

## ИССЛЕДОВАНИЕ ЧАСТОТНЫХ ЗАВИСИМОСТЕЙ МАЛОСИГНАЛЬНЫХ Y-ПАРАМЕТРОВ БИПОЛЯРНЫХ ТРАНЗИСТОРОВ

**Цель лабораторной работы.** Освоение техники моделирования электронных схем в режиме анализа по переменному току. Изучение методики измерения комплексных малосигнальных  $Y$ -параметров биполярного транзистора.

### 3.1. Методические указания

При малой амплитуде гармонического сигнала транзистор можно рассматривать как линейный четырёхполюсник, который описывается следующей системой уравнений:

$$\begin{cases} \dot{I}_1 = \dot{Y}_{11}\dot{U}_1 + \dot{Y}_{12}\dot{U}_2; \\ \dot{I}_2 = \dot{Y}_{21}\dot{U}_1 + \dot{Y}_{22}\dot{U}_2. \end{cases}$$

Здесь  $\dot{U}_1, \dot{U}_2$  – комплексные амплитуды напряжений на входе и выходе четырёхполюсника;  $\dot{I}_1, \dot{I}_2$  – комплексные амплитуды токов, втекающих в четырёхполюсник;  $\dot{Y}_{11}, \dot{Y}_{12}, \dot{Y}_{21}, \dot{Y}_{22}$  – комплексные малосигнальные  $Y$ -параметры. Из этих уравнений следуют выражения для  $Y$ -параметров, которые и определяют методику их измерения:

$$\begin{aligned} \dot{Y}_{11} = \dot{I}_1 / \dot{U}_1 \quad \text{при } \dot{U}_2 = 0, & \quad \dot{Y}_{12} = \dot{I}_1 / \dot{U}_2 \quad \text{при } \dot{U}_1 = 0, \\ \dot{Y}_{21} = \dot{I}_2 / \dot{U}_1 \quad \text{при } \dot{U}_2 = 0, & \quad \dot{Y}_{22} = \dot{I}_2 / \dot{U}_2 \quad \text{при } \dot{U}_1 = 0. \end{aligned}$$

Таким образом, для измерения параметров  $\dot{Y}_{11}$  и  $\dot{Y}_{21}$  необходимо создать режим короткого замыкания по выходу транзистора, а для измерения параметров  $\dot{Y}_{12}$  и  $\dot{Y}_{22}$  – по входу. Для того чтобы при измерении обеспечить необходимый рабочий режим транзистора по постоянному току, короткое замыкание создаётся только для высокочастотного напряжения. Схемы моделей таких измерительных установок приведены на рис. 3.1 – 3.4. Здесь короткое замыкание на частоте сигнала создаётся с помощью блокировочных конденсаторов большой ёмкости, включённых между соответствующим электродом транзистора и «землёй». Испытательный сигнал подаётся от источника (генератора) через разделительный конденсатор. Питающие постоянные напряжения подаются через дроссели – катушки индуктивности, имеющие большое индуктивное сопротивление на частоте сигнала. Это предотвращает попадание высокочастотного сигнала в цепи питания.

Измерение параметров  $\dot{Y}_{11}$  и  $\dot{Y}_{21}$  биполярного транзистора, включённого по схеме с общим эмиттером (ОЭ), производится с помощью схемы, изображённой

ной на рис. 3.1. Два источника напряжения  $V1$  и  $V2$  обеспечивают заданный режим по постоянному току, источник синусоидального напряжения  $Signal$  создаёт испытательный сигнал, конденсатор  $C1$  является разделительным, а конденсатор  $C2$  – блокировочным. При выборе полярности источников  $V1$  и  $V2$  необходимо учитывать, что для транзистора типа  $n-p-n$  на базу и коллектор должно подаваться положительное напряжение (как показано на рис. 3.1), а для транзистора типа  $p-n-p$  – отрицательное. Для измерения параметров  $\dot{Y}_{12}$  и  $\dot{Y}_{22}$  используется схема, показанная на рис. 3.2, которая отличается от схемы на рис. 3.1 тем, что источник испытательного сигнала через разделительный конденсатор  $C2$  подключён к коллектору транзистора, а база транзистора через блокировочный конденсатор  $C1$  соединена с «землёй».

