

Министерство науки и высшего образования Российской Федерации
ФЕДЕРАЛЬНОЕ ГОСУДАРСТВЕННОЕ БЮДЖЕТНОЕ
ОБРАЗОВАТЕЛЬНОЕ УЧРЕЖДЕНИЕ ВЫСШЕГО ОБРАЗОВАНИЯ
НАЦИОНАЛЬНЫЙ ИССЛЕДОВАТЕЛЬСКИЙ УНИВЕРСИТЕТ «МЭИ»

Институт Радиотехники и электроники им. В.А. Котельникова

Кафедра Формирования и обработки радиосигналов

РАСЧЕТНОЕ ЗАДАНИЕ

по дисциплине

«Схемотехника аналоговых электронных узлов»

**Индивидуальное расчетное задание и
методические указания по выполнению**

Москва, 2024

I. ЗАДАНИЕ

Цель выполнения расчетного задания углубление представлений о процессах, протекающих в усилительных схемах на биполярных и полевых транзисторах, методах расчета, компьютерного моделирования и анализа схем на транзисторах в статическом режиме, в частотной и временной области, получения навыков составления отчетной документации по отдельным стадиям схемотехнического проектирования.

В процессе выполнения расчетного задания (РЗ) студентам предлагается выполнить расчет двухкаскадной схемы усилителя и провести компьютерное моделирование с использованием программного пакета MicroCAP. Получить выходные параметры и характеристики схемы проведением пяти видов анализа разработанной схемы усилителя:

- Анализ по постоянному току (Dynamic DC- Dynamic Direct Current);
- Анализ в частотной области (по переменному току, AC – alternating current);
- Анализ во временной области (анализ переходных процессов, Transient).
- *Анализ шумовых свойств усилителя (AC – NOISE)
- *Анализ динамического диапазона и нелинейных искажений усилителя (Harmonic Distortion).

Параметры индивидуального задания для каждого студента в таблице 1 (Выдается преподавателем) (Приложение 2).

Общее задание и технические требования для проектирования

Выполнить схемотехническое проектирование схемы широкополосного усилителя с исходными данными Индивидуального задания.

1. Заданный коэффициент усиления K_0 с допустимыми отклонениями $\pm 10\%$ должен обеспечиваться в диапазоне температур окружающей среды от минус 40°C до $+60^\circ\text{C}$.
2. Потребляемая усилителем мощность определяется в статическом режиме работы (по постоянному току без входного сигнала) при нормальной температуре 27°C .
3. Выходное сопротивление генератора входного сигнала принять равным $R_{\Gamma}=50\text{ Ом}$.
4. Выходные параметры усилителя:
 - коэффициент усиления K_0 ,
 - нижняя граничная частота f_n по уровню АЧХ $0,707K_0$;
 - верхняя граничная частота f_v по уровню АЧХ $0,707K_0$;определяются расчетным путем и по результатам моделирования.

5. Дополнительные выходные параметры усилителя:

- нестабильность коэффициента усиления $\delta K_0 [\pm\%]$ в диапазоне температур;
- *уровень собственных шумов усилителя на выходе $U_{ш\text{ вых}}$ и уровень шумов приведенный ко входу $U_{ш\text{ вх}}$;
- параметры переходной характеристики: время нарастания фронта τ_f и спада $\Delta [\%]$ для прямоугольного импульса длительностью 30 мкс амплитудой 1 мВ ;
- *суммарный коэффициент нелинейных искажений при входном сигнале частотой 10 кГц с амплитудами 1 мВ (КНИ вх. 1 мВ) и $1\text{ В}/K_0$ (КНИ вых. 1 В);

- *максимальный уровень входного сигнала $U_{\text{вх макс}}$, при котором уровень нелинейных искажений выходного сигнала достигает 10%, $U_{\text{вых макс}}$ Динамический диапазон сигналов широкополосного усилителя $D_{\text{дб}}$, -

определяются по результатам моделирования схемы, курсорных измерений и их анализа.

Элементы принципиальной схемы усилителя

Транзисторы:

- отечественные биполярные NPN и PNP со SPICE-моделями приведенными в Приложении 2, название модели приведено в таблице индивидуального задания.

- отечественные полевые транзисторы с управляющим p-n переходом n-канальные и p-канальные.

Библиотека Spice-моделей транзисторов в Приложении 1.

Резисторы:

Номинальные значения отдельных сопротивлений резисторов схемы должны находиться в пределах от 1,0 Ом (10^0 Ом) до 10 МОм (10^7 Ом) и выбираться из ряда E24 (в обоснованных случаях допустимо использовать точные резисторы из ряда E96).

Номиналы резисторов R ряд E24 (x1, x10, x100); (Ом, кОм, МОм)			
1,0	1,1	1,2	1,3
1,5	1,6	1,8	2,0
2,2	2,4	2,7	3,0
3,3	3,6	3,9	4,3
4,7	5,1	5,6	6,2
6,8	7,5	8,2	9,1

Конденсаторы

Номинальные значения отдельных емкостей конденсаторов схемы должны находиться в пределах от 100 пФ ($100 \cdot 10^{-12}$ Ф) до 1000 мкФ ($1000 \cdot 10^{-6}$ Ф) и выбираться из ряда E6.

Номиналы конденсаторов ряд E6 (x1, x10, x100); (пФ, нФ, мкФ)			
1,0			
1,5			
2,2			
3,3			
4,7			
6,8			

II. МЕТОДИЧЕСКИЕ УКАЗАНИЯ

Выполнение РЗ следует проводить с учетом уже освоенного материала в следующей последовательности:

1. Разработка принципиальной схемы

1.1 Составить схему усилителя из базовых каскадов

- для гальванической развязки каскады между собой, источником сигнала и нагрузкой могут соединяться через разделительные конденсаторы;
- по допустимой потребляемой мощности усилителя $R_{пот}$ (Табл Инд.Задания) определить максимальный ток источника;
- задать (распределить) начальные значения токов транзисторов в каскадах, не превышающие в сумме максимальный ток источника, сохраняя запас для токов базовых делителей;

ВАЖНО: распределение токов между каскадами выполнить в соответствии с выходными характеристиками и свойствами базовых схем ОЭ, ОК, ОБ для достижения максимального значения усиления схемы по напряжению (K_u).

