

ИУ6-42

Расписание лабораторных работ по дисциплине «ЭЛЕКТРОНИКА» в весеннем семестре 2017/8 учебного года (поток ИУ6, 2-ой курс)

Лабораторная работа №1 Диоды в источниках питания			Лабораторная работа №2 Способы включения транзисторов в усилителях		
Дата	Группа	Начало ЛР	Дата	Группа	Начало ЛР
16.02.18 г.	ИУ6-41.1*	08 ч. 30 мин.	23.03.18 г.	ИУ6-42.1	08 ч. 30 мин.
16.02.18 г.	ИУ6-42.1	12 ч. 00 мин.	23.03.18 г.	ИУ6-41.1	12 ч. 00 мин.
16.02.18 г.	ИУ6-45.1	15 ч.40 мин.	23.03.18 г.	ИУ6-45.1	15 ч. 40 мин.
02.03.18 г.	ИУ6-44.1	08 ч. 30 мин.	30.03.18. г.	ИУ6-44.1	08 ч. 30 мин.
02.03.18 г.	ИУ6-43.1	12 ч. 00 мин.	30.03.18. г.	ИУ6-43.1	12 ч. 00 мин.
02.03.18 г.	ИУ6-41.2	15 ч. 40 мин.	30.03.18. г.	ИУ6-41.2	15 ч. 40 мин.
16.03.18 г.	ИУ6-42.2	08 ч. 30 мин.	06.04.18 г.	ИУ6-43.2	08 ч. 30 мин.
16.03.18 г.	ИУ6-43.2	12 ч. 00 мин.	06.04.18 г.	ИУ6-42.2	12 ч. 00 мин.
16.03.18 г.	ИУ6-44.2	15 ч. 40 мин.	06.04.18 г.	ИУ6-44.2	15 ч. 40 мин.

Лабораторная работа №3 Ключ на биполярном транзисторе			Лабораторная работа №4 Генератор импульсов на ОУ		
Дата	Группа	Начало ЛР	Дата	Группа	Начало ЛР
13.04.18 г.	ИУ6-41.1	08 ч. 30 мин.	04.05.18 г.	ИУ6-41.1	08 ч. 30 мин.
13.04.18 г.	ИУ6-42.1	12 ч. 00 мин.	04.05.18 г.	ИУ6-42.1	12 ч. 00 мин.
13.04.18 г.	ИУ6-45.1	15 ч.40 мин.	04.05.18 г.	ИУ6-45.1	15 ч. 40 мин.
20.04.18 г.	ИУ6-43.1	08 ч. 30 мин.	11.05.18 г.	ИУ6-43.1	08 ч. 30 мин.
20.04.18 г.	ИУ6-41.2	12 ч. 00 мин.	11.05.18 г.	ИУ6-44.1	12 ч. 00 мин.
20.04.18 г.	ИУ6-44.1	15 ч. 40 мин.	11.05.18 г.	ИУ6-41.2	15 ч. 40 мин.
27.04.18 г.	ИУ6-43.2	08 ч. 30 мин.	18.05.18 г.	ИУ6-43.2	08 ч. 30 мин.
27.04.18 г.	ИУ6-42.2	12 ч. 00 мин.	18.05.18 г.	ИУ6-42.2	12 ч. 00 мин.
27.04.18 г.	ИУ6-44.2	15 ч. 40 мин.	18.05.18 г.	ИУ6-44.2	15 ч. 40 мин.

*примечание: каждая группа делится на две подгруппы, а подгруппы в расписании обозначаются дополнительной цифрой после точки в номере группы (например, ИУ6-41.1 означает первую подгруппу в группе ИУ6-41, а ИУ6-41.2 вторую подгруппу).

Все лабораторные будут проходить в ауд. 805.

Ведет лабораторные работы преподаватель Аксенов Николай Васильевич

ЭЛЕКТРОНИКА

ПЕРЕЧЕНЬ ОСНОВНОЙ И ДОПОЛНИТЕЛЬНОЙ УЧЕБНОЙ ЛИТЕРАТУРЫ, НЕОБХОДИМОЙ ДЛЯ ОСВОЕНИЯ ДИСЦИПЛИНЫ

Основная литература по дисциплине:

1. Миловзоров О.В. Электроника: учебник для ВУЗов – М.: Высшая школа, 2012. – 288с.: ил.
2. Опадчий Ю.Ф. и др. Аналоговая и цифровая электроника (Полный курс): Учебник для вузов / Ю.Ф. Опадчий, О.П. Глудкин, А.И. Гуров; Под ред. О.П. Глудкина. – М.: Горячая Линия – Телеком, 2007. – 768 с.: ил.
3. Иванов С.Р. Конспект разделов курса «Электроника».,- 2013 г.
4. Иванов С.Р.Методические указания к выполнению лабораторных работ по курсу «Электроника»., 2012 г., кафедральное издание.
5. Карлащук В.И.: Электронная лаборатория на IBM PC. Программа Electronics Workbench и ее применение./ - М. СОЛОН-Р, 2001. – 725 с.: ил.

