

Лабораторная работа № 4

Изучение способов задания исходной рабочей точки в усилительных каскадах на биполярных транзисторах

Цель работы – освоение методики получения входных и выходных вольт-амперных характеристик биполярных транзисторов и расчёта их основных параметров; изучение способов задания исходной рабочей точки в усилительных каскадах на биполярных транзисторах; изучение методов стабилизации положения исходной рабочей точки.

4.1. Краткие теоретические сведения

Биполярный транзистор (БТ) – полупроводниковый прибор содержащий три полупроводниковые области с чередующимися типами проводимости, разделённые двумя взаимодействующим $p-n$ -переходами. В зависимости от порядка чередования областей различают транзисторы $p-n-p$ - и $n-p-n$ - типов. Структура кристалла и УГО данных типов транзисторов представлены на рис. 4.1. Среднюю область кристалла называют базой (Б), одну крайнюю область – эмиттером (Э), а другую коллектором (К). Соответственно один переход называется эмиттерным (1) другой – коллекторным (2). Часть базы, находящаяся между запирающими слоями переходов называется активной.

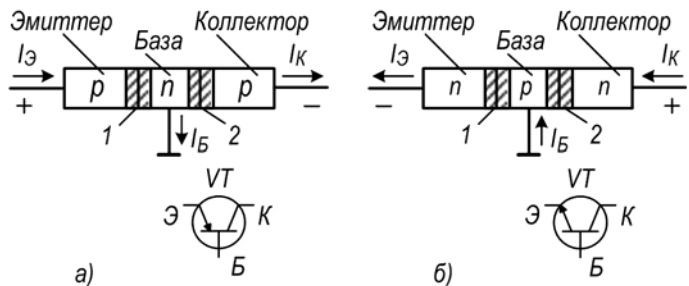


Рис.4.1 Структура биполярных транзисторов и их УГО (внизу): а) $p-n-p$ -типа; б) $n-p-n$ -типа

Принцип действия обоих типов БТ одинаков. Однако, вследствие того, что порядок чередования зон отличается, и основные носители в зонах имеют противоположные знаки, полярность внешних источников напряжения также должна иметь противоположные знаки (рис.4.1).

Поскольку БТ включают во входную и выходную цепи с помощью трёх выводов (электродов), то один электрод должен быть общим для обеих цепей. Соответственно различают схемы с общей базой (ОБ), с общим эмиттером (ОЭ), с общим коллектором (ОК), которые приведены на рис. 4.2.

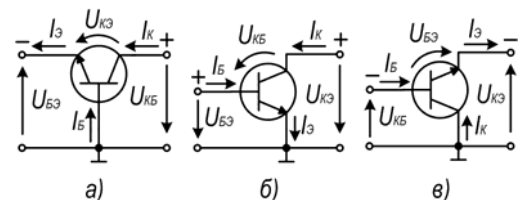


Рис.4.2 Схемы включения БТ
а) ОБ; б) ОЭ; в) ОК

В зависимости от полярности и величины напряжений во входной и выходной цепях возможны следующие режимы работы БТ:

- отсечки* – напряжения на обоих переходах обратные (транзистор закрыт);
- насыщения* – напряжения на обоих переходах прямые (транзистор открыт);
- активный* – напряжение на эмиттерном переходе прямое, а на коллекторном – обратное (транзистор открыт);
- инверсный* – напряжение на коллекторном переходе прямое, а на эмиттерном – обратное (транзистор открыт).

На рисунке 4.2 полярность электродов указана для активного режима.

Статические характеристики биполярного транзистора – это графические зависимости между его напряжениями и токами. Для построения характеристик из четырех переменных две выражают как функции оставшихся. Наиболее часто используется система

H -параметров, в которой принято

$$\begin{cases} U_{\text{ВХ}} = f_1(I_{\text{ВХ}}, U_{\text{ВЫХ}}), \\ I_{\text{ВЫХ}} = f_2(I_{\text{ВХ}}, U_{\text{ВЫХ}}). \end{cases} \quad (4.1)$$

Из (4.1) в статическом режиме можно получить четыре семейства характеристик. Из них на практике обычно используются *входная* ($U_{\text{ВХ}} = f(I_{\text{ВХ}})|_{U_{\text{ВЫХ}}=\text{const}}$) и *выходная* ($I_{\text{ВЫХ}} = f(U_{\text{ВЫХ}})|_{I_{\text{ВХ}}=\text{const}}$) вольт-амперные характеристики, которые однозначно определяют взаимосвязь между напряжениями и токами транзистора. Внешний вид характеристик зависит от схемы включения транзистора.