1.2 Выполнить расчет каскадов по постоянному току используя значения параметров Spice-модели заданного транзистора (Приложение 1).

При расчетах постоянное напряжение база-эмиттер $U_{0БЭ} \approx 0,65$ В (или измерения параметров по модели транзистора в МС в режиме DDC, параметры схемы в рабочей точке выводятся нажатием функциональной клавиши F5, просмотр файла с расширением DDNO).

При выполнении расчета следует использовать следующие значения параметров **биполярных транзисторов** схемы ОЭ:

- коэффициент передачи по току $\beta = \text{BETAAC}$;
- входная емкость $C_{11} = \text{CPI}$;
- выходная емкость $C_{22} = \text{CMU}$;
- крутизна $S = \text{GM}$;
- входная проводимость $g_{11} = \frac{1}{\text{RPI}}$;
- сопротивление базы $r_6 = \text{RX}$;
- выходная проводимость $g_{22} = \frac{1}{\text{RO}}$;
- граничная частота передачи тока ($\beta=1$) $F_{zp} = \text{FT}$.

Частоту среза по крутизне можно определить по формуле

$$\omega_s = \frac{2\pi F_{zp}}{S \cdot r_6} = \frac{2\pi \cdot \text{FT}}{\text{GM} \cdot \text{RX}}.$$

Ориентировочно сопротивление рекомбинации r_β и крутизна S связаны с значением постоянного тока коллектора $I_{0К}$, коэффициентом передачи тока β и теплового потенциала φ_T следующими соотношениями:

$$S = I_{0К} / \varphi_T; \varphi_T = 25,7 \text{ мВ при температуре } 27^\circ\text{C},$$

$$r_\beta = \beta / S,$$

при этих расчетах можно использовать следующие параметры модели биполярного транзистора:

- Коэффициент усиления по току в схеме ОЭ: $H_{21.ОЭ} = \beta = \text{BF}$ (модели транзистора)
- Выходная проводимость $g_{22} = 1 / r_{кэ} = 0,05 \text{ мСм}$.
- Объемное сопротивление базы $r_\beta = \text{Rb}$ (модели транзистора) Ом.
- Постоянная времени крутизны $\tau_s = \text{Tf}$ (модели транзистора) сек.
- Емкость коллекторного перехода $C_k = \text{Cjc}$ (модели транзистора) Ф.
- Емкость перехода база-эмиттер $C_3 = \text{Cje}$ (модели транзистора) Ф.

При выполнении расчета следует использовать следующие значения параметров **полевых транзисторов**:

- напряжение отсечки $U_{отс} = V_{to}$ (модели транзистора) В
- коэффициент модуляции длины канала $\lambda = \text{Lambda}$ (модели транзистора)
- коэффициент пропорциональности $\beta = \text{Beta}$ (модели транзистора)
- сопротивление истока $r_i = R_s$ (модели транзистора)
- сопротивление стока $r_c = R_d$ (модели транзистора)
- емкость затвор-исток $C_{зи} = C_{gs}$ (модели транзистора)
- емкость затвор-сток $C_{зс} = C_{gd}$ (модели транзистора)

1.3 Рассчитать сопротивления резисторов схемы, которые обеспечивают рабочие точки каскадов для достижения максимально возможного размаха выходного напряжения.

ВАЖНО: НАДО СТРЕМИТЬСЯ ПОЛУЧИТЬ ЗНАЧЕНИЕ K_u БОЛЬШЕ ЗАДАННОГО, И ПОТОМ (см.п.2.8) ИСПОЛЬЗОВАТЬ ИЗБЫТОК УСИЛЕНИЯ ДЛЯ СТАБИЛИЗАЦИИ ВЫХОДНЫХ ПАРАМЕТРОВ ВВЕДЕНИЕМ ОТРИЦАТЕЛЬНОЙ ОБРАТНОЙ СВЯЗИ.

1.4 Ввести схему усилителя в программу MicroCap и провести моделирование в режиме Dinamic DC, убедиться в правильности расчета сопротивлений по токам и напряжениям в узлах, потребляемой мощности источника питания.

Скорректировать значения сопротивлений резисторов до номиналов ряда E24. Проверить отклонения заданных токов и напряжений в узлах.

2. Расчет каскадов в области средних частот

Провести аналитический расчет параметров усилителя и сравнение с результатами моделирования в МС.

2.1 Составить эквивалентные схемы каскадов для области средних частот.

2.2 Составить графы проводимости и сигнальные графы схемы для области средних частот.

2.3 Рассчитать с помощью графов входное и выходное сопротивление каскадов ($R_{вх}$, $R_{вых}$), значения коэффициента усиления каскадов по напряжению и схемы усилителя в целом – от генератора до нагрузки.

2.4. Рассчитать емкости вспомогательных конденсаторов, обеспечивающие требуемое значение нижней граничной частоты усилителя в целом.

2.5 Дополнить схему модели в МС рассчитанными конденсаторами из ряда Е6.

2.6 Провести моделирование схемы в частотной области (АС, DAC)). Построить графики АЧХ и ФЧХ схемы. Выполнить по графикам измерение выходные параметры K_u , f_n и f_v . Определить выполнение требований ТЗ, при необходимости скорректировать номиналы или дополнить схему для обеспечения выполнения требований.

Примечание: Рекомендуются на начальном этапе проектирования стремиться к достижению максимального коэффициента усиления $K_u \gg K_0$ и, введением отрицательной обратной связи в схему, получить требуемое значение K_0 . В обоснованных случаях допустимо введение дополнительного (развязывающего) каскада и (или) некоторое увеличение потребляемой мощности.

2.7. Провести моделирование АЧХ в диапазоне температур минус 40°C +60°C.

Определить максимальное и минимальное значение K_0 и относительное отклонение δK_0 %.

