

# Методы идентификации параметров моделей интегральных транзисторов

## Часть 3. Альтернативные методы идентификации параметров модели биполярных транзисторов

Олег Дворников, Юрий Шульгевич (г. Минск, Беларусь)

Рассмотрены методы идентификации, применение которых целесообразно при наличии типовых справочных данных или особых требований к адекватности модели.

### ИЗМЕРЕНИЕ ЗАВИСИМОСТИ $\beta$ ОТ ТОКА И НАПЯЖЕНИЯ (пп. 15, 16 ТАБЛИЦЫ 3)

Статический коэффициент передачи тока в схеме с общим эмиттером  $\beta$  является основной характеристикой усилительных свойств БТ, в связи с этим его зависимость от коллекторного тока и напряжения  $\beta(I_C, V_C)$  обычно приведена в типовых справочных данных. С практической точки зрения, целесообразно выполнять измерение зависимости  $\beta(I_E, V_C)$ , которую допустимо применять вместо  $\beta(I_C, V_C)$  для определения параметров модели, пос-

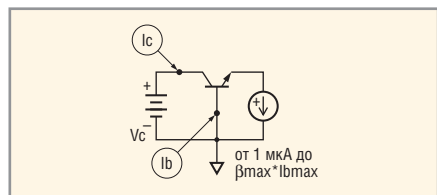


Рис. 22. Схема включения БТ для измерения зависимости  $\beta$  от тока и напряжения

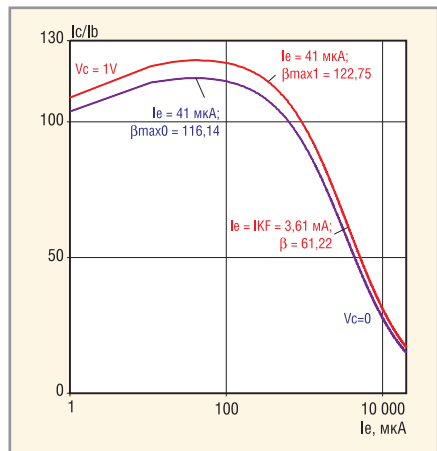


Рис. 23. Зависимость  $\beta$  от эмиттерного тока при  $V_{CB} = 0; 1$  В

кольку в широком диапазоне коллекторных токов обычно выполняется условие  $\beta(I_C, V_C) \approx \beta(I_E, V_C)$ .

Предлагаемый метод идентификации основан на:

- анализе модели Гуммеля–Пуна, который позволил установить, что параметр  $IKF$  соответствует коллекторному току, при котором  $\beta$  составляет от 50 до 65% своего максимального значения;
- соотношениях (65), (74);
- результатах моделирования зависимости  $\beta(I_E)$ , показанных на рисунке 13.

Для идентификации параметров  $BF$ ,  $IKF$ ,  $ISE$ ,  $VAF$  необходимо:

1. Включить БТ в соответствии с рисунком 22;
2. Измерить коллекторный и базовый ток при  $V_{CB} = 0; 1$  В и изменении эмиттерного тока от 1 мкА до максимально возможного значения. Обычно в качестве максимально возможного эмиттерного  $I_{EMAX}$  (коллекторного  $I_{CMAX}$ ) тока принимают величину, равную:

$$I_{EMAX} \approx I_{CMAX} = \beta_{MAX} I_{BMAX}, \quad (93)$$

где, как и ранее,  $I_{BMAX}$  – базовый ток, при котором  $\beta = 0,5\beta_{MAX}$ .