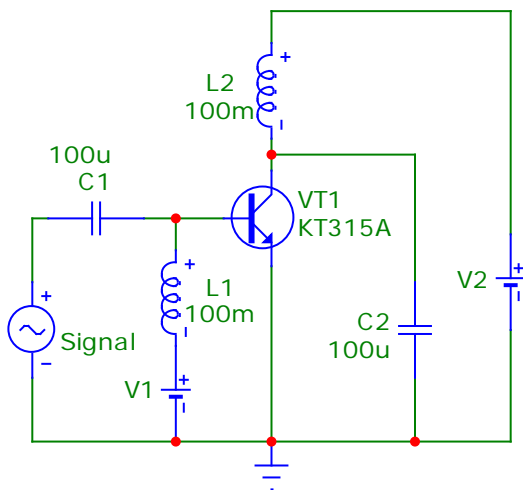


Рис. 3.1. Схема измерения параметров  $Y_{11}$  и  $Y_{21}$  транзистора, включённого с ОЭ

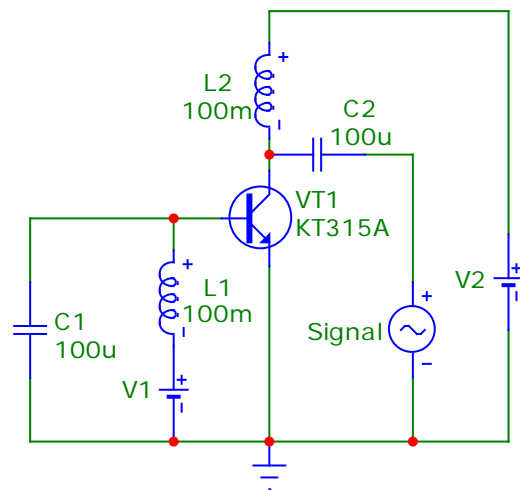


Рис. 3.2. Схема измерения параметров  $Y_{12}$  и  $Y_{22}$  транзистора, включённого с ОЭ

Измерение  $Y$ -параметров в интервале частот производится в режиме анализа по переменному току (**Analysis>AC**). Значения  $Y$ -параметров вычисляются как отношения комплексных амплитуд токов и напряжений соответствующих электродов транзистора. Например, входная проводимость  $\dot{Y}_{11}$  транзистора, включённого по схеме с ОЭ, определяется как отношение комплексной амплитуды тока базы к комплексной амплитуде напряжения база-эмиттер. В системе Micro-Cap это выражение записывается в следующем виде:

$$I_b(VT1)/V_{be}(VT1).$$

Аналогично параметр  $\dot{Y}_{21}$  (проводимость прямой передачи или крутизна транзистора), равный отношению комплексной амплитуды тока коллектора к комплексной амплитуде напряжения база-эмиттер, определяется как

$$I_c(VT1)/V_{be}(VT1).$$

Определённые таким образом  $Y$ -параметры можно использовать двумя способами:

- непосредственно указать в строке **Y Expression** окна задания параметров;

- присвоить их значения вспомогательным переменным, которые удобно обозначить как Y11, Y21 и т.д., и в строке **Y Expression** указать соответствующую переменную.

Определение вспомогательных переменных производится с помощью оператора *.define* (*определить*), который записывается в текстовом окне<sup>1)</sup>. Измеряемые в работе Y-параметры задаются следующим образом:

```
.define Y11 Ib(VT1)/Vbe(VT1)
.define Y21 Ic(VT1)/Vbe(VT1)
.define Y22 Ic(VT1)/Vce(VT1)
```

Последний способ задания Y-параметров удобнее и его рекомендуется использовать в работе.

Поскольку Y-параметры являются комплексными величинами, то их изменение в интервале частот характеризуется графиками зависимости от частоты их вещественной и мнимой частей, т.е. активной и реактивной составляющих проводимости. Часто используется также зависимость от частоты абсолютной величины (модуля) Y-параметра.

В системе Micro-Cap для модуля, действительной и мнимой частей комплексных величин используются следующие обозначения:

Mag(z) – модуль z (при построении графиков можно просто указать z);

Re(z) – действительная часть z;

Im(z) – мнимая часть z.