Если δK_0 превышает 10% принять меры для улучшения температурной стабилизации.

2.8. Использовать местные или общие отрицательные обратные связи (ООС) для снижения коэффициента усиления до требуемого. Провести моделирование и сравнить параметры до и после введения ООС. При достижении заданных требований

зафиксировать конечную принципиальную схему и перейти к следующим п.п. Если достичь не удастся, обратитесь за консультацией к преподавателю.

3. Провести анализ схемы во временной области (анализ переходных процессов, Transient).

Определить обоснованные параметры источника воздействия для моделирования и определения переходного процесса в усилителе.

Провести моделирование и получение переходного процесса. Измерить выходные параметры время нарастания фронта τ_f и спада Δ за время импульса в 30мкс.

4*. Провести анализ шумовых свойств усилителя (AC – NOISE)

Построить график зависимости спектральной плотности внутренних шумов усилителя от частоты $S_{ш}(F)=ONoise$ и зависимость среднеквадратического уровня шума на выходе от шумовой полосы от начальной частоты расчета до текущей частоты F

$$U_{ш\text{ вых}}(F) = \text{SQRT}(\text{SD}(\text{ONoise}^2)).$$

По графику спектральной плотности $S_{ш}(F)$ на средней частоте $F_{ср} = \sqrt{f_H \cdot f_B}$ определить курсорными измерениями значение $S_{ш}(F_{ср})$.

По графику спектральной плотности $U_{ш\text{ вых}}(F)$ на частоте f_B определить курсорными измерениями среднеквадратическое значение напряжения шума на выходе широкополосного усилителя $U_{ш\text{ вых}}(f_B)$ и значение напряжения шума приведенное ко входу усилителя

$$U_{ш\text{ вх}} = U_{ш\text{ вых}}(f_B) / K_o$$

Методики измерения шумов изложены в следующем пособии <https://disk.yandex.ru/i/ReiSiu6hR92GQQ>

5*. Анализ динамического диапазона и нелинейных искажений усилителя (Harmonic Distortion)

Нелинейные искажения широкополосного усилителя определяются в полосе рабочих частот на частоте 10 кГц на сопротивлении нагрузки. Предельный диапазон входных напряжений воздействий от 1мВ до $E_p/(2K_o)$. Верхний предел $U_{вх\text{ макс}}$ ограничить уровнем, при котором коэффициент нелинейных искажений КНИ =10% (по графику THD). Измерить напряжение $U_{вх\text{ макс}}$

Динамический диапазон усилителя определить как отношение $D_{дБ} = 20 \lg(U_{вх\text{ макс}} / U_{ш\text{ вых}})$

Методики измерения нелинейных искажений изложены в следующем пособии <https://disk.yandex.ru/i/g9WdUORWcaASfQ>

6. Оформление результатов РЗ

Пояснительная записка должна содержать:

- Титульный лист расчетного задания;
- Задание, технические требования, модели транзисторов;
- Исходную схему усилителя;
- Расчет элементов схемы;
- Принципиальную схему усилителя с позиционными обозначениями и типами компонентов и их номиналами, нумерацией узлов, значениями параметров источников;
- Результаты моделирования схемы по постоянному току Dinamic DC;

- Эквивалентную схему усилителя в области средних частот
- Графы проводимости и сигнальные графы усилителя
- Расчет значений параметров схемы в области средних частот **$R_{вх}$, $R_{вых}$, K_u** по графам
- Результаты моделирования по переменному току Dinamic AC на средней частоте, в частотной области АС. Измерение выходных параметров, сравнение и анализ результатов;
- Результаты моделирования во временной области.
- * результаты моделирования шумовых свойств, нелинейных искажений и динамических параметров разработанного усилителя.

Примечание:

* выполнения п.4 и п.5 (при своевременной сдаче повышают оценку за РЗ, для получения оценки «отлично» пункты являются обязательными.

III. ГРАФИК СДАЧИ НА ПРОВЕРКУ РАСЧЕТНОГО ЗАДАНИЯ

Срок сдачи РЗ на проверку преподавателю до конца 8 недели;
Исправления и завершение 9 неделя.

1. SPICE-МОДЕЛИ ОТЕЧЕСТВЕННЫХ БИПОЛЯРНЫХ ТРАНЗИСТОРОВ

**** 2T312 Family

*

```
.model q2T312a NPN(Is=4.943f Xti=3 Eg=1.11 Vaf=85 Bf=66.43 Ne=1.492
+ Ise=432.9f Ikf=.2951 Xtb=1.5 Br=.923 Nc=2 Isc=439f Ikr=.3 Rc=.65
+ Rb=14.3 Cjc=8.43p Mjc=.283 Vjc=.75 Fc=.5 Cje=18.57p Mje=.33
+ Vje=.75 Tr=137.5n Tf=1.221n Itf=50m Vtf=50 Xtf=2)
```

```
.model q2T312b NPN(Is=4.943f Xti=3 Eg=1.11 Vaf=85 Bf=74.91 Ne=1.87
+ Ise=6.197p Ikf=.6263 Xtb=1.5 Br=.923 Nc=2 Isc=439f Ikr=.3 Rc=.65
+ Rb=14.3 Cjc=8.06p Mjc=.3404 Vjc=.75 Fc=.5 Cje=18.57p Mje=.33
+ Vje=.75 Tr=164.6n Tf=790p Itf=50m Vtf=50 Xtf=2)
```

```
.model q2T312v NPN(Is=4.943f Xti=3 Eg=1.11 Vaf=85 Bf=119.7 Ne=1.579
+ Ise=295.1f Ikf=.5917 Xtb=1.5 Br=3.144 Nc=2 Isc=439f Ikr=.3 Rc=.65
+ Rb=14.3 Cjc=8.06p Mjc=.3404 Vjc=.75 Fc=.5 Cje=18.57p Mje=.33
+ Vje=.75 Tr=164.6n Tf=790p Itf=50m Vtf=50 Xtf=2)
```