Такое разное определение измеряемых параметров  $I_{BMAX}$ ,  $I_{EMAX}$  объясняется тем, что они описывают разные характеристики БТ. Так, коллекторный ток, соответствующий  $I_{BMAX}$ , а именно, составляющий  $0,5\beta_{MAX} I_{BMAX}$ , приблизительно равен току «излома» зависимости  $I_C(V_{BE})$  для прямого включения, т.е. параметру  $IKF$ . В то же время при максимально возможном эмит-

терном токе коэффициент усиления падает до величины  $\beta \approx 0,25\beta_{MAX}$ , и поэтому  $I_{EMAX}$  описывает область эмиттерных токов, усиление в которой достаточно для большинства применений БТ;

3. Рассчитать величину  $\beta = I_C/I_B$  и построить зависимость  $\beta(I_E, V_C)$  (см. рис. 23);
4. В качестве параметра  $BF$  допустимо принять максимальное значение  $\beta$  при  $V_{CB} = 0$  ( $\beta_{MAX0}$ ). Однако, если известен параметр  $VAF$  и напряжение  $V_{BE}$ , соответствующее  $\beta_{MAX0}$ , то рекомендуется определить  $BF$  по соотношению, полученному из (74), а именно:

$$BF \approx \frac{\beta_{MAX0}}{\left(1 - \frac{V_{BE}}{VAF}\right)}; \quad (94)$$

5. В области малых и средних эмиттерных токов, для которой графики  $\beta(I_E)$  при  $V_{CB} = 0$  и  $V_{CB} = 1$  В имеют приблизительно одинаковую форму ( $I_E$  в диапазоне от 1 до 100 мкА на рисунке 23), рассчитать параметр  $VAF$  как:

$$VAF' = \frac{1}{\left(1 - \frac{V_{BE}}{VAF}\right) \left(\frac{\beta_1}{\beta_0} - 1\right)} \approx \frac{1}{\frac{\beta_1}{\beta_0} - 1}, \quad (95)$$

где  $\beta_0, \beta_1$  – значение  $\beta$  при одном и том же эмиттерном токе и  $V_{CB} = 0; 1$  В.

Если полученные значения отличаются (см. рис. 24) для различных точек кривых  $\beta(I_E)$  при  $V_{CB} = 0$  и  $V_{CB} = 1$  В, то в качестве параметра  $VAF$  принимается максимальная величина;

6. На графике  $\beta(I_E)$  при  $V_{CB} = 1$  В определить эмиттерный ток, при котором величина  $\beta$  падает до значения, равного  $0,5\beta_{MAX1}$ , где  $\beta_{MAX1}$  – максимальное значение  $\beta$  при  $V_{CB} = 1$  В (см. рис. 23). Этот эмиттерный ток допустимо принять в качестве параметра  $IKF$ .

Для исследуемого БТ (см. рисунки 23 и 24)  $\beta_{\text{MAX0}} = 116,14$ ;  $V_{AR} = 2$  В;  $BF = 177$ ;  $V_{AF} = 26$  В;  $IKF = 3,61$  мА;

7. Выполнить моделирование зависимости  $\beta(I_E, V_{CE})$  в соответствии со схемой включения и режимом БТ при измерениях. Подобрать параметр  $ISE$  таким образом, чтобы обеспечить наилучшее совпадение результатов измерений и моделирования зависимости  $\beta = \beta(I_E)$  в области малых токов. Уточнить величины  $BF$  и  $IKF$  для совпадения измерений и моделирования в максимуме и на спаде  $\beta = \beta(I_E)$ ;
8. Поменяв местами эмиттер и коллектор транзистора на рисунке 22, измерить эмиттерный и базовый ток при изменении коллекторного тока от 1 мкА до максимально допустимого значения при инверсном включении  $I_{E\text{MAXR}}$  и  $V_{EB} = 0; 1$  В. Аналогичным образом идентифицировать параметры  $BR, IKR, ISC, VAR$ .

### ИЗМЕРЕНИЕ ВЫХОДНОЙ ХАРАКТЕРИСТИКИ ТРАНЗИСТОРА В СХЕМЕ С ОБЩИМ ЭМИТТЕРОМ (пп. 17, 18 таблицы 3)

Выходная ВАХ в схеме с общим эмиттером наглядно описывает ра-

боту БТ во всей допустимой области токов и напряжений и поэтому часто приводится в справочных данных. Для регистрации выходной ВАХ применяются измерители параметров полупроводниковых приборов [19, 20], встроенные в осциллографы блоки наблюдения ВАХ [22], а также отдельные электроизмерительные приборы.