Транзистор при конкретной схеме включения может рассматриваться как активный нелинейный четырёхполюсник (рис.4.3а). На низких частотах его параметры имеют активный характер.

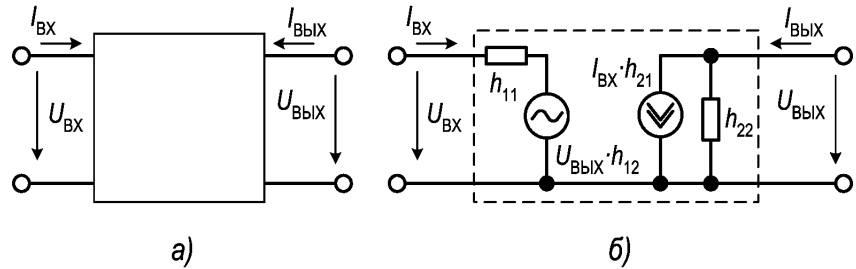


Рис.4.3 Четырёхполюсник (а) и малосигнальная эквивалентная схема БТ в h -параметрах (б)

При малых сигналах их можно считать линейными. В этом случае H -параметры переходят в h -параметры, и (4.1) преобразуется к системе линейных уравнений, описывающих изменения напряжений и токов транзистора

$$\begin{cases} \Delta U_{\text{ВХ}} = h_{11} \Delta I_{\text{ВХ}} + h_{12} \Delta U_{\text{ВЫХ}}; \\ \Delta I_{\text{ВЫХ}} = h_{21} \Delta I_{\text{ВХ}} + h_{22} \Delta U_{\text{ВЫХ}}, \end{cases} \quad (4.2)$$

где

$$h_{11} \approx \left. \frac{\Delta U_{\text{ВХ}}}{\Delta I_{\text{ВХ}}} \right|_{U_{\text{ВЫХ}}=\text{const}} \quad \text{– дифференциальное входное сопротивление}; \quad (4.2\text{а})$$

$$h_{12} \approx \left. \frac{\Delta U_{\text{ВХ}}}{\Delta U_{\text{ВЫХ}}} \right|_{I_{\text{ВХ}}=\text{const}} \quad \text{– коэффициент обратной передачи (связи) по напряжению}; \quad (4.2\text{б})$$

$$h_{21} \approx \left. \frac{\Delta I_{\text{ВЫХ}}}{\Delta I_{\text{ВХ}}} \right|_{U_{\text{ВЫХ}}=\text{const}} \quad \text{– коэффициент прямой передачи тока (усиление по току)}; \quad (4.2\text{в})$$

$$h_{22} \approx \left. \frac{\Delta I_{\text{ВЫХ}}}{\Delta U_{\text{ВЫХ}}} \right|_{I_{\text{ВХ}}=\text{const}} \quad \text{– дифференциальная выходная проводимость}. \quad (4.2\text{г})$$

Преимущество h -параметров состоит в удобстве их экспериментального определения в режимах, близких к режимам работы транзистора в практических схемах.

В соответствии с уравнениями (4.2) биполярный транзистор можно представить малосигнальной эквивалентной схемой, показанной на рис. 4.3б. Эквивалентная схема транзистора в h -параметрах справедлива для любой схемы включения транзистора. Конкретные значения h -параметров зависят от схемы включения транзистора, т.е. от того, какие токи и напряжения являются входными и выходными, и обозначаются соответствующими индексами: «б» – для схемы с ОБ, «э» – с ОЭ, «к» – с ОК.