ПЕРЕЧЕНЬ РЕСУРСОВ СЕТИ ИНТЕРНЕТ, РЕКОМЕНДУЕМЫХ ДЛЯ САМОСТОЯТЕЛЬНОЙ РАБОТЫ ПРИ ОСВОЕНИИ ДИСЦИПЛИНЫ

1. Конспекты лекций по Электронике.

Дисциплина «Электроника»
Уведомление о получении ДЗ1 студентами группы ИУ6-32

№	Фамилия и имя	Номер варианта	Дата получения ДЗ1	Подпись
01	Бобров Константин			
02	Богоутдинова Дания			
03	Боярских Никита			
04	Бузунов Денис			
05	Бурлаков Александр			
06	Бушуев Алексей			
07	Векшин Роман			
08	Волков Арсений			
09	Володина Александра			
10	Жидков Артем			
11	Козеева Анна			
12	Котухов Вадим			
13	Кузнецов Илья			
14	Кураков Егор			
15	Мотичев Михаил			
16	Омельянюк Кирилл			
17	Петров Олег			
18	Радченко Михаил			
19	Ралдугина Анна			
20	Рамазанов Виталий			
21	Рубцова Мария			
22	Седой Сергей			
23	Царева Ольга			
24	Шатилов Алексей			
25	Щербакова Мария			

Сведения о старосте группы ИУ6-32

ФИО:

Адрес электронной почты:

Номер мобильного телефона:

Примечание: староста организует получение вариантов задания и в течение недели возвращает уведомление лектору.

Задание №1 по дисциплине «Электроника» (гр. ИУ6-42)

1. Для перечисленных в таблице диода и транзистора назначить численные значения параметров в соответствии с их моделями в пакете прикладных программ «Multisim». Для каждого параметра прибора привести объяснение, на каком основании ему присваивается выбранное значение.
2. В отчётом материале привести также эквивалентные схемы упомянутых приборов и совокупность уравнений, отражающих особенности их поведения, давая разъяснения к каждому уравнению.

№ варианта	Тип диода	Тип транзистора	
01	KC133A	KT723A	
02	D237Б	2T874Б	
03	D9B	2E914Б	
04	KC456A	KT371A	
05	D310	KT315A	
06	KC182A	ГТ346Б	
07	KD509Г	KT601Б	
08	D246Б	KT3102A	
09	D818A	KT363Б	
10	KD208A	KT6117Б	
11	KD205Л	KT313A	
12	KC168В	KT351A	
13	D211	ГТ328В	
14	D305	KT373B	
15	KC210B	KT940A	
16	KD218Б	KT3107Б	
17	KD522Б	KT209A	
18	KD210Б	ГТ403Б	
19	KC139A	KT630A	
20	KD521Г	KT371Б	
21	D229K	KT373A	
22	KC147A	KT352Б	
23	D205Б	2T642A	
24	D9B	KT313A	
25	KC456A	ГТ328В	
26	D310	KT3126Б	
27	KC182A	KT940A	
28	KD509Г	KT3107Б	
29	D246Б	КП350Б	
30	D818A	ГТ403Б	
31	KD208A	KT630A	
32	KD205Л	KT371Б	
33	KC168В	KT373A	

5. Модели аналоговых компонентов

тивление резистора R_1 по умолчанию принимает значение 1 кОм. Здесь специально подчеркнуто, что локальные и глобальные параметры могут принимать как совпадающие ($C=\{C\}$), так и различные ($L=\{LR\}$) обозначения.

5.2. Математическое описание моделей компонентов

5.2.1. Диод

Схема замещения полупроводникового диода (рис. 5.15) состоит из идеального диода, изображенного в виде нелинейного зависимого источника тока $I(V)$, емкости $p-n$ -перехода C и объемного сопротивления RS [1, 4, 17, 32]. Параметры математической модели диода (см. п. 5.1.6) приведены в табл. 5.12.

Таблица 5.12. Параметры модели диода

Имя параметра	Параметр	Размерность	Значение по умолчанию
AF	Показатель степени в формуле фликкер-шума		1
BV	Обратное напряжение пробоя (положительная величина)	B	e
CJO	Барьерная емкость при нулевом смещении	Ф	0
EG	Ширина запрещенной зоны	эВ	1,11
FC	Коэффициент нелинейности барьерной емкости прямосмещенного перехода		0,5
IBV	Начальный ток пробоя, соответствующий напряжению BV (положительная величина)	A	10^{-10}
IBVL	Начальный ток пробоя низкого уровня	A	0
IKF	Предельный ток при высоком уровне инжекции	A	e
IS	Ток насыщения при температуре 27°C	A	10^{-14}
ISR	Параметр тока рекомбинации	A	0
KF	Коэффициент фликкер-шума		0
M	Коэффициент лавинного умножения		0,5
N	Коэффициент инжекции		1