*

**** 2T313 Family

*

```
.model q2T313a PNP(Is=3.306f Xti=3 Eg=1.11 Vaf=86.3 Bf=153.6 Ne=1.36
+ Ise=3.306f Ikf=2.47 Xtb=1.5 Var=40 Br=3.375 Nc=2 Isc=33.2f Ikr=.85
+ Rb=23.2 Rc=1.345 Cjc=18.71p Vjc=.69 Mjc=.31 Fc=.5 Cje=30.64p Vje=.69
+ Mje=.33 Tr=58.87n Tf=267.9p Itf=.785 Vtf=65 Xtf=2)
```

```
.model q2T313b PNP(Is=3.306f Xti=3 Eg=1.11 Vaf=86.3 Bf=153.6 Ne=1.36
+ Ise=3.306f Ikf=2.47 Xtb=1.5 Var=40 Br=3.375 Nc=2 Isc=33.2f Ikr=.85
+ Rb=23.2 Rc=1.345 Cjc=18.71p Vjc=.69 Mjc=.31 Fc=.5 Cje=30.64p Vje=.69
+ Mje=.33 Tr=58.87n Tf=267.9p Itf=.785 Vtf=65 Xtf=2)
```

*

**** KT315 Family

*

```
.model KT315a NPN(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)
```

```
.model KT315b NPN(Is=14.34f Xti=3 Eg=1.11 Vaf=125 Bf=210.6 Ise=157.3f
+ Ne=1.558 Ikf=.2999 Nk=.5082 Xtb=1.5 Br=1 Isc=15.86f Nc=1.022
+ Ikr=3.163 Rb=15 Rc=3.748 Cjc=8.988p Mjc=.33 Vjc=.75 Fc=.5 Cje=18.5p
+ Mje=.33 Vje=.75 Tr=301.4n Tf=321.4p Itf=1 Xtf=2 Vtf=60)
```

```
.model KT315v NPN(Is=21.11f Xti=3 Eg=1.11 Vaf=157 Bf=81.09 Ise=321.2f
+ Ne=1.458 Ikf=.2017 Nk=.4901 Xtb=1.5 Br=1 Isc=84.36f Nc=1.317
+ Ikr=1.671 Rb=12 Rc=1.426 Cjc=9.716p Mjc=.33 Vjc=.75 Fc=.5 Cje=18.5p
+ Mje=.33 Vje=.75 Tr=275.6n Tf=321.4p Itf=1 Xtf=2 Vtf=60)
```

```
.model KT315g NPN(Is=14.34f Xti=3 Eg=1.11 Vaf=125 Bf=210.6 Ise=157.3f
+ Ne=1.558 Ikf=.2999 Nk=.5082 Xtb=1.5 Br=1 Isc=15.86f Nc=1.022
+ Ikr=3.163 Rb=15 Rc=3.748 Cjc=8.988p Mjc=.33 Vjc=.75 Fc=.5 Cje=18.5p
+ Mje=.33 Vje=.75 Tr=301.4n Tf=321.4p Itf=1 Xtf=2 Vtf=60)
```

```
.model KT315d NPN(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)
```