Таким образом, для построения графика зависимости модуля крутизны транзистора от частоты в графе **Y Expression** следует записать

Mag (Ic(VT1)/Vbe(VT1))

либо

Mag (Y11)

(если предварительно была определена переменная Y11).

Наглядное представление об изменении комплексного Y-параметра в интервале частот даёт его *годограф* – геометрическое место точек комплексной плоскости, соответствующих значениям Y-параметра на различных частотах. Для построения годографа по горизонтальной оси графика нужно отложить значение вещественной части Y-параметра, а по вертикальной оси – его мнимой части. Например, для построения годографа крутизны транзистора (параметра  $\dot{Y}_{21}$ ) в графе **X Expression** следует указать

Re (Y21),

а в графе **Y Expression** –

Im (Y21).

---

<sup>1)</sup> Текстовое окно можно разместить на экране под окном схемы, выполнив команду **Windows>Split Horizontal**

Для схемы с ОЭ зависимость  $Y$ -параметров от частоты с достаточной для инженерных расчётов точностью описывается следующими выражениями:

$$\begin{aligned} \dot{Y}_{11} &\approx \frac{g_{11\text{нч}} + j\omega C_{11\text{нч}}}{1 + j\omega\tau}, & \dot{Y}_{12} &\approx -\frac{g_{12\text{нч}} + j\omega C_{\text{К}}}{1 + j\omega\tau}, \\ \dot{Y}_{21} &\approx \frac{S}{1 + j\omega\tau}, & \dot{Y}_{22} &\approx g_{22\text{нч}} + \frac{j\omega C_{22\text{нч}}}{1 + j\omega\tau}, \end{aligned}$$

где  $g_{11\text{нч}}$ ,  $g_{12\text{нч}}$ ,  $S = g_{21\text{нч}}$ ,  $g_{22\text{нч}}$  – низкочастотные значения (значения на частоте  $f \ll f_s$ ) соответствующих  $Y$ -параметров транзистора;  $C_{11\text{нч}} = \tau/r_b$  – низкочастотное значение входной ёмкости;  $C_{22\text{нч}} = C_{\text{К}}r_b S$  – низкочастотное значение выходной ёмкости;  $r_b$  – объёмное сопротивление области базы;  $C_{\text{К}}$  – ёмкость коллекторного перехода;  $\tau = \frac{1}{2\pi f_s}$  – постоянная времени транзистора;  $f_s$  – граничная частота транзистора по крутизне.

Для измерения частотной зависимости  $Y$ -параметров транзистора, включённого по схеме с общей базой (ОБ), используются схемы, приведённые на рис. 3.3 и 3.4. В этом случае значения  $Y$ -параметров определяются следующими выражениями:

- входная проводимость  $\dot{Y}_{11}$ : `.define Y11 Ie(VT1)/Veb(VT1)`
- крутизна  $\dot{Y}_{21}$ : `.define Y21 Ic(VT1)/Veb(VT1)`
- выходная проводимость  $\dot{Y}_{22}$ : `.define Y22 Ic(VT1)/Vcb(VT1)`
- проводимость обратной передачи  $\dot{Y}_{12}$ : `.define Y12 Ie(VT1)/Vcb(VT1)`

$Y$ -параметры транзистора, включённого по схеме с ОБ, выражаются через параметры при включении с ОЭ:

$$\begin{aligned} \dot{Y}_{11\text{ОБ}} &= \dot{Y}_{11\text{ОЭ}} + \dot{Y}_{12\text{ОЭ}} + \dot{Y}_{21\text{ОЭ}} + \dot{Y}_{22\text{ОЭ}} \approx \dot{Y}_{11\text{ОЭ}} + \dot{Y}_{21\text{ОЭ}}, \\ \dot{Y}_{12\text{ОБ}} &= -(\dot{Y}_{12\text{ОЭ}} + \dot{Y}_{22\text{ОЭ}}), \\ \dot{Y}_{21\text{ОБ}} &= -(\dot{Y}_{21\text{ОЭ}} + \dot{Y}_{22\text{ОЭ}}) \approx -\dot{Y}_{21\text{ОЭ}}, \\ \dot{Y}_{22\text{ОБ}} &= \dot{Y}_{22\text{ОЭ}}. \end{aligned}$$