5. Модели аналоговых компонентов

NBV	Коэффициент неидеальности на участке пробоя		1
NBVL	Коэффициент неидеальности на участке пробоя низкого уровня		1
NR	Коэффициент эмиссии для тока ISR		2
RS	Объемное сопротивление	Ом	0
TBV1	Линейный температурный коэффициент BV	°C ⁻¹	0
TBV2	Квадратичный температурный коэффициент BV	°C ⁻²	0
TIKF	Линейный температурный коэффициент IKF	°C ⁻¹	0
TRS1	Линейный температурный коэффициент RS	°C ⁻¹	0
TRS2	Квадратичный температурный коэффициент RS	°C ⁻²	0
TT	Время переноса заряда	с	0
T_ABS	Абсолютная температура	°C	
T_MEASURD	Температура измерений	°C	
T_REL_GLOBAL	Относительная температура	°C	
T_REL_LOCL	Разность между температурой диода и модели-прототипа	°C	
VJ	Контактная разность потенциалов	В	1
XTI	Температурный коэффициент тока насыщения		3

Вольт-амперные характеристики диода. Ток диода представляется в виде разности токов

$$I = I_{fwd} - I_{rev}$$

Зависимость $I_{fwd} = I_n K_{inj} + I_{rec} K_{gen}$ аппроксимирует ВАХ диода при положительном напряжении на переходе V. Здесь

$I_n = IS \{ \exp[V/(NR \cdot V)] - 1 \}$ — нормальная составляющая тока;

$I_{rec} = ISR \{ \exp[V/(NR \cdot V)] - 1 \}$ — ток рекомбинации;

5. Модели аналоговых компонентов

K_{inj} — коэффициент инжекции:

$$K_{inj} = \begin{cases} \sqrt{IKF / (IKF + I_n)} & \text{для } IKF > 0; \\ 1 & \text{для } IKF \leq 0; \end{cases}$$

$K_{gen} = [(1 - V/VJ)^2 + 0,005]^{M/2}$ — коэффициент генерации.

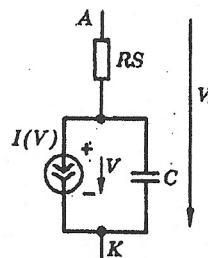


Рис. 5.15. Нелинейная модель полупроводникового диода

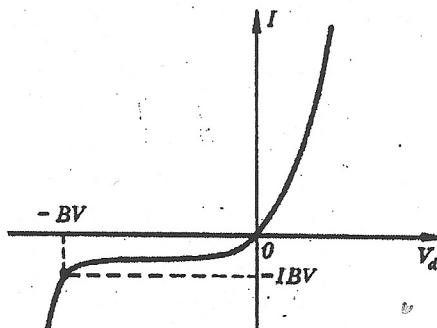


Рис. 5.16. ВАХ идеального диода

Ток диода при отрицательном напряжении на переходе I_{rev} характеризует явление пробоя. Он имеет две составляющие:

$$I_{rev} = I_{rev,high} + I_{rev,low}$$

где

$$I_{rev,high} = IBV \exp [-(V+BV) / (NBV \cdot V)];$$

$$I_{rev,low} = IBVL \exp [-(V+BV) / (NBVL \cdot V)],$$

$V_t = kT/q$ — температурный потенциал перехода (0,026 В при номинальной температуре 27°C); $k = 1,38 \cdot 10^{-23}$ Дж/°С — постоянная Больцмана; $q = 1,6 \cdot 10^{-19}$ Кл — заряд электрона; T — абсолютная температура $p-n$ -перехода. Вид ВАХ диода показан на рис. 5.16.

Емкость перехода C равна:

$$C = C_i + Area \cdot C_j,$$

5. Модели аналоговых компонентов

где C_i — диффузионная емкость перехода; $C_f = T \cdot G$; C_b — барьерная емкость перехода, равная

$$C_b = \begin{cases} CJO(1 - V/VJ)^{-M} & \text{при } V < FC \cdot VJ; \\ CJO(1 - FC)^{-(1+M)}[1 - FC(1 + M) + M \cdot V/VJ] & \text{при } V > FC \cdot VJ; \end{cases}$$

$G = \text{Area} \cdot d(K_{inj} I_{fwd})/dV$ — дифференциальная проводимость перехода для текущих значений I и V .

Линеаризованная схема замещения диода. Схема приведена на рис. 5.17, а. Ее можно дополнить источниками шумовых токов, как показано на рис. 5.17, б. В диоде имеются следующие источники шума: объемное сопротивление RS , характеризующееся тепловым током I_{wRS} со спектральной плотностью $S_{RS} = 4kT/(RS \cdot \text{Area})$; дробовой и фликкер-шум диода, характеризующийся током I_{wd} со спектральной плотностью $S_d = 2ql + KF \cdot I^{1/2}/f$, где f — текущая частота.