*

**** 2T316 Family

*

```
.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)
.model q2T316v 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)
.model q2T316g NPN(Is=2.753f Xti=3 Eg=1.11 Vaf=96 Bf=86.5 Ne=2.496
+ Ise=12.8p Ikf=97.23m Xtb=1.5 Var=55 Br=.6577 Nc=2 Isc=15.5p Ikr=.12
+ Rb=70.6 Rc=8.35 Cjc=4.089p Vjc=.65 Mjc=.33 Fc=.5 Cje=1.16p Vje=.69
+ Mje=.33 Tr=27.84n Tf=78.97p Itf=.151 Vtf=25 Xtf=2)
.model q2T316d NPN(Is=2.753f Xti=3 Eg=1.11 Vaf=96 Bf=136.5 Ne=2.496
+ Ise=12.8p Ikf=97.23m Xtb=1.5 Var=55 Br=.6577 Nc=2 Isc=15.5p Ikr=.12
+ Rb=70.6 Rc=8.35 Cjc=4.089p Vjc=.65 Mjc=.33 Fc=.5 Cje=1.16p Vje=.69
+ Mje=.33 Tr=27.84n Tf=78.97p Itf=.151 Vtf=25 Xtf=2)
*

**** 2T325 Family

*
.model q2T325a NPN(Is=19.86f Xti=3 Eg=1.11 Vaf=87 Bf=84.21 Ise=336.8f
+ Ne=1.424 Ikf=76.88m Nk=.5 Xtb=1.5 Br=1.78 Isc=.1p Nc=1.744 Ikr=.6068
+ Rb=25 Rc=.2997 Cjc=3.549p Mjc=.333 Vjc=.75 Fc=.5 Cje=3.42p Mje=.333
+ Vje=.75 Tr=16.38n Tf=138.3p Itf=.3 Xtf=1.7 Vtf=25)
.model q2T325b NPN(Is=19.86f Xti=3 Eg=1.11 Vaf=87 Bf=165.9 Ise=1.151p
+ Ne=1.612 Ikf=72.41m Nk=.5 Xtb=1.5 Br=1.78 Isc=.1p Nc=1.744 Ikr=.6068
+ Rb=27 Rc=.2997 Cjc=3.155p Mjc=.333 Vjc=.75 Fc=.5 Cje=3.42p Mje=.333
+ Vje=.75 Tr=11.53n Tf=138.3p Itf=.3 Xtf=1.7 Vtf=25)
.model q2T325v NPN(Is=9.164f Xti=3 Eg=1.11 Vaf=87 Bf=321.5 Ise=87.74f
+ Ne=1.473 Ikf=87.77m Nk=.5 Xtb=1.5 Br=1.78 Isc=.1p Nc=1.744 Ikr=.6068
+ Rb=31 Rc=.2997 Cjc=2.958p Mjc=.333 Vjc=.75 Fc=.5 Cje=3.42p Mje=.333
+ Vje=.75 Tr=8.891n Tf=112.2p Itf=.3 Xtf=2 Vtf=25)
*

**** 2T326 Family

*
.model q2T326a PNP(Is=496.3E-18 Xti=3 Eg=1.11 Vaf=110 Bf=79.59 Ne=1.376
+ Ise=8.406f Ikf=.106 Nk=.5 Xtb=1.5 Br=1 Isc=496.3E-18 Nc=1.636
+ Ikr=1u Rb=42 Rc=2.141 Cjc=3.7p Mjc=.33 Vjc=.75 Fc=.5 Cje=1.442p
+ Mje=.33 Vje=.75 Tr=3.696u Tf=443.3p Itf=1 Xtf=2 Vtf=20)
.model q2T326b PNP(Is=16.64f Xti=3 Eg=1.11 Vaf=115 Bf=99.06 Ne=2.527
+ Ise=54.12p Ikf=.6751 Xtb=1.5 Var=63 Br=1.75 Nc=2 Isc=12.5f Ikr=.52
+ Rb=52.4 Rc=1.85 Cjc=4.089p Vjc=.69 Mjc=.33 Fc=.5 Cje=3.375p Vje=.75
+ Mje=.35 Tr=40.04n Tf=160.2p Itf=.1 Vtf=10 Xtf=2)
*

**** KT342 Family

*
.model KT342a NPN(Is=5.997f Xti=3 Eg=1.11 Vaf=106.8 Bf=394.1 Ise=38.23f
+ Ne=1.421 Ikf=.1685 Nk=.4727 Xtb=1.5 Br=1 Isc=23.96f Nc=1.34
+ Ikr=2.077 Rb=19 Rc=.9855 Cjc=10.44p Mjc=.3906 Vjc=.75 Fc=.5
+ Cje=14.23p Mje=.33 Vje=.75 Tr=78.22n Tf=307.5p Itf=.52 Xtf=2 Vtf=50)
.model KT342b NPN(Is=5.997f Xti=3 Eg=1.11 Vaf=95.7 Bf=739.7 Ise=50.36f
+ Ne=1.496 Ikf=.1479 Nk=.5 Xtb=1.5 Br=1 Isc=23.96f Nc=1.34
+ Ikr=2.077 Rb=23 Rc=.9855 Cjc=10.44p Mjc=.3906 Vjc=.75 Fc=.5
+ Cje=14.23p Mje=.33 Vje=.75 Tr=78.22n Tf=307.5p Itf=.52 Xtf=2 Vtf=50)
.model KT342v NPN(Is=5.997f Xti=3 Eg=1.11 Vaf=86.61 Bf=956.7 Ise=46.78f
+ Ne=1.566 Ikf=.1922 Nk=.5 Xtb=1.5 Br=1 Isc=23.96f Nc=1.34
+ Ikr=2.077 Rb=25 Rc=.98 Cjc=10.44p Mjc=.3906 Vjc=.75 Fc=.5 Cje=14.23p
+ Mje=.33 Vje=.75 Tr=89.4u Tf=232.1p Itf=4.185 Xtf=3.3 Vtf=50)
*

**** KT351 Family

*

.model KT351a PNP(Is=4.943f Xti=3 Eg=1.11 Vaf=110 Bf=91.56 Ne=1.776
+ Ise=1.436p Ikf=.2116 Xtb=1.5 Var=25 Br=1.215 Nc=2 Isc=1.45p Ikr=.25
+ Rb=75 Rc=.44 Cjc=15.05p Vjc=.69 Mjc=.33 Fc=.5 Cje=24.48p Vje=.65
+ Mje=.33 Tr=223.6n Tf=217.4p Itf=.28 Vtf=35 Xtf=2)