Значения h -параметров приводятся в справочниках, их также можно приближённо

определить графоаналитическим методом по статическим характеристикам транзисторов. Для определения всех h -параметров необходимо иметь не менее двух характеристик каждого семейства (входных и выходных). Параметры рассчитываются по конечным приращениям вблизи рабочей точки транзистора.

В качестве примера рассмотрим определение h -параметров для транзистора, включённого по схеме с ОЭ с помощью представленных на рис. 4.4 соответствующих входных (а) и выходных (б) вольт-амперных характеристик.

Для определения параметров $h_{11э}$ и $h_{12э}$ на семействе входных характеристик (рис.4.4, а) задаются рабочей точкой $A(I_{Бр}; U_{БЭр.})$, через которую проводят касательную BB' . После этого строят треугольник $BB'C$, и в соответствии с (4.2), а, б находят:

$$h_{11э} = \frac{\Delta U_{БЭ}}{\Delta I_{Б}} = \frac{BC}{B'C}; \quad h_{12э} = \frac{\Delta U'_{БЭ}}{\Delta U_{КЭ}} = \frac{AA'}{U_{КЭ2} - U_{КЭ1}}. \quad (4.3)$$

Следует отметить, что ввиду малости $\Delta U'_{БЭ}$ (< 1 мВ) определить его значение по входным ВАХ достаточно сложно, поэтому при практических расчётах параметр $h_{12э}$ обычно во внимание не принимают.

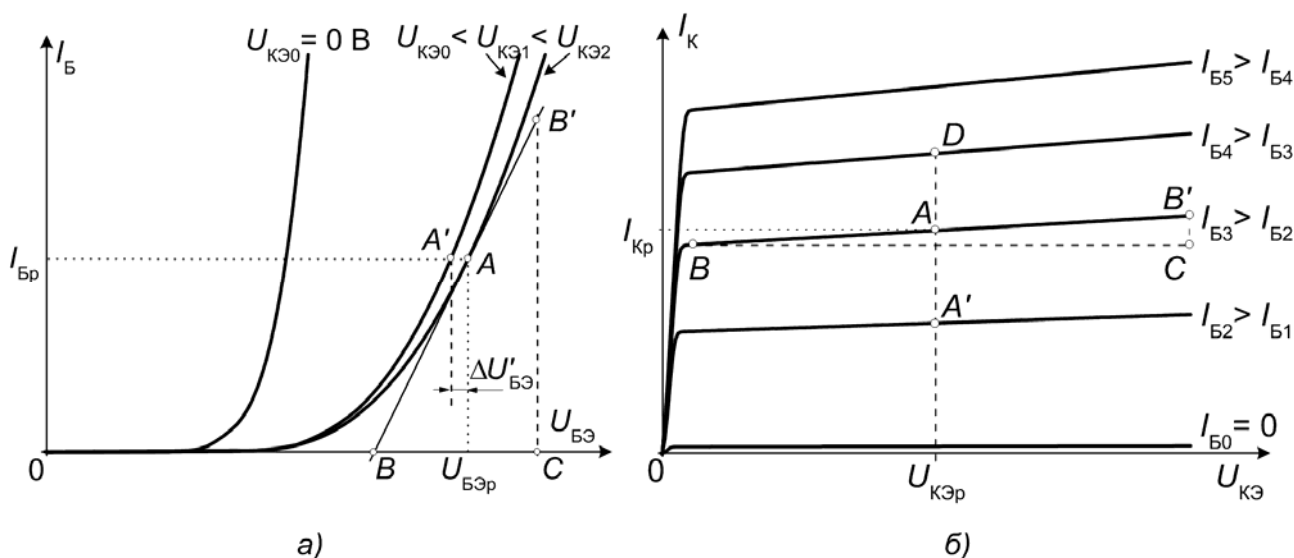


Рис.4.4 Статические характеристики биполярного транзистора: а – входные, б – выходные

Семейство выходных ВАХ (рис.4.4, б) используют для определения параметров $h_{21э}$ и $h_{22э}$. Задавшись значениями тока I_{Kr} и напряжения U_{CEr} (рабочая точка A), проводят касательную BB' (на рис. 4.4, б она совпадает с прямолинейным участком ВАХ, соответствующей входному току $I_{Bx} = I_{B3}$), строят треугольник $BB'C$, и находят (4.2), в, г:

$$h_{21э} = \frac{\Delta I_K}{\Delta I_B} = \frac{A'D}{I_{B4} - I_{B2}}; \quad h_{22э} = \frac{\Delta I'_K}{\Delta U_{КЭ}} = \frac{B'C}{BC}. \quad (4.4)$$