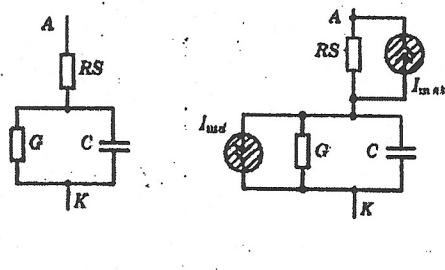


Рис. 5.17. Линеаризованная схема замещения диода (а) с включением источников внутреннего шума (б)

Температурные зависимости параметров. В математической модели диода они учитываются следующим образом:

$$\begin{aligned} IS(T) &= IS \exp\{EG(T)/[N \cdot V_f(T)]T/T_{nom}-1\} \cdot (T/T_{nom})^{XTI}, \\ ISR(T) &= ISR \exp\{EG(T)/[N \cdot V_f(T)](T/T_{nom}-1)(T/T_{nom})^{XTI}\}, \\ IKF(T) &= IKF[1+TIKF(T-T_{nom})]; \\ BV(T) &= BV[1+TBV1(T-T_{nom})+TBV2(T-T_{nom})^2]; \\ RS(T) &= RS[1+TRS1(T-T_{nom})+TRS2(T-T_{nom})^2]; \\ VJ(T) &= VJ \cdot T/T_{nom} - 3V_f(T)\ln(T/T_{nom}) - EG(T_{nom})T/T_{nom} + EG(T); \\ CJO(T) &= CJO(1+M[0,0004(T-T_{nom})+1-VJ(T)/VJ]); \\ KF(T) &= KF \cdot VJ(T)/VJ, AF(T) = AF \cdot VJ(T)/VJ; \\ EG(T) &= EG_0 - aT^2/(b+T), \end{aligned}$$

где $EG(T_{nom})$ — ширина запрещенной зоны при номинальной температуре (1,11 эВ для кремния; 0,67 эВ для германия; 0,69 эВ для диодов с барьером Шотки при температуре 27°C). Значения параметров IS , V_f , VJ , CJO , KF , AF , EG берутся для номинальной температуры T_{nom} ; для кремния $EG_0 = 1,16$ эВ, $a = 7 \cdot 10^{-4}$, $b = 1108$; $XTI = 3$ для диодов с $p-n$ -переходом и $XTI = 2$ для диодов с барьером Шотки.

5. Модели аналоговых компонентов

Значение номинальной температуры $T_{ном}$ устанавливается с помощью опции TNOM (по умолчанию $T_{ном}=27^{\circ}\text{C}$).

Приведенные выше выражения описывают диоды с $p-n$ -переходом, включая и стабилитроны. Диоды с барьером Шотки также характеризуются этими зависимостями, но они обладают очень малым временем переноса $T_{T=0}$ и более чем на два порядка большими значениями тока диода I . При этом ток насыщения определяется зависимостью $IS = K \cdot T \cdot \exp(-\phi_b/V)$, где K — эмпирическая константа; ϕ_b — высота барьера Шотки.

Скалярный множитель Area. Указываемый при включении диода в схему (см. п. 5.1.6), он позволяет в программе PSpice определить эквивалентный диод, характеризующий параллельное включение нескольких одинаковых приборов или прибор, занимающий большую площадь. С его помощью изменяются значения параметров IS , IRS , IBV , $IBVL$, RS и CJO :

$$\begin{aligned} IS &= IS \cdot \text{Area}, \quad ISR = ISR \cdot \text{Area}, \quad IBV = IBV \cdot \text{Area}, \\ IBVL &= IBVL \cdot \text{Area}, \quad RS = RS / \text{Area}, \quad CJO = CJO \cdot \text{Area}. \end{aligned}$$

По умолчанию скалярный множитель $\text{Area}=1$.

В качестве примера приведем описание параметров модели диода D104A:

```
.model D104A D (IS=5.81e-12 RS=8.1 N=1.15 TT=8.28ns CJO=41.2pF VJ=0.71  
+ M=0.33 FC=0.5 EG=1.11 XTI=3)
```

5.2.2. Биполярный транзистор

a) Встроенная модель биполярного транзистора

В программе PSpice используется схема замещения биполярного транзистора в виде адаптированной модели Гуммеля—Пуна, которая по сравнению с исходной моделью позволяет учесть эффекты, возникающие при больших смещениях на переходах [17, 32]. Эта модель автоматически упрощается до более простой модели Эберса—Молла, если опустить некоторые параметры. Эквивалентные схемы этих моделей для $n-p-n$ -структур изображены на рис. 5.18. Параметры полной математической модели биполярного транзистора приведены в табл. 5.13.

Таблица 5.13. Параметры модели биполярного транзистора

Имя параметра	Параметр	Размерность	Значение по умолчанию
AF	Показатель степени, определяющий зависимость спектральной плотности фликкер-шума от тока через переход		1

5. Модели аналоговых компонентов

BF	Максимальный коэффициент передачи тока в нормальном режиме в схеме с ОЭ (без учета токов утечки)		100
BR	Максимальный коэффициент передачи тока в инверсном режиме в схеме с ОЭ		1
CJC	Емкость коллекторного перехода при нулевом смещении	Ф	0
CJE	Емкость эмиттерного перехода при нулевом смещении	пФ	0
CJS (CCS)	Емкость коллектор—подложка при нулевом смещении	Ф	0
EG	Ширина запрещенной зоны	эВ	1,11
FC	Коэффициент нелинейности барьерных емкостей прямосмещенных переходов		0,5
GAMMA	Коэффициент легирования эпитаксиальной области		10^{-11}
IKF (IK)*	Ток начала спада зависимости BF от тока коллектора в нормальном режиме	A	∞
IKR*	Ток начала спада зависимости BR от тока эмиттера в инверсном режиме	A	∞
IRB*	Ток базы, при котором сопротивление базы уменьшается на 50% полного перепада между RB и RBM	A	∞
IS	Ток насыщения при температуре 27°C	A	10^{-16}
ISC (C4)*	Ток насыщения утечки перехода база—коллектор	A	0
ISE (C2)*	Ток насыщения утечки перехода база—эмиттер	A	0
ISS	Обратный ток $p-n$ -перехода подложки	A	0
ITF	Ток, характеризующий зависимость TF от тока коллектора при больших токах	A	0