.model KT351b PNP(Is=4.943f Xti=3 Eg=1.11 Vaf=110 Bf=185.3 Ne=1.776
+ Ise=1.436p Ikf=.2116 Xtb=1.5 Var=25 Br=1.215 Nc=2 Isc=1.45p Ikr=.25
+ Rb=75 Rc=.44 Cjc=15.05p Vjc=.69 Mjc=.33 Fc=.5 Cje=24.48p Vje=.65
+ Mje=.33 Tr=223.6n Tf=217.4p Itf=.28 Vtf=35 Xtf=2)

*

**** KT355

*

.model q2T355a NPN(Is=14.02f Xti=3 Eg=1.11 Vaf=82.35 Bf=172.2 Ne=2.211
+ Ise=9.573p Ikf=.2809 Xtb=1.5 Var=45 Br=.8636 Nc=2 Isc=1.12p Ikr=.253
+ Rb=41.6 Rc=3.55 Cjc=2.742p Vjc=.75 Mjc=.33 Fc=.5 Cje=2.635p Vje=.69
+ Mje=.33 Tr=76.29n Tf=65.28p Itf=.532 Vtf=15 Xtf=2)

*

**** KT357 Family

*

.model KT357a PNP(Is=67.34f Xti=3 Eg=1.11 Vaf=80 Bf=70.83 Ise=746.1f
+ Ne=1.452 Ikf=.1929 Nk=.5153 Xtb=1.5 Br=1 Isc=67.34f Nc=1.071
+ Ikr=2.269 Rc=3.665 Rb=50 Cjc=12.15p Mjc=.33 Vjc=.75 Fc=.5 Cje=18.5p
+ Mje=.33 Vje=.75 Tr=275.6n Tf=160.9p Itf=56.6m Xtf=.3203 Vtf=40)

.model KT357b PNP(Is=31.08f Xti=3 Eg=1.11 Vaf=75 Bf=203.3 Ise=325.3f
+ Ne=1.534 Ikf=.2072 Nk=.5155 Xtb=1.5 Br=1 Isc=34.36f Nc=1.022
+ Ikr=3.163 Rc=3.748 Rb=70 Cjc=10.93p Mjc=.33 Vjc=.75 Fc=.5 Cje=18.5p
+ Mje=.33 Vje=.75 Tr=275.6n Tf=91.32p Itf=.1303 Xtf=1.762 Vtf=40)

*

**** 2T361 Family

*

.model KT361a PNP(Is=67.34f Xti=3 Eg=1.11 Vaf=80 Bf=70.83 Ise=746.1f
+ Ne=1.452 Ikf=.1929 Nk=.5153 Xtb=1.5 Br=1 Isc=67.34f Nc=1.071
+ Ikr=2.269 Rc=3.665 Rb=50 Cjc=12.15p Mjc=.33 Vjc=.75 Fc=.5 Cje=18.5p
+ Mje=.33 Vje=.75 Tr=275.6n Tf=160.9p Itf=56.6m Xtf=.3203 Vtf=40)

.model KT361b PNP(Is=31.08f Xti=3 Eg=1.11 Vaf=75 Bf=203.3 Ise=325.3f
+ Ne=1.534 Ikf=.2072 Nk=.5155 Xtb=1.5 Br=1 Isc=34.36f Nc=1.022
+ Ikr=3.163 Rc=3.748 Rb=70 Cjc=10.93p Mjc=.33 Vjc=.75 Fc=.5 Cje=18.5p
+ Mje=.33 Vje=.75 Tr=275.6n Tf=91.32p Itf=.1303 Xtf=1.762 Vtf=40)

.model KT361v PNP(Is=67.34f Xti=3 Eg=1.11 Vaf=90.7 Bf=81.94 Ise=579.7f
+ Ne=1.51 Ikf=.2136 Nk=.5064 Xtb=1.5 Br=1 Isc=67.34f Nc=1.071
+ Ikr=2.269 Rc=3.665 Cjc=8.502p Mjc=.33 Vjc=.75 Fc=.5 Cje=18.5p
+ Mje=.33 Vje=.75 Tr=275.6n Tf=125.8p Itf=1.202 Xtf=5.752 Vtf=60)

.model KT361g PNP(Is=31.08f Xti=3 Eg=1.11 Vaf=75 Bf=203.3 Ise=325.3f
+ Ne=1.534 Ikf=.2072 Nk=.5155 Xtb=1.5 Br=1 Isc=34.36f Nc=1.022
+ Ikr=3.163 Rc=3.748 Rb=70 Cjc=10.93p Mjc=.33 Vjc=.75 Fc=.5 Cje=18.5p
+ Mje=.33 Vje=.75 Tr=275.6n Tf=91.32p Itf=.1303 Xtf=1.762 Vtf=40)

.model KT361d PNP(Is=67.34f Xti=3 Eg=1.11 Vaf=80 Bf=70.83 Ise=746.1f
+ Ne=1.452 Ikf=.1929 Nk=.5153 Xtb=1.5 Br=1 Isc=67.34f Nc=1.071
+ Ikr=2.269 Rc=3.665 Rb=50 Cjc=12.15p Mjc=.33 Vjc=.75 Fc=.5 Cje=18.5p
+ Mje=.33 Vje=.75 Tr=275.6n Tf=160.9p Itf=56.6m Xtf=.3203 Vtf=40)

*

**** KT363 Family

*

.model q2T363a PNP(Is=11.8f Xti=3 Eg=1.11 Vaf=95.7 Bf=100.6 Ne=1.971
+ Ise=1.834p Ikf=.195 Xtb=1.5 Var=65 Br=1.18 Nc=2 Isc=1p Ikr=.3 Rb=80

+ Rc=1.6 Cjc=2.958p Vjc=.69 Mjc=.33 Fc=.5 Cje=1.112p Vje=.71 Mje=.35
+ Tr=6.149n Tf=41.32p Itf=.12 Vtf=10 Xtf=2)
.model q2T363b PNP(Is=11.8f Xti=3 Eg=1.11 Vaf=95.7 Bf=156.2 Ne=1.971
+ Ise=1.834p Ikf=.195 Xtb=1.5 Var=65 Br=1.18 Nc=2 Isc=1p Ikr=.3 Rb=67.5
+ Rc=1.6 Cjc=2.958p Vjc=.69 Mjc=.33 Fc=.5 Cje=1.112p Vje=.71 Mje=.35
+ Tr=6.149n Tf=41.32p Itf=.12 Vtf=10 Xtf=2)

*

**** KT368 Family

*

.model q2T368a NPN(Is=8.675f Xti=3 Eg=1.11 Vaf=108 Bf=250.5 Ne=1.377
+ Ise=9.128f Ikf=.3608 Xtb=1.5 Var=56 Br=1.45 Nc=2 Isc=16.3f Ikr=.125