Рабочая точка на всех характеристиках должна соответствовать одним и тем же выбранным значениям тока и напряжения. В соответствии с этим требованием необходимо, чтобы $U_{CE2} = U_{CEр.}$; $I_{B3} = I_{Br.}$

Аналогичным образом определяют h -параметры для схем с ОБ и ОК.

Для нормальной работы любого усилительного каскада необходимо установить определённые токи и напряжения во входной и выходной цепях транзистора при от-

сутствии входного сигнала. Такой режим называют *статическим* (режим по постоянному току, режим покоя).

Точка, координаты которой на вольт-амперных характеристиках транзистора определяют напряжения и токи в его электродах, называется *рабочей*. При отсутствии входного сигнала эта точка называется *исходной рабочей точкой*. Исходная рабочая точка (И.Р.Т. – т. А, см. рис.4.5) определяет режим работы транзистора по постоянному току, класс усиления и, как следствие, входные и выходные амплитуды токов и напряжений

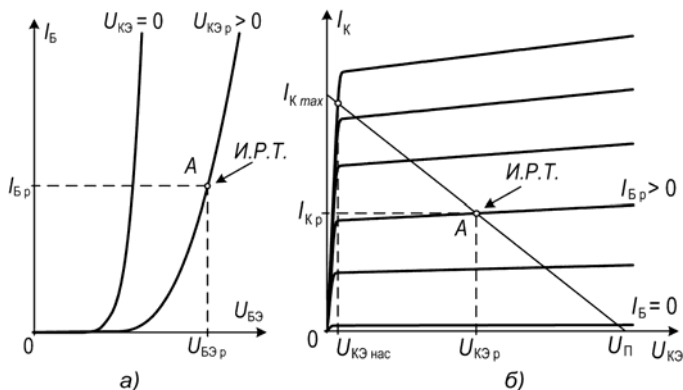


Рис.4.5 Входные (а) и выходные (б) характеристики транзистора

максимально возможные для линейного усиления. Напряжения и токи, а также внешние по отношению к усилительному прибору электрические цепи, обеспечивающие заданное положение исходной рабочей точки, называются соответственно *напряжениями, токами и цепями смещения*. Напряжения и токи смещения часто называют *начальными*.

Способы задания исходной рабочей точки

На практике получили распространение два способа обеспечения заданного положения рабочей точки биполярного транзистора по постоянному току не зависимо от схемы включения транзистора по переменному току: *схема с фиксированным током базы* (рис.4.6а) и *схема с фиксированным напряжением база – эмиттер* (схема с фиксированным потенциалом базы) (рис.4.6б).

В схеме на рис. 4.6а режим по постоянному току задаётся с помощью резисторов R_B , R_K и источника питания U_{Π} . Смещение эмиттерного перехода осуществляется за счёт протекания тока базы I_{Bp} от источника питания U_{Π} через резистор R_B . Задаваясь положением рабочей точки на ВАХ транзистора (рис.4.5), номинальные значения резисторов рассчитывают по формулам:

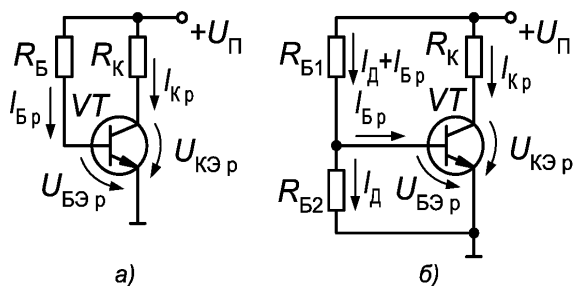


Рис.4.6 Способы задания исходной рабочей точки

$$R_K = \frac{U_{\Pi} - U_{KЭp.}}{I_{Kp.}}; \tag{4.5}$$

$$R_B = \frac{U_{\Pi} - U_{БЭp.}}{I_{Bp.}}. \tag{4.6}$$

В схеме на рис. 4.6б режим покоя обеспечивается фиксированием напряжения $U_{БЭp.}$ между базой и эмиттером транзистора с помощью источника питания и делителя напряжения из резисторов R_1 , R_2 . Сопротивления резисторов R_1 и R_2 при заданном токе базы $I_{Bp.}$, соответствующем напряжению $U_{БЭp.}$, определяют по формулам:

$$R_{Б1} = \frac{U_{\Pi} - U_{БЭр.}}{I_{Д} + I_{Бр.}}; R_{Б2} = \frac{U_{БЭр.}}{I_{Д}}, \quad (4.7)$$

где $I_{Д}$ – ток делителя, который выбирается из условия обеспечения необходимой стабильности режима работы. Обычно принимают $I_{Д} = (2...5)I_{Бр.}$. Сопротивление резистора $R_{К}$ рассчитывается по формуле (4.5).

Методы стабилизации положения исходной рабочей точки

Недостатками данных схем (рис.4.6) является сильная зависимость положения исходной рабочей точки от различных дестабилизирующих факторов (например, изменения температуры, напряжения питания и т.п.), поэтому на практике для стабилизации положения И.Р.Т. часто используют отрицательную обратную связь параллельную по напряжению (рис.4.7а) или последовательную по току (рис.4.7б).

В схеме на рис.4.7а номинальные значения резисторов рассчитывают по формулам:

$$R_{К} = \frac{U_{\Pi} - U_{КЭр.}}{I_{Кр} + I_{Бр.}}; \quad (4.8)$$

$$R_{Б} = \frac{U_{КЭр.} - U_{БЭр.}}{I_{Бр.}}. \quad (4.9)$$

В схеме на рис.4.7б номинальные значения резисторов рассчитывают по формулам:

$$R_{Б1} = \frac{U_{\Pi} - U_{Б}}{I_{Д} + I_{Бр.}}; R_{Б2} = \frac{U_{Б}}{I_{Д}}, \quad (4.10)$$

где потенциал базы $U_{Б} = U_{БЭр.} + U_{Эр.}$; $U_{Эр.}$ – потенциал эмиттера; $I_{Д}$ – ток делителя. Исходя из условия обеспечения необходимой стабильности режима работы усилительного каскада, обычно принимают $I_{Д} = (3...10)I_{Бр.}$, $U_{Эр.} = (0,1...0,3)U_{\Pi}$.

Сопротивления резисторов $R_{Э}$ и $R_{К}$ рассчитывают по формулам:

$$R_{Э} = \frac{U_{Эр.}}{I_{Кр.} + I_{Бр.}}; R_{К} = \frac{U_{\Pi} - (U_{КЭр.} + R_{Э}(I_{Кр.} + I_{Бр.}))}{I_{Кр.}}; \quad (4.11)$$

4.2. Порядок выполнения работы

Задание 1: Получение входных и выходных вольт-амперных характеристик для схемы включения биполярного транзистора с общим эмиттером

а) собрать схему для получения статических ВАХ биполярного транзистора, включённого по схеме с ОЭ (рис. 4.8);

б) получить выходные ВАХ транзистора, согласовав с преподавателем диапазон изменения входного тока и значение максимального выходного напряжения, (несколько выше напряжения питания усилительного каскада). При

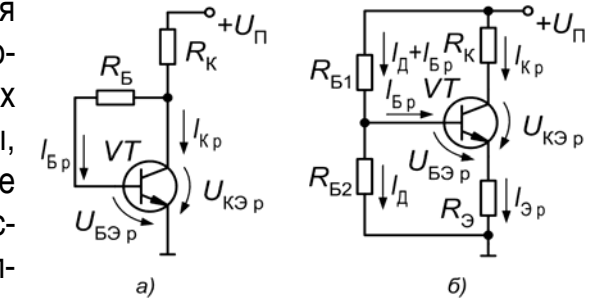


Рис.4.7 Способы стабилизации положения И.Р.Т. в усилительных каскадах на биполярных транзисторах