5. Модели аналоговых компонентов

KF	Коэффициент, определяющий спектральную плотность фликкер-шума		0
MJC (MC)	Коэффициент, учитывающий плавность коллекторного перехода		0,33
MJE (ME)	Коэффициент, учитывающий плавность эмиттерного перехода		0,33
MJS (MS)	Коэффициент, учитывающий плавность перехода коллектор-подложка		0
NC*	Коэффициент неидеальности коллекторного перехода		1,5
NE*	Коэффициент неидеальности перехода база—эмиттер		1,5
NF	Коэффициент неидеальности в нормальном режиме		1
NK	Коэффициент, определяющий множитель Q_b		0,5
NR	Коэффициент неидеальности в инверсном режиме		1
NS	Коэффициент неидеальности перехода подложки		1
PTF	Дополнительный фазовый сдвиг на граничной частоте транзистора $f_{\text{гр}} = 1/(2\pi T_f)$	град.	0
QCO	Множитель, определяющий заряд в эпитаксиальной области	Кл	0
RB	Объемное сопротивление базы (максимальное) при нулевом смещении перехода база—эмиттер	Ом	0
RBM*	Минимальное сопротивление базы при больших токах	Ом	RB
RC	Объемное сопротивление коллектора	Ом	0
RCO	Сопротивление эпитаксиальной области	Ом	0
RE	Объемное сопротивление эмиттера	Ом	0
TF	Время переноса заряда через базу в нормальном режиме	с	0

5. Модели аналоговых компонентов

TR	Время переноса заряда через базу в инверсном режиме	C	0
TRB1	Линейный температурный коэффициент RB	°C ⁻¹	0
TRB2	Квадратичный температурный коэффициент RB	°C ⁻²	0
TRC1	Линейный температурный коэффициент RC	°C ⁻¹	0
TRC2	Квадратичный температурный коэффициент RC	°C ⁻²	0
TRE1	Линейный температурный коэффициент RE	°C ⁻¹	0
TRE2	Квадратичный температурный коэффициент RE	°C ⁻²	0
TRM1	Линейный температурный коэффициент RBM	°C ⁻¹	0
TRM2	Квадратичный температурный коэффициент RBM	°C ⁻²	0
T_ABS	Абсолютная температура	°C	
T_MEASURED	Температура измерений	°C	
T_REL_GLOBAL	Относительная температура	°C	
T_REL_LOCAL	Разность между температурой транзистора и модели-прототипа	°C	
VAF (VA)*	Напряжение Эрли в нормальном режиме	V	∞
VAR (VB)*	Напряжение Эрли в инверсном режиме	V	∞
VJC (PC)	Контактная разность потенциалов перехода база—коллектор	V	0,75
VJE (PE)	Контактная разность потенциалов перехода база—эмиттер	V	0,75
VJS (PS)	Контактная разность потенциалов перехода коллектор—подложка	V	0,75
VO	Напряжение, определяющее перегиб зависимости тока эпитаксиальной области	V	10

5. Модели аналоговых компонентов

VTF	Напряжение, характеризующее зависимость TF от смещения база—коллектор	B	∞
XCJC	Коэффициент расщепления емкости база—коллектор СJC		1
XCJC2	Коэффициент расщепления емкости база—коллектор СJC		1
XTB	Температурный коэффициент BF и BR		0
XTF	Коэффициент, определяющий зависимость TF от смещения база—коллектор		0
XTI (PT)	Температурный коэффициент IS		3

* Только для модели Гуммеля—Пуна.

Примечания.

1. В круглых скобках в левой графе таблицы указаны альтернативные обозначения параметров. Параметр RB для модели Эберса—Молла имеет смысл объемного сопротивления базы, не зависящего от тока базы. Остальные параметры имеют одинаковый смысл для моделей Эберса—Молла и Гуммеля—Пуна.
2. При реализации интегральных n—p—n- и p—n—p-транзисторов на одной подложке n-типа в схеме замещения p—n—p-транзистора (рис. 5.18, а) необходимо изменить полярность диода, включенного между коллектором и подложкой, чтобы диоды транзисторов двух типов были включены одинаково. Сделать это можно лишь при наличии модуля *Device Equation* (см. разд. 5.4).