Для измерения выходной ВАХ транзистора с ОЭ необходимо:

1. Включить БТ по схеме, показанной на рисунке 25;
2. Измерить зависимость  $I_C = f(V_{CE})$  при  $I_B = 0, 1I_{B\text{MAX}}; 0,25I_{B\text{MAX}}; 0,5I_{B\text{MAX}}; I_{B\text{MAX}}$  и изменении напряжения  $V_{CE}$  от 0 до  $V_{CB\text{MAX}}$  (для исследуемого транзистора  $I_B = 8; 20; 40; 80$  мкА);
3. Поменяв местами эмиттер и коллектор транзистора на рисунке 25, аналогичным образом измерить зависимость  $I_E = f(V_{EC})$  при  $I_B = 0, 1I_{B\text{MAXR}}; 0,25I_{B\text{MAXR}}; 0,5I_{B\text{MAXR}}; I_{B\text{MAXR}}$  и изменении напряжения  $V_{EC}$  от 0 до  $V_{EB\text{MAX}}$  (для исследуемого транзистора  $I_B = 60; 150; 300; 600$  мкА);
4. Суммарное количество точек измерений должно быть максимально возможным (см. рисунки 26, 27). Це-

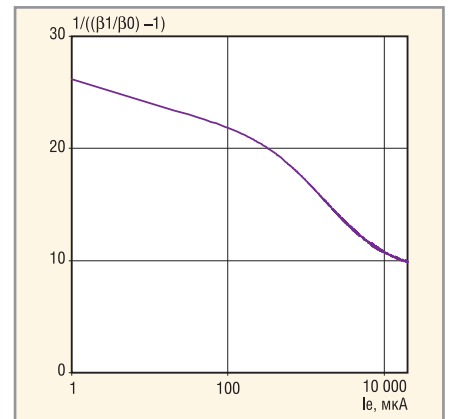


Рис. 24. Зависимость рассчитанного в соответствии с (95) параметра  $V_{AF}$  от эмиттерного тока

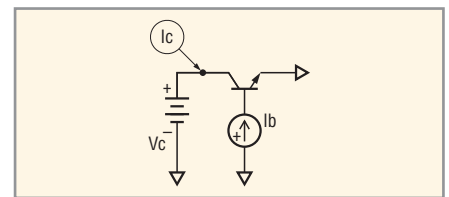


Рис. 25. Схема включения для измерения выходной характеристики БТ с ОЭ

лесообразно дополнительно измерить участок ВАХ при  $0 < V_{CE} < 0,1$  В с минимально возможным приращением напряжения;

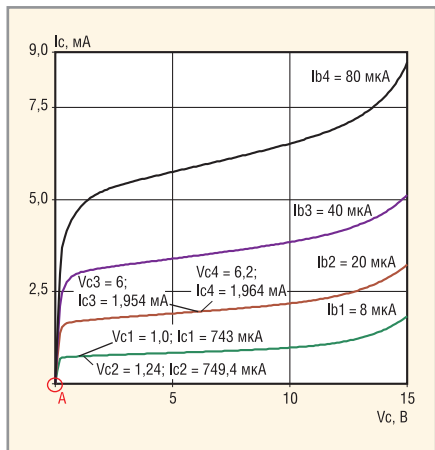


Рис. 26. Выходная ВАХ в схеме с общим эмиттером для прямого включения

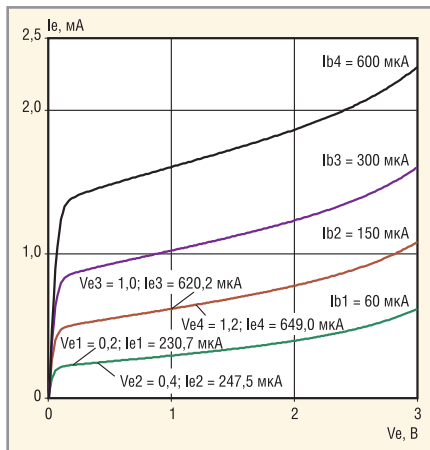


Рис. 27. Выходная ВАХ в схеме с общим эмиттером для инверсного включения

