $I_b = 0.038 \text{ А}$;
 $V = 6.5 \text{ В}$ $I_b = 0.047 \text{ А}$;
 $V = 7.5 \text{ В}$ $I_b = 0.055 \text{ А}$;
 $V = 8.4 \text{ В}$ $I_b = 0.065 \text{ А}$.

Тогда коэффициент насыщения тока базы $K_{нас} = I_{бнас} / I_{бгр}$.

$K_{нас} (\text{при } V = 5 \text{ В}) = 0.030 / 0.02 = 1.5$;

$K_{нас} (\text{при } V = 5.7 \text{ В}) = 0.038 / 0.02 = 1.9$;

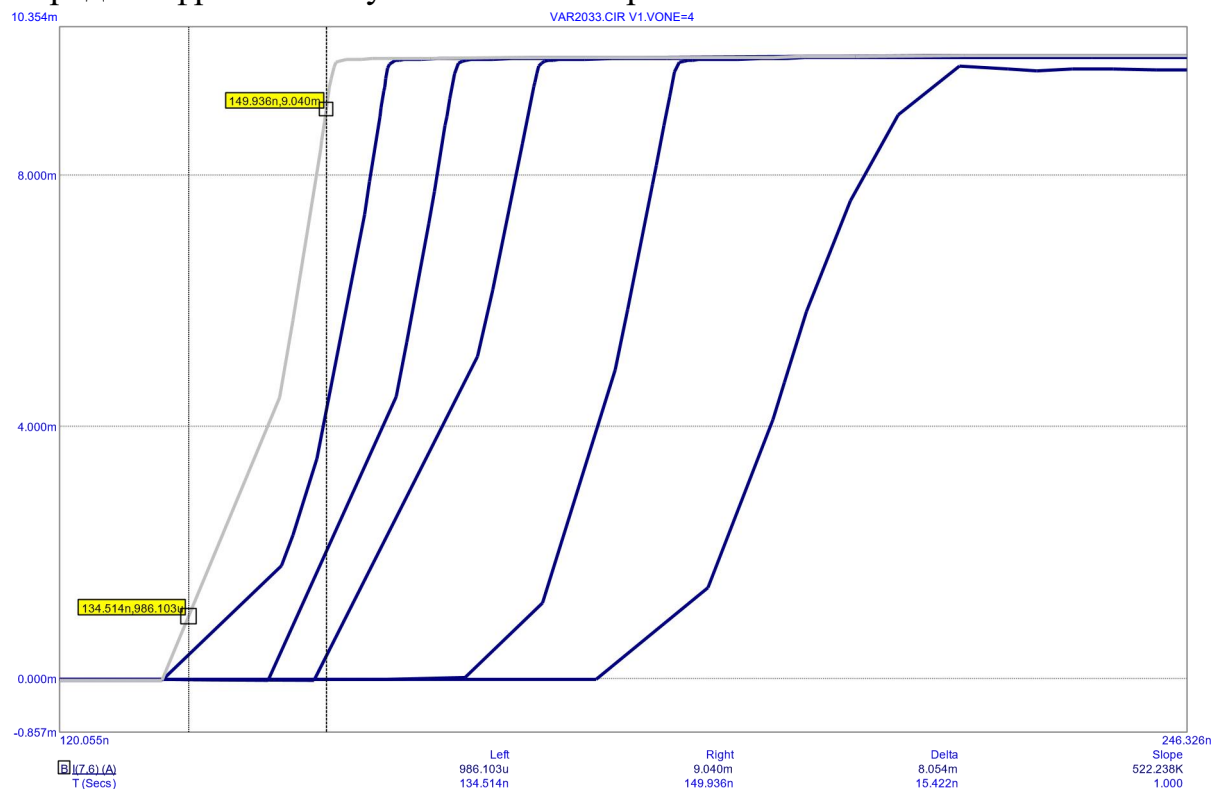
$K_{нас} (\text{при } V = 6.5 \text{ В}) = 0.047 / 0.02 = 2.35$.