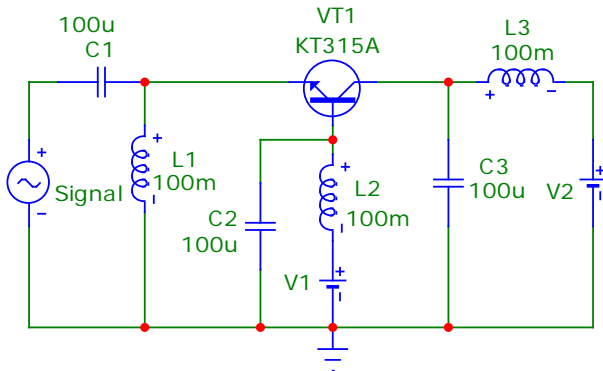


Рис. 3.3. Схема измерения параметров  $\dot{Y}_{11}$  и  $\dot{Y}_{21}$  транзистора, включённого с ОБ

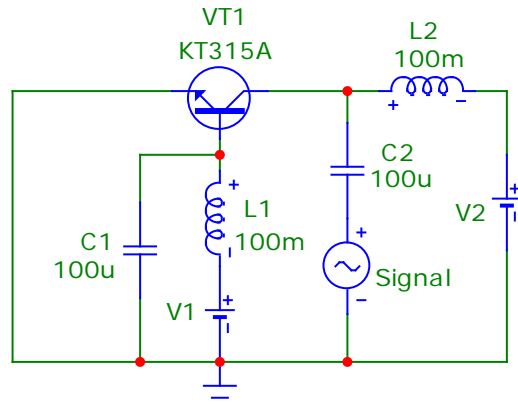


Рис. 3.4. Схема измерения параметров  $\dot{Y}_{12}$  и  $\dot{Y}_{22}$  транзистора, включённого с ОБ

Поскольку мнимые части входной и выходной проводимостей транзистора, включённого по схеме с ОЭ, положительны, то реактивные составляющие этих проводимостей имеют ёмкостной характер. Значения соответствующих эквивалентных ёмкостей определяются формулами

$$C_{11} = \frac{\text{Im}(\dot{Y}_{11})}{2\pi f}, \quad C_{22} = \frac{\text{Im}(\dot{Y}_{22})}{2\pi f}$$

и зависят от частоты сигнала. Для расчёта частотной зависимости эквивалентной входной ёмкости  $C_{11}$  транзистора, включённого по схеме с ОЭ, в текстовом окне следует определить эту ёмкость:

`.define C11 Im(Y11)/(2*pi*F)`

и в строке **Y Expression** записать переменную C11. Аналогичным образом определяется и эквивалентная выходная ёмкость  $C_{22}$ .

### 3.2. Домашняя подготовка

1. Изучите методику измерения на модели малосигнальных высокочастотных параметров транзисторов.
2. Запишите выражения, определяющие измеряемые параметры транзистора.
3. Изобразите ожидаемый вид измеряемых зависимостей параметров от частоты
  - модуля входной проводимости;
  - модуля крутизны.
4. Подготовьтесь к ответу на контрольные вопросы.

### 3.3. Лабораторное задание

1. В соответствии с номером бригады по табл. 3.1 выберите тип транзистора, параметры режима по постоянному току (ток коллектора  $I_{0К}$ , напряжение коллектор-эмиттер  $U_{0К}$ ) и частоту сигнала.

Таблица 3.1

№ бригады	Тип транзистора	$I_{0К}$ , мА	$U_{0К}$ , В	$f_0$ , МГц
1	КТ3102А	1	4	0,5
2	КТ3102В	2	6	1,2
3	КТ3102V	3	6	0,7
4	КТ3101А	4	5	1,3
5	КТ315А	5	5	0,8
6	КТ315В	1	4	1,4