Статический режим транзистора. Режим описывается следующими соотношениями (см. рис. 5.18, а):

$$\begin{aligned}
 I_b &= \text{Area}(I_{be1}/BF + I_{be2}/BR + I_{bc1}/BR + I_{bc2}); \\
 I_c &= \text{Area}(I_{be1}/Q_b - I_{bc1}/Q_b - I_{bc1}/BR - I_{bc2}); \\
 I_{be1} &= IS [\exp(V_{be}/(NF \cdot V)) - 1]; \\
 I_{be2} &= ISE [\exp(V_{be}/(NE \cdot V)) - 1]; \\
 I_{bc1} &= IS [\exp(V_{bc}/(NR \cdot V)) - 1]; \\
 I_{bc2} &= ISC [\exp(V_{bc}/(NC \cdot V)) - 1]; \\
 Q_b &= Q_1 [1 + (1 + 4Q_2)^{NK}] / 2; \\
 Q_1 &= 1 / (1 - V_{bc} / VAF - V_{be} / VAR), Q_2 = I_{be1} / IKF + I_{bc1} / IKR; \\
 I_s &= \text{Area} \cdot ISS [\exp(V_{js}/(NS \cdot V)) - 1].
 \end{aligned}$$

5. Модели аналоговых компонентов

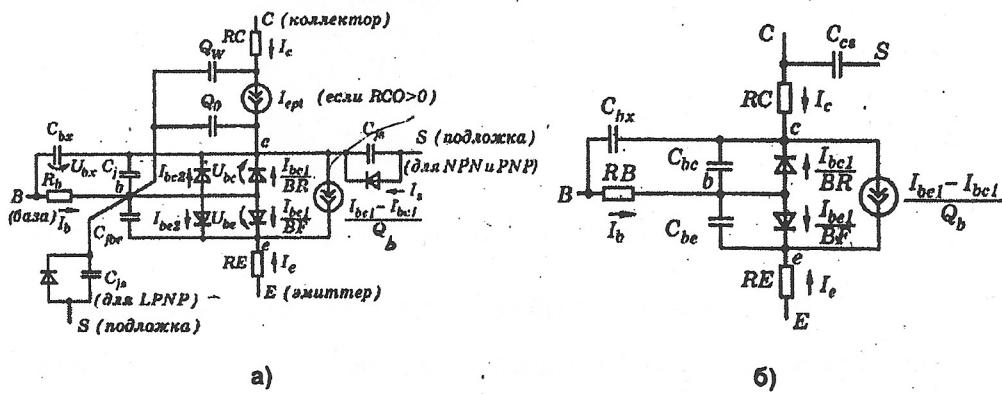


Рис. 5.18. Схема замещения биполярного *n-p-n*-транзистора: а — модель Гуммеля—Пуна; б - передаточная модель Эберса—Молла

На рис 5.18 приняты обозначения: I_b — ток базы; I_c — ток коллектора; I_{bc1} — ток коллектора в нормальном режиме; I_{bc2} — ток коллектора в инверсном режиме; I_{be1} , I_{be2} — составляющие тока перехода база—эмиттер, вызванные неидеальностью перехода; I_s — ток подложки; V_{be} , V_{bc} — напряжения на переходе внутренняя база—эмиттер и внутренняя база—коллектор; V_{bs} — напряжение внутренняя база—подложка; V_{bn} — напряжение внутренняя база—подложка для режима квазинасыщения; V_{bx} — напряжение база—внутренний коллектор; V_{as} — напряжение внутренний коллектор—внутренний эмиттер; V_{es} — напряжение внутренний коллектор—подложка для NPN-транзистора, напряжение внутренняя подложка—коллектор для PNP-транзистора или напряжение внутренняя база—подложка для LPNP-транзистора.

Объемное сопротивление базы R_b характеризуется двумя составляющими. Первая составляющая RB определяет сопротивление вывода базы и сопротивление внешней области базы, которые не зависят от тока базы I_b . Вторая составляющая IRB характеризует сопротивление активной области базы, находящейся непосредственно под эмиттером; это сопротивление зависит от тока I_b . Объемное сопротивление базы R_b определяется следующими выражениями в зависимости от значения параметра IRB :

$$R_b = \begin{cases} RB + (RB - RBM)/(Area \cdot Q_b) & \text{при } IRB = \infty; \\ RB + 3(RB - RBM) \frac{\operatorname{tg} X - X}{X \operatorname{tg}^2 X} / Area & \text{при } IRB > 0, \end{cases}$$

где

$$X = \frac{\sqrt{1+14,59025I_b/(Area \cdot IRB)} - 1}{2,4317 \sqrt{I_b/(Area \cdot IRB)}}.$$

Замечание. В программе PSpice токи, втекающие в транзистор, считаются положительными. Поэтому в активном нормальном режиме в *n-p-n*-структуре $I_c > 0$, $I_b > 0$, $I_e < 0$ (рис. 5.18). Для структуры *p-n-p* все напряжения и токи имеют противоположный знак.