$K_{нас} (\text{при } V = 7.5 \text{ В}) = 0.055 / 0.02 = 2.75$.

$K_{нас} (\text{при } V = 8.4 \text{ В}) = 0.065 / 0.02 = 3.25$.

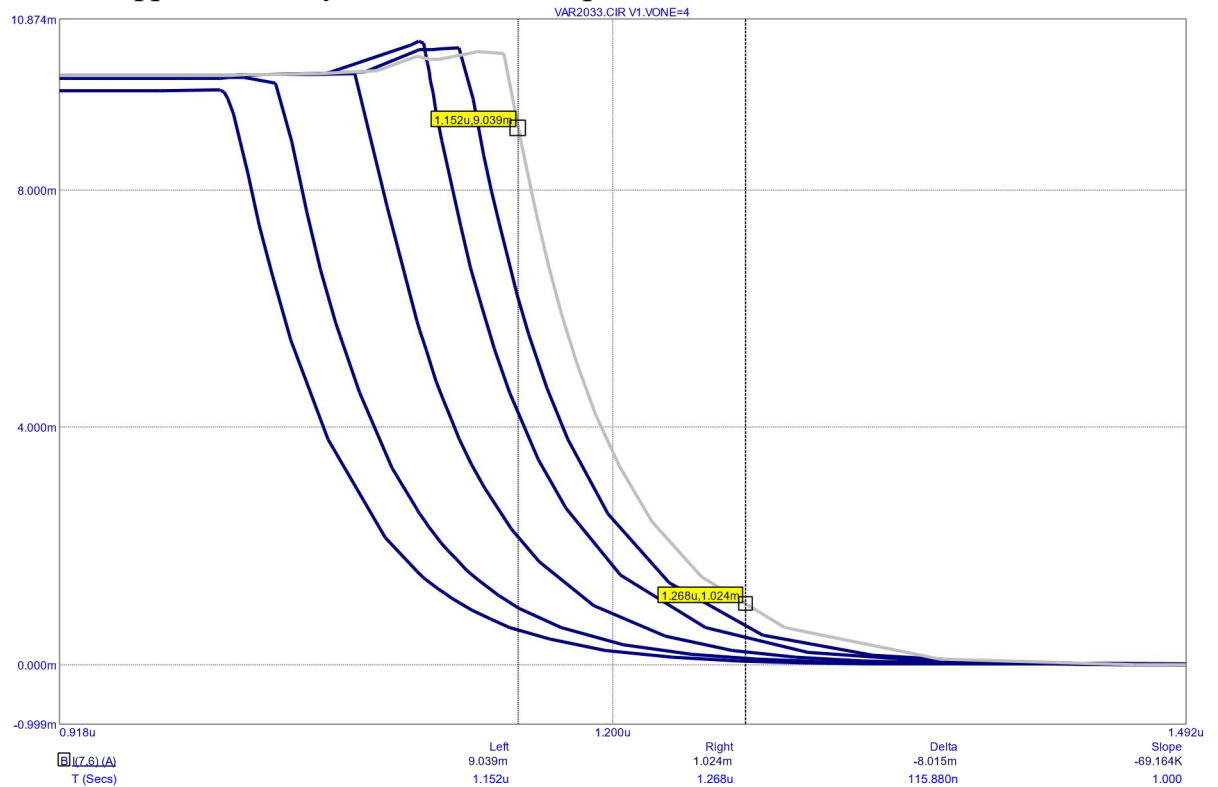
3.5. Определение длительности фронта.

Передние фронты импульсов коллекторного тока.