7	КТ315V	2	6	0,9
8	КТ315G	3	6	1,5
9	КТ315D	2	5	0,6
10	КТ342А	1	5,5	1,0

2. Составьте схемы для измерения  $Y$ -параметров транзистора.
3. Проведите измерение  $Y$ -параметров транзистора, включённого по схеме с ОЭ.
  - а) Используя результаты лабораторной работы № 1 «Измерение статических вольт-амперных характеристик и низкочастотных параметров биполярных транзисторов», установите напряжение смещения на базе транзистора, обеспечивающее заданный ток коллектора  $I_{0К}$  при заданном напряжении коллектор-эмиттер  $U_{0К}$ .
  - б) В интервале частот 100 кГц-300 МГц измерьте зависимость от частоты модулей следующих  $Y$ -параметров:
    - входной проводимости  $\dot{Y}_{11}$ ;
    - крутизны  $\dot{Y}_{21}$ ;
    - выходной проводимости  $\dot{Y}_{22}$ .
 По результатам измерений определите граничную частоту транзистора  $f_s$ , при которой модуль крутизны уменьшается в  $\sqrt{2}$  раз по сравнению с его низкочастотным значением.
  - в) Измерьте зависимость от частоты эквивалентных ёмкостей  $C_{11}$  и  $C_{22}$  при вариации тока коллектора. Для этого в режиме **Stepping** задайте изменение напряжения смещения на базе транзистора таким образом, чтобы ток коллектора изменялся приблизительно в пределах 1-10 мА. Сделайте вывод о характере зависимости эквивалентных ёмкостей транзистора от частоты и тока коллектора.
  - г) Постройте семейство годографов параметра  $\dot{Y}_{21}$  при вариации тока коллектора в пределах 1-10 мА. Сделайте вывод о влиянии тока коллектора на крутизну транзистора.
  - д) При токе коллектора  $I_{0К}$  измерьте низкочастотные значения (значения на частоте  $f \ll f_s$ ) следующих параметров (эти результаты будут использованы в лабораторной работе № 3 «Исследование модели резистивного усилителя»):
    - крутизны  $S = g_{21нч}$ ;
    - активной составляющей входной проводимости  $g_{11нч}$ ;
    - активной составляющей выходной проводимости  $g_{22нч}$ ;
    - выходной ёмкости  $C_{22нч}$ .
  - е) На заданной частоте  $f_0$  при токе коллектора  $I_{0К}$  измерьте значения следующих параметров:

- модуля крутизны  $|\dot{Y}_{21}|$ ;
  - выходной ёмкости  $C_{22}$ ;
  - активной составляющей выходной проводимости  $g_{22}$ .
4. Проведите измерение  $Y$ -параметров транзистора, включённого по схеме с ОБ.
- а) В интервале частот 100 кГц-300 МГц измерьте зависимость от частоты модулей параметров  $\dot{Y}_{11}$ ,  $\dot{Y}_{21}$ ,  $\dot{Y}_{22}$ . Проведите сопоставление с аналогичными зависимостями, полученными при выполнении п. 3. По результатам измерений проверьте выполнение в области низких частот соотношений для  $Y$ -параметров транзистора при включении по схеме с ОЭ и с ОБ. Сопоставьте значения входной проводимости транзистора при включении его по схеме с ОЭ и с ОБ. Обратите внимание на характер реактивной составляющей входной проводимости для этих двух случаев.
- б) Измерьте зависимость от частоты эквивалентных ёмкостей  $C_{11}$  и  $C_{22}$ . Проведите сопоставление с аналогичными зависимостями для схемы с ОЭ. Обратите внимание на характер ёмкости  $C_{11}$ . Сделайте выводы.

### 3.4. Контрольные вопросы

1. Каково назначение конденсаторов  $C1$  и  $C2$  в схеме на рис. 3.1?
2. Каково назначение катушек индуктивности (дросселей)  $L1$  и  $L2$  в схеме на рис. 3.2?
3. Какие переменные нужно указать в полях **X Expression** и **Y Expression** для построения графика зависимости модуля входной проводимости от частоты?
4. Какие переменные нужно указать в полях **X Expression** и **Y Expression** для построения графика зависимости модуля крутизны от частоты?
5. Как определяется эквивалентная входная ёмкость транзистора?
6. Как определяется эквивалентная выходная ёмкость транзистора?
7. Какое значение частоты называется граничной частотой транзистора по крутизне  $f_S$ ?
8. Как влияет ток коллектора на входную проводимость и крутизну транзистора?
9. Чем отличается схема включения транзистора с общей базой от схемы включения с общим эмиттером?
10. Какой график называется годографом комплексного  $Y$ -параметра?