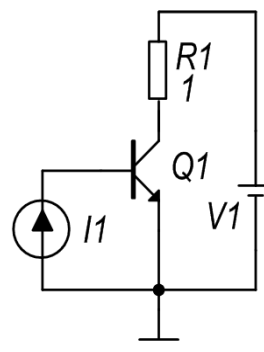


Рис.4.8 Схема для получения входных и выходных ВАХ БТ включённого по схеме с ОЭ

этом необходимо следить, чтобы выходной ток $I_K = (10...15)$ мА. Для построения характеристик выбрать команду меню **Analysis/DC...**, в выведенном на экран окне пара-

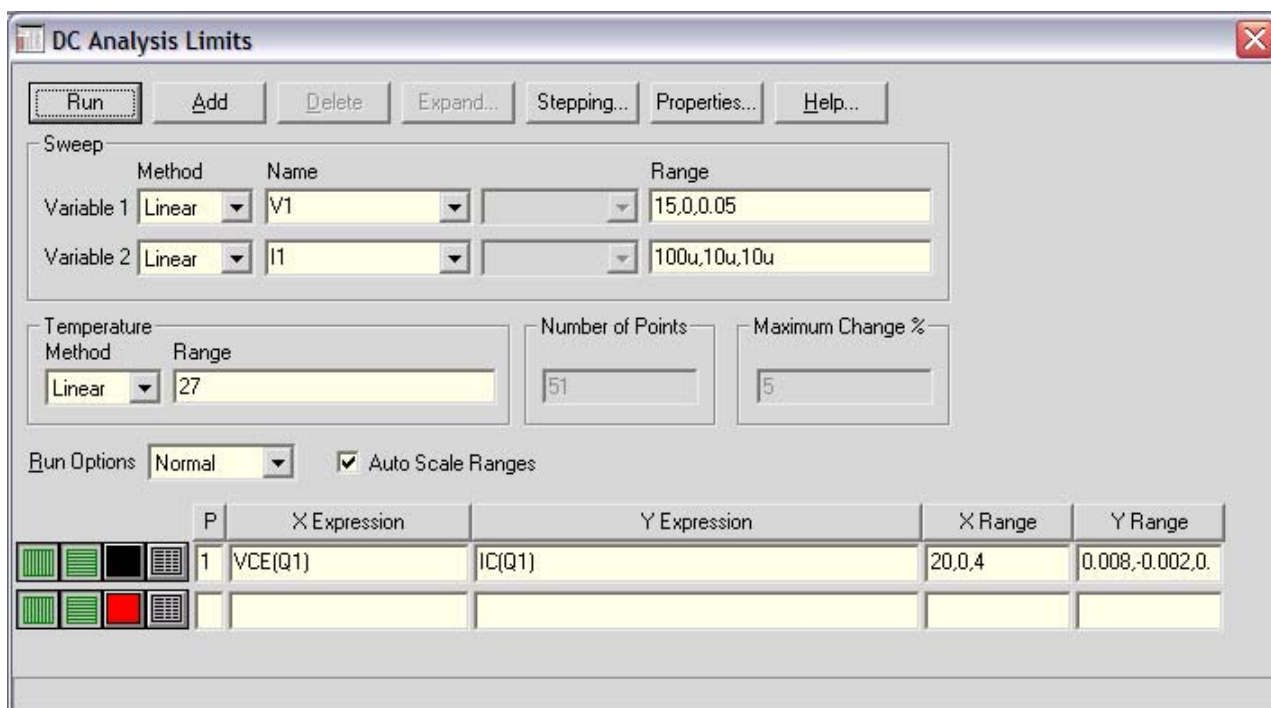


Рис.4.9 Окно параметров моделирования для получения выходных ВАХ транзистора

метров моделирования (**DC Analysis Limits**) задать необходимые параметры моделирования (см. рис.4.9);

в) получить входные ВАХ транзистора аналогично пункту б). Значение максимального входного тока должно быть несколько выше, заданного в предыдущем пункте, значениях