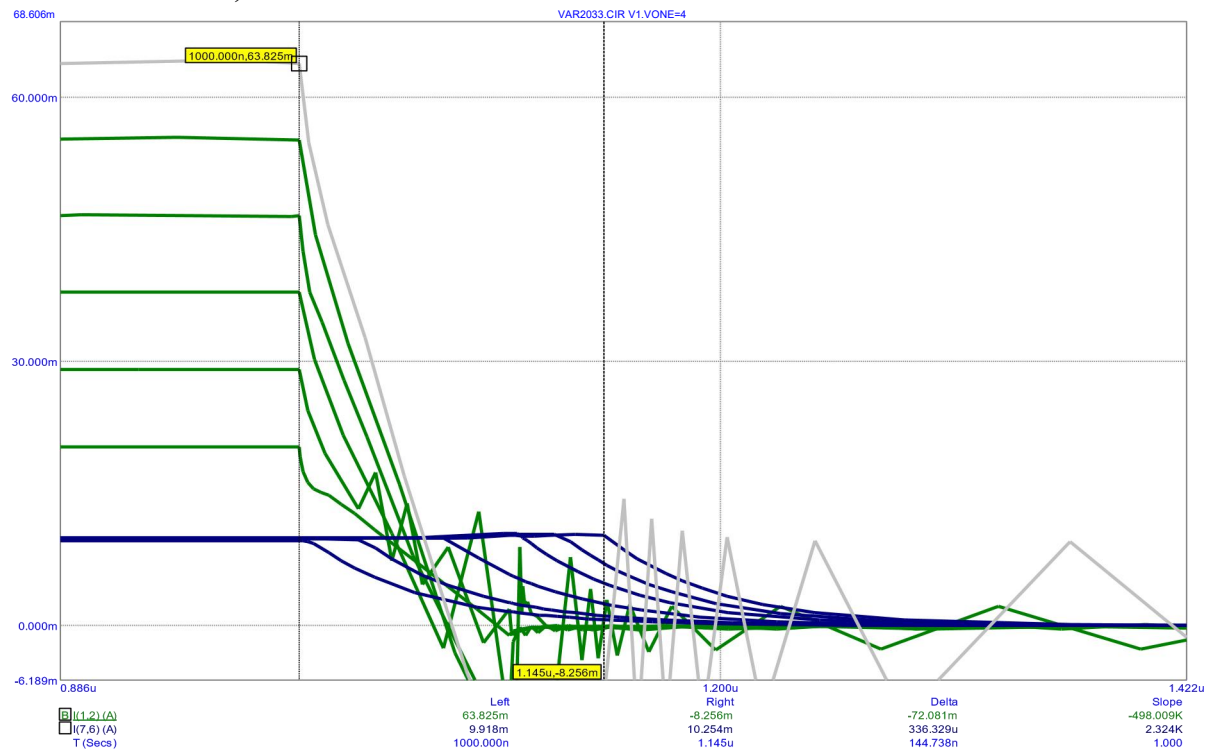
3.6. Определение длительности среза.

Задние фронты импульсов коллекторного тока.



3.7. Определение времени рассасывания

Определение времени рассасывания неосновных носителей в базе (по 0,5 U_m для УБ - Ik).



3.8. Построение графиков.