+ Rb=31.5 Rc=2.445 Cjc=2.35p Vjc=.75 Mjc=.33 Fc=.5 Cje=2.786p Vje=.69
+ Mje=.37 Tr=2.147n Tf=84.62p Itf=.15 Vtf=25 Xtf=2)
.model q2T368b NPN(Is=8.675f Xti=3 Eg=1.11 Vaf=108 Bf=325.3 Ne=1.377
+ Ise=9.128f Ikf=.3608 Xtb=1.5 Var=56 Br=1.45 Nc=2 Isc=16.3f Ikr=.125
+ Rb=31.5 Rc=2.445 Cjc=2.35p Vjc=.75 Mjc=.33 Fc=.5 Cje=2.786p Vje=.69
+ Mje=.37 Tr=2.147n Tf=84.62p Itf=.15 Vtf=25 Xtf=2)

*

**** KT371

*

.model q2T371a NPN(Is=1.378f Xti=3 Eg=1.11 Vaf=68.25 Bf=236 Ne=1.479
+ Ise=43.8f Ikf=.1777 Xtb=1.5 Var=45 Br=3.414 Nc=2 Isc=55f Ikr=35m
+ Rb=44.1 Rc=2.8 Cjc=1.932p Vjc=.75 Mjc=.33 Fc=.5 Cje=1.747p Vje=.69
+ Mje=.33 Tr=13.65n Tf=43.78p Itf=.35 Vtf=10 Xtf=2)

*

**** KT3101

*

.model KT3101a NPN(Is=25.63f Xti=3 Eg=1.11 Vaf=56 Bf=245.8 Ne=1.254
+ Ise=27.93f Ikf=54.66m Xtb=1.5 Var=20 Br=1.883 Nc=2 Isc=108.6f Ikr=57.63m
+ Rb=28 Rbm=8 Irb=.72m Rc=3.45 Cjc=1.166p Mjc=.2974 Vjc=.75 Fc=.5 Xcjc=0.5
+ Cje=1.354p Mje=.3137 Vje=.65 Tr=463.8p Tf=22.39p Itf=.367 Vtf=12 Xtf=2)

*

**** KT3102 Family

*

.model KT3102a NPN(Is=5.258f Xti=3 Eg=1.11 Vaf=86 Bf=185.1 Ne=7.428
+ Ise=28.21n Ikf=.4922 Xtb=1.5 Var=25 Br=2.713 Nc=2 Isc=21.2p Ikr=.25
+ Rb=52 Rc=1.65 Cjc=9.921p Vjc=.65 Mjc=.33 Fc=.5 Cje=11.3p Vje=.69
+ Mje=.33 Tr=57.71n Tf=611.5p Itf=.52 Vtf=80 Xtf=2)
.model KT3102b NPN(Is=3.628f Xti=3 Eg=1.11 Vaf=72 Bf=303.3 Ne=13.47
+ Ise=43.35n Ikf=96.35m Xtb=1.5 Var=30 Br=3.201 Nc=2 Isc=5.5p Ikr=.1
+ Rb=37 Rc=1.12 Cjc=11.02p Vjc=.65 Mjc=.33 Fc=.5 Cje=13.31p Vje=.69
+ Mje=.33 Tr=41.67n Tf=493.4p Itf=.12 Vtf=50 Xtf=2)
.model KT3102bm NPN(Is=891.4E-18 Xti=3 Eg=1.11 Vaf=64 Bf=311.9 Ne=4.136
+ Ise=594.5p Ikf=60.16m Xtb=1.5 Var=25 Br=5.622 Nc=2 Isc=1.225p Ikr=.25
+ Rb=59 Rc=1.23 Cjc=9.186p Vjc=.65 Mjc=.33 Fc=.5 Cje=9.139p Vje=.69
+ Mje=.33 Tr=28.24n Tf=786.5p Itf=.2 Vtf=30 Xtf=2)
.model KT3102v NPN(Is=3.628f Xti=3 Eg=1.11 Vaf=58.2 Bf=333.4 Ise=35.48f
+ Ne=1.602 Ikf=.1538 Nk=.5 Xtb=1.5 Br=1.546 Isc=18.26f Nc=1.585
+ Ikr=.6305 Rb=30 Rc=.1636 Cjc=11.02p Mjc=.33 Vjc=.65 Fc=.5 Cje=11.3p
+ Mje=.33 Vje=.69 Tr=41.67n Tf=493.4p Itf=.3 Xtf=2 Vtf=40)
.model KT3102g NPN(Is=2.99f Xti=3 Eg=1.11 Vaf=58.2 Bf=831 Ise=27.52f
+ Ne=1.623 Ikf=.1121 Nk=.5 Xtb=1.5 Br=1 Isc=211.5f Nc=1.76 Ikr=1.586
+ Rb=42 Rc=.4274 Cjc=8.873p Mjc=.33 Vjc=.75 Fc=.5 Cje=11.3p Mje=.33
+ Vje=.69 Tr=41.67n Tf=386.3p Itf=1 Xtf=2 Vtf=40)
.model KT3102d NPN(Is=3.628f Xti=3 Eg=1.11 Vaf=58.2 Bf=288.6 Ise=33.28f
+ Ne=1.634 Ikf=.1893 Nk=.5 Xtb=1.5 Br=1.546 Isc=18.26f Nc=1.585

+ Ikr=.6305 Rb=35 Rc=.1636 Cjc=11.02p Mjc=.33 Vjc=.65 Fc=.5 Cje=11.3p
 + Mje=.33 Vje=.69 Tr=41.67n Tf=493.4p Itf=.3 Xtf=2 Vtf=30)
 .model KT3102e NPN(Is=2.99f Xti=3 Eg=1.11 Vaf=58.2 Bf=868.9 Ise=15.81f
 + Ne=1.65 Ikf=.179 Nk=.5 Xtb=1.5 Br=1 Isc=211.5f Nc=1.76 Ikr=1.586
 + Rb=53 Rc=.4274 Cjc=7.887p Mjc=.33 Vjc=.75 Fc=.5 Cje=11.3p Mje=.33
 + Vje=.69 Tr=41.67n Tf=386.3p Itf=1 Xtf=2 Vtf=30)

*

**** KT3107 Family

*

.model KT3107a PNP(Is=6.545f Xti=3 Eg=1.11 Vaf=86.5 Bf=105.5 Ne=8.56
 + Ise=7.735n Ikf=.1862 Xtb=1.5 Var=32 Br=1.62 Nc=2 Isc=3.35p Ikr=12m
 + Rb=39.1 Rc=.71 Cjc=12.83p Vjc=.65 Mjc=.33 Fc=.5 Cje=12.59p Vje=.69
 + Mje=.35 Tr=30.5n Tf=477.5p Itf=56m Vtf=35 Xtf=2)
 .model KT3107b PNP(Is=2.111f Xti=3 Eg=1.11 Vaf=68.5 Bf=145.2 Ne=2.367