5. Модели аналоговых компонентов

Динамические свойства переходов. Они учтены включением в модель емкостей коллектора, эмиттера и подложки, которые имеют диффузионные и барьерные составляющие. Емкость перехода база—эмиттер равна сумме диффузионной (C_{ibe}) и барьерной (C_{jbe}) составляющих:

$$C_{be} = C_{ibe} + \text{Area} \cdot C_{jbe},$$

где $C_{ibe} = t_f G_{be}$; $G_{be} = dI_{be}/dV_{be}$ — дифференциальная проводимость перехода база—эмиттер в рабочей точке по постоянному току;

$$t_f = TF [1 + XTF (I_{be1}/(I_{be1} + \text{Area} \cdot ITF))^2 \exp(V_{be}/(1,44 VTF))];$$

$$I_{be} = I_{be1} + I_{be2};$$

$$C_{jbe} = \begin{cases} CJE(1 - V_{be}/VJE)^{-MJE} & \text{при } V_{be} \leq FC \cdot VJE; \\ CJE(1 - FC)^{-(1+MJE)} [1 - FC(1 + MJE) + \\ + MJE \cdot V_{be}/VJE] & \text{при } V_{be} > FC \cdot VJE. \end{cases}$$

Емкость перехода база—коллектор расщепляется на две составляющие: емкость между внутренней базой и коллектором:

$$C_{bc} = C_{ibc} + \text{Area} \cdot XCJC \cdot C_{jbc},$$

где $C_{ibc} = TR \cdot G_{bc}$; $G_{bc} = dI_{bc}/dV_{bc}$; $I_{bc} = I_{bc1} + I_{bc2}$;

$$C_{jbc} = \begin{cases} CJC(1 - V_{bc}/VJC)^{-MJC} & \text{при } V_{bc} \leq FC \cdot VJC; \\ CJC(1 - FC)^{-(1+MJC)} [1 - FC(1 + MJC) + \\ + MJC \cdot V_{bc}/VJC] & \text{при } V_{bc} > FC \cdot VJC; \end{cases}$$

и емкость между внешним выводом базы и коллектором:

$$C_{bx} = \text{Area} (1 - XCJC) \cdot C_{jbx},$$

где

$$C_{jbx} = \begin{cases} CJC \cdot (1 - V_{bx}/VJC)^{-MJC} & \text{при } V_{bx} \leq FC \cdot VJC; \\ CJC \cdot (1 - FC)^{-(1+MJC)} [1 - FC(1 + MJC) + MJC \cdot V_{bx}/VJC] & \text{при } V_{bx} > FC \cdot VJC. \end{cases}$$

Емкость коллектор—подложка равна:

$$C_{js} = \begin{cases} \text{Area} \cdot CJS(1 - V_{js}/VJS)^{-MJS} & \text{при } V_{js} \leq 0; \\ \text{Area} \cdot CJS(1 + MJS \cdot V_{js}/VJS) & \text{при } V_{js} > 0. \end{cases}$$

Режим квазинасыщения. Этот режим характеризуется прямым смещением перехода внутренняя база—коллектор, в то время как переход наружная база—коллектор остается смещенным в обратном направлении. В расширенной модели Гуммеля—Пуна этот эффект моделируется с помощью дополнительного управляемого источника тока I_{op} и двух нелинейных емкостей, заряды которых на рис. 5.18,

5. Модели аналоговых компонентов

а обозначены Q_0 и Q_w . Эти изменения вносятся в модель, если задан параметр R_{CO} [32]:

где

$$I_{epi} = \text{Area} \frac{VO\{V_t[K(V_{bc}) - K(V_{bn})] - \ln((1+K(V_{bc}))/(1+K(V_{bn})))\} + V_{bc} - V_{bn}}{R_{CO} \cdot (|V_{bc} - V_{bn}| + VO)};$$

$$Q_0 = \text{Area} \cdot QCO[K(V_{bc}) - 1 - \text{GAMMA}/2], Q_w = \text{Area} \cdot QCO \cdot [K(V_{bn}) - 1 - \text{GAMMA}/2],$$

$$K(v) = \sqrt{1 + \text{GAMMA} \cdot \exp(v/V_t)}.$$

Температурная зависимость. Эта зависимость параметров элементов эквивалентной схемы биполярного транзистора устанавливается с помощью следующих выражений:

$$IS(T) = IS \cdot \exp[EG(T)/V_t(T)(T/T_{nom}-1)](T/T_{nom})^{xti};$$

$$ISE(T) = (ISE/b_i) \cdot \exp[EG(T)/(NE \cdot V_t(T))(T/T_{nom}-1)] \cdot (T/T_{nom})^{xti/NE};$$

$$ISC(T) = (ISC/b_i) \cdot \exp[EG(T)/(NC \cdot V_t(T))(T/T_{nom}-1)] \cdot (T/T_{nom})^{xti/NC};$$

$$ISS(T) = (ISS/b_i) \cdot \exp[EG(T)/(NS \cdot V_t(T))(T/T_{nom}-1)] \cdot (T/T_{nom})^{xti/NS};$$

$$BF(T) = BF \cdot b_i, BR(T) = BR \cdot b_i, b_i = (T/T_{nom})^{xtb};$$

$$RE(T) = RE[1 + TRE1(T-T_{nom}) + TRE2(T-T_{nom})^2];$$

$$RB(T) = RB[1 + TRB1(T-T_{nom}) + TRB2(T-T_{nom})^2];$$

$$RBM(T) = RBM[1 + TRM1(T-T_{nom}) + TRM2(T-T_{nom})^2];$$

$$RC(T) = RC[1 + TRC1(T-T_{nom}) + TRC2(T-T_{nom})^2];$$

$$VJE(T) = VJE \cdot T/T_{nom} - 3V_t \cdot \ln(T/T_{nom}) - EG(T_{nom}) \cdot T/T_{nom} + EG(T);$$