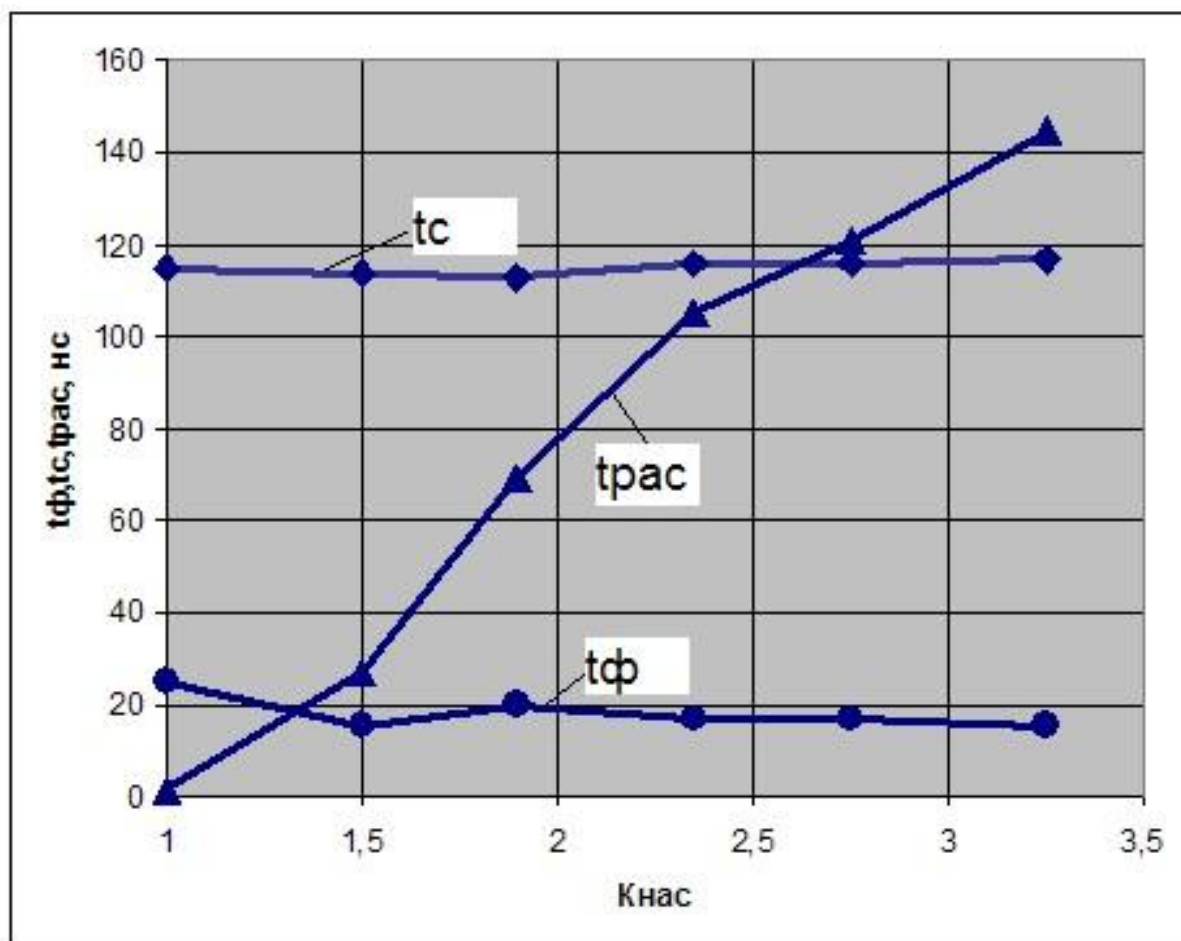
По полученным результатам можно составить следующую таблицу.

К _{нас}	t _ф , мкс (по 0.1 и 0.9)	t _с , мкс (по 0.1 и 0.9)	t _{рас} , мкс (по началу спада I _Б и I _К)
1	25 нс	115 нс	1.3 нс
1.5	15 нс	114 нс	27 нс
1.9	20 нс	113 нс	69 нс
2.35	17 нс	116 нс	105 нс
2.75	17 нс	116 нс	121 нс
3.25	15 нс	117 нс	145 нс

Далее составляем промежуточную таблицу (для Excel).

1	25	115	1,3
1,5	15	114	27
1,9	20	113	69
2,35	17	116	105
2,75	17	116	121
3,25	15	117	145

На основании полученных временных диаграмм строятся графики зависимостей t_ф, t_с и t_{рас} от коэффициента насыщения для тока коллектора, где t_ф – длительность фронта, t_с – длительность среза и t_{рас} – время рассасывания неосновных носителей в базе.



Выводы: 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 использованных источников

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.
2. Разевиг В.Д. Схемотехническое моделирование с помощью MicroCap 7.-М.: Горячая линия – Телеком,2003.-368 с.,ил.
3. Прянишников В.А. Электроника. Курс лекций. С-П: «КОРОНА принт», 1998 г.
4. Степаненко И.П. Основы теории транзисторов и транзисторных схем. М: «Энергия», 1977 г.