 + Ise=7.338p Ikf=.242 Xtb=1.5 Var=32 Br=7.573 Nc=2 Isc=1.55p Ikr=25m
 + Rb=25.5 Rc=.75 Cjc=11.86p Vjc=.69 Mjc=.33 Fc=.5 Cje=13.01p Vje=.69
 + Mje=.35 Tr=20.11n Tf=474p Itf=.15 Vtf=25 Xtf=1)
 .model KT3107v PNP(Is=6.545f Xti=3 Eg=1.11 Vaf=86.5 Bf=105.5 Ne=8.56
 + Ise=7.735n Ikf=.1862 Xtb=1.5 Var=32 Br=1.62 Nc=2 Isc=3.35p Ikr=12m
 + Rb=39.1 Rc=.71 Cjc=12.83p Vjc=.65 Mjc=.33 Fc=.5 Cje=12.59p Vje=.69
 + Mje=.35 Tr=30.5n Tf=477.5p Itf=56m Vtf=35 Xtf=2)
 .model KT3107g PNP(Is=6.531f Xti=3 Eg=1.11 Vaf=68.5 Bf=237.5 Ne=2.367
 + Ise=7.338p Ikf=.242 Xtb=1.5 Var=32 Br=7.573 Nc=2 Isc=1.55p Ikr=25m
 + Rb=25.5 Rc=.75 Cjc=11.86p Vjc=.69 Mjc=.33 Fc=.5 Cje=13.01p Vje=.69
 + Mje=.35 Tr=20.11n Tf=474p Itf=.15 Vtf=25 Xtf=1)

*

**** 2T3108 Family

*

.model q2T3108a PNP(Is=1.41f Xti=3 Eg=1.11 Vaf=87 Bf=112.7 Ne=3.346
 + Ise=114.2p Ikf=31.92m Xtb=1.5 Br=1.883 Nc=2 Isc=114f Ikr=31m Rc=4.25
 + Rb=52 Cjc=4.372p Mjc=.33 Vjc=.75 Fc=.5 Cje=3.714p Mje=.33 Vje=.75
 + Tr=67.31n Tf=344.1p Itf=56m Vtf=45 Xtf=1.5)
 .model q2T3108b PNP(Is=863E-18 Xti=3 Eg=1.11 Vaf=85 Bf=112.4 Ne=12.53
 + Ise=37.65n Ikf=27.99m Xtb=1.5 Var=26 Br=2.984 Nc=2 Isc=1.25p Ikr=56m
 + Rb=52 Rc=4.24 Cjc=4.529p Vjc=.65 Mjc=.33 Fc=.5 Cje=3.763p Vje=.69
 + Mje=.33 Tr=43.55n Tf=292.3p Itf=58m Vtf=55 Xtf=2)
 .model q2T3108v PNP(Is=1.41f Xti=3 Eg=1.11 Vaf=83 Bf=223.5 Ne=3.657
 + Ise=101p Ikf=35.11m Xtb=1.5 Br=1.655 Nc=2 Isc=114f Ikr=31m Rc=4.5
 + Rb=52 Cjc=4.372p Mjc=.33 Vjc=.75 Fc=.5 Cje=3.714p Mje=.33 Vje=.75
 + Tr=63.22n Tf=339.5p Itf=93m Vtf=40 Xtf=1.5)

*

*** KT3117 Family

*

.model KT3117a NPN(Is=61.27f Xti=3 Eg=1.11 Vaf=95.7 Bf=182 Ne=2.744
 + Ise=9.293n Ikf=2.622 Xtb=1.5 Var=65 Br=1.894 Nc=2 Isc=1.2n Ikr=2.65
 + Rb=30.7 Rc=.75 Cjc=28.58p Mjc=.4701 Vjc=.75 Fc=.5 Cje=68.82p Mje=.1985
 + Vje=.75 Tr=32.04n Tf=261.9p Itf=2.5 Vtf=40 Xtf=1.5)
 .model q2T3117a NPN(Is=61.27f Xti=3 Eg=1.11 Vaf=95.7 Bf=182 Ne=2.744
 + Ise=9.293n Ikf=2.622 Xtb=1.5 Var=65 Br=1.894 Nc=2 Isc=1.2n Ikr=2.65
 + Rb=30.7 Rc=.75 Cjc=28.58p Mjc=.4701 Vjc=.75 Fc=.5 Cje=68.82p Mje=.1985
 + Vje=.75 Tr=32.04n Tf=261.9p Itf=2.5 Vtf=40 Xtf=1.5)

*

2. SPICE-МОДЕЛИ ОТЕЧЕСТВЕННЫХ ПОЛЕВЫХ ТРАНЗИСТОРОВ

*JFET

.model J2P307b NJF (Vto=-2.617 Beta=1.578m Lambda=1.890m Rs=15 Rd=15
+ Cgs=3.5p Cgd=3p Fc=0.5 Pb=1 Is=10f)

.model J2P307v NJF (Vto=-2.966 Beta=1.423m Lambda=7.299m Rs=18 Rd=18
+Cgs=3.5p Cgd=3p Fc=0.5 Pb=1 Is=10f)

.model J2P307g NJF (Vto=-3.371 Beta=1.386m Lambda=3.532m Rs=16 Rd=16
+ Cgs=3.5p Cgd=3p Fc=0.5 Pb=1 Is=10f)

*

.MODEL KP103 PJF (VTO=-2.06451 BETA=348.474U LAMBDA=33.3333M
+ RS=6.8395 CGD=26.533P CGS=12P KF=0.001F AF=500M)

*

.MODEL KP303 NJF (VTO=-4.2472 BETA=757.401U LAMBDA=8.72522M
+ CGD=6.63325P CGS=4P KF=0.00148695F AF=499.872M)

*

.MODEL KP307 NJF (VTO=-7.15988 BETA=369.673U LAMBDA=5M RS=9.77631
+ CGD=5P CGS=1.0773E-07F PB=6.17586 KF=0.0870953F AF=500.148M)

*

.MODEL KP313 NJF (VTO=-6.2211 BETA=219.52U LAMBDA=1M RS=115.81
+ CGD=1.32665P CGS=3.6P KF=0.000591269F AF=500.557M)

*

.MODEL KP337 NJF (VTO=-3.42034 BETA=6.0987M LAMBDA=1M CGD=5.96992P
+ CGS=8.95489P KF=0.125746F AF=498.875M)

*

.MODEL KP341 NJF (VTO=-2.30452 BETA=1.01119M LAMBDA=1M RS=94.6169
+ CGD=4.52548P CGS=4.50333P KF=0.00518736F AF=9.98378)