выходного напряжения: $U_{\text{ВЫХ}} = 0; \frac{U_{\text{П}}}{2}; U_{\text{П}}$. При задании параметров моделирования руководствоваться рис.4.10;

Задание 2: Расчёт цепей смещения для задания исходной рабочей точки

а) для схем, представленных на рис.4.6, 4.7, рассчитать номинальные значения сопротивлений резисторов, обеспечивающий заданный режим по постоянному току;

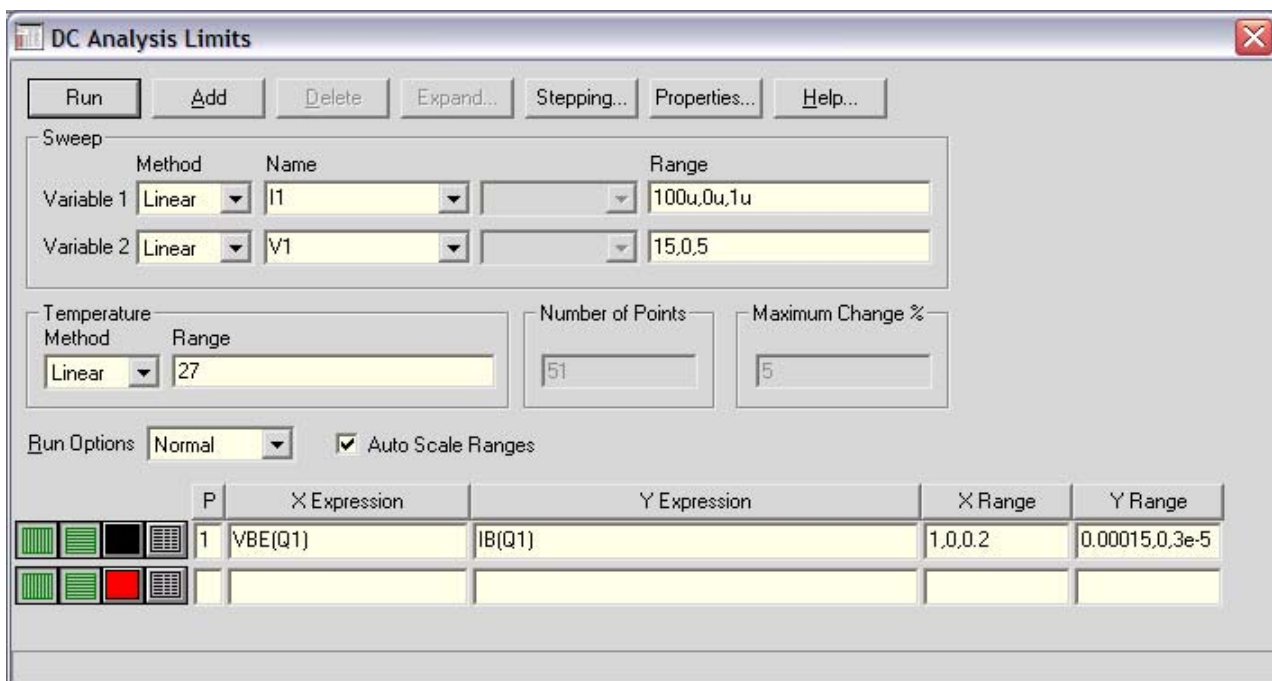


Рис.4.10 Окно параметров моделирования для получения входных ВАХ транзистора

б) собрать схемы (рис.4.6, 4.7) и сравнить экспериментальные и расчётные токи и напряжения, соответствующие заданной исходной рабочей точке.

Замечание: Следует помнить, что в программе Micro-CAP рассчитываются значения потенциалов (т.е. напряжений относительно точки с нулевым потенциалом) соответствующих узлов, поэтому для схемы с эмиттерной стабилизацией (рис.4.7б) напряжения база–эмиттер ($U_{БЭ}$) и коллектор–эмиттер ($U_{КЭ}$) определяются по формулам

$$U_{БЭ} = U_{Б} - U_{Э}; \quad U_{КЭ} = U_{К} - U_{Э}, \quad (4.12)$$

где $U_{Б}$, $U_{Э}$ и $U_{К}$ – потенциалы базы, эмиттера и коллектора соответственно.