$$VJC(T) = VJC \cdot T/T_{nom} - 3V_t \cdot \ln(T/T_{nom}) - EG(T_{nom}) \cdot T/T_{nom} + EG(T);$$

$$VJS(T) = VJS \cdot T/T_{nom} - 3V_t \cdot \ln(T/T_{nom}) - EG(T_{nom}) \cdot T/T_{nom} + EG(T);$$

$$CJE(T) = CJE(1 + MJE[0,0004(T-T_{nom}) + 1 - VJE(T)/VJE]);$$

$$CJC(T) = CJC(1 + MJC[0,0004(T-T_{nom}) + 1 - VJC(T)/VJC]);$$

$$CJS(T) = CJS(1 + MJS[0,0004(T-T_{nom}) + 1 - VJS(T)/VJS]);$$

$$KF(T) = KF \cdot VJC(T)/VJC, AF(T) = AF \cdot VJC(T)/VJC.$$

Зависимость EG от температуры описана в разд. 5.2.1.

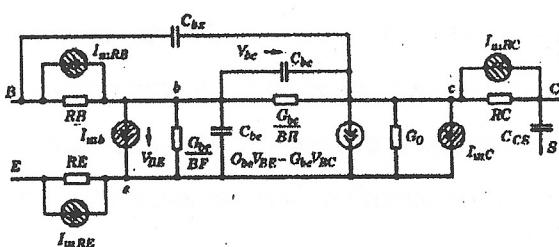


Рис. 5.19. Линейная схема замещения биполярного транзистора с включением источников шума

Линейная схема замещения биполярного транзистора. Схема приведена на рис. 5.19. В нее дополнительно включены источники флюктуационных то-

5. Модели аналоговых компонентов

ков. Термальные шумы I_{wRB} , I_{wRC} и I_{wRE} , создаваемые резисторами R_b , RC и RE , имеют спектральные плотности

$$S_{RB} = 4kT/R_b, S_{RC} = 4kT/(RC/Area), S_{RE} = 4kT/(RE/Area).$$

Источники тока I_{wb} , I_{wc} , характеризующие дробовой и фликкер-шумы в цепях базы и коллектора, имеют соответственно спектральные плотности

$$S_b = 2qI_b + KF \cdot I_b^{AF}/f, S_c = 2qI_c.$$

Скалярный коэффициент Area. Он позволяет учесть параллельное соединение однотипных транзисторов, для чего в приведенной выше модели изменяются следующие параметры:

$IS=IS\cdot Area$, $ISE=ISE\cdot Area$, $ISC=ICS\cdot Area$, $ISS=ISS\cdot Area$, $IKF=IKF\cdot Area$,
 $IKR=IKR\cdot Area$, $IRB=IRB\cdot Area$, $ITF=ITF\cdot Area$, $CJC=CJC\cdot Area$, $CJE=CJE\cdot Area$,
 $CJS=CJS\cdot Area$, $RE=RE/Area$, $RC=RC/Area$, $QCO=QCO\cdot Area$.

Значение **Area** указывается в задании на моделирование при включении транзистора в схему, по умолчанию **Area=1**.

В качестве примера приведем список параметров модели Гуммеля-Пуна биполярного транзистора КТ316Д:

```
.model KT316D NPN(IS=2.75f XTI=3 EG=1.11 VAF=96 BF=136.5 NE=2.496
+ ISE=12.8pA IKF=97.23m XTB=1.5 VAR=55 BR=.66 NC=2 ISC=15.5p IKR=.12
+ RB=70.6 RC=8.4 CJC=4.1pF VJC=.65 MJC=.33 FC=.5 VJE=.69 CJE=1.16pF
+ MJE=.33 TR=27.8n TF=79.0p ITF=.151 VTF=25 TF=2)
```

б) Транзисторы СВЧ

Встроенные модели транзисторов справедливы на не очень высоких частотах (до 30...100 МГц в зависимости от типа транзистора). Существует несколько способов их модернизации для учета особенностей транзисторов на высоких частотах. В связи с тем, что эти методы общие как для биполярных, так и других транзисторов, примеры будут посвящены не только биполярным транзисторам.

1. Нелинейные макромодели на физическом уровне. В моделях транзисторов на высоких частотах должны в первую очередь приниматься во внимание индуктивности выводов и паразитные емкости между выводами и корпусом транзистора. Поэтому наиболее естественно создать макромодель высокочастотного транзистора на основе встроенной модели, дополнив ее пассивными LC-цепями. Существует большое количество конфигураций этих цепей, учитывающих конструктивные особенности каждого транзистора. В качестве примера приведем макромодель транзистора 2T934А (рис. 5.20):

```
.subckt 2T934A 1 2 3
Q1 4 5 6 Q
```