Задание 3: Определение влияния изменения напряжения питания на положение исходной рабочей точки

а) изменить напряжение питания на 10–20%;

б) измерить все токи и напряжения, соответствующие новому положению рабочей точки, в схемах рис.4.6, 4.7;

в) рассчитать относительное изменение коллекторного тока и напряжения коллектор–эмиттер по соответствующим формулам

$$\delta_{I_{К}} = \left| 1 - \frac{I_{К}}{I_{К\text{ И.Р.Т.}}} \right| \times 100\%; \quad \delta_{U_{КЭ}} = \left| 1 - \frac{U_{КЭ}}{U_{КЭ\text{ И.Р.Т.}}} \right| \times 100\%, \quad (4.13)$$

где индекс И.Р.Т. соответствует значениям токов и напряжений, измеренных в п.б) Задания 2. Для схемы с эмиттерной стабилизацией (рис.4.7б) напряжения $U_{БЭ}$ и $U_{КЭ}$ определяются по формулам (4.12);

г) сравнить относительные изменения соответствующих величин для различных схем и сделать выводы.

Задание 4: Определение влияния температуры на положение исходной рабочей точки

а) установив исходное значение напряжения питания, задать рабочую температуру транзистора $t_1^{\circ} = 50^{\circ}\text{C}$ (**T_ABS: 50**) (см. рис.4.11)

б) выполнить пункты б) – г) Задания 3;

в) установить исходное значение температуры транзистора (**T_ABS: 27** (или **undefined**)) (см. рис.4.11).

Задание 5: Определение влияния коэффициента передачи базового тока на положение исходной рабочей точки

а) изменить коэффициент передачи (**BF**, см. рис.4.11) базового тока транзистора на 30–50%;

б) выполнить пункты б) – г) Задания 3;

в) установить исходное значение коэффициента передачи базового тока транзистора.

4.3. Контрольные вопросы

1. Чем различаются режимы работы биполярного транзистора?
2. Перечислите схемы включения биполярного транзисторов.
3. Что собой представляют статические характеристики биполярных транзисторов?
4. Какой физический смысл имеют h -параметры биполярных транзисторов?
5. Как по вольт-амперным характеристикам определяются h -параметры БТ?
6. Что называют рабочей точкой?
7. Как задаётся рабочий режим транзистора по постоянному току?
8. Какие достоинства и недостатки имеют схемы представленные на рис.4.6?

9. Как осуществляется стабилизация положения рабочей точки в усилительном каскаде на биполярном транзисторе?
10. Какие достоинства и недостатки имеют схемы с ООС представленные на рис.4.7?
11. Как отражается на положении рабочей точки изменение напряжения питания?
12. Как изменяется положение рабочей точки при изменении температуры?
13. Какое влияние на положение рабочей точки оказывает изменение коэффициента передачи базового тока?
14. В какой из изученных схем относительные изменения токов или напряжений оказываются наименьшими при наличии дестабилизирующих факторов? Почему?

IS	5P	BF	200	NF	1.2
VAF	100	IKF	100M	ISE	2P
NE	1.5	BR	2	NR	1
VAR	0	IKR	35	ISC	10F
NC	2	NK	500M	ISS	0
NS	1	RE	500M	RB	0
RBM	0	IRB	0	RC	1M
CJE	40P	VJE	700M	MJE	500M
CJC	30P	VJC	700M	MJC	500M
XCJC	1	CJS	0	VJS	750M
MJS	0	FC	500M	TF	400P
XTF	500M	VTF	10	ITF	10M
PTF	0	TR	200N	EG	1.11
XTB	0	XTI	3	TRE1	0
TRE2	0	TRB1	0	TRB2	0
TRM1	0	TRM2	0	TRC1	0
TRC2	0	KE	0	AF	1
T_MEASURED	undefined	T_ABS	50	T_REL_GLOBAL	undefined
T_REL_LOCAL	undefined				

Рис.4.11 Окно параметров транзистора:

BF – максимальный статический коэффициент передачи базового тока;

T_ABS – рабочая температура транзистора (**undefined** соответствует 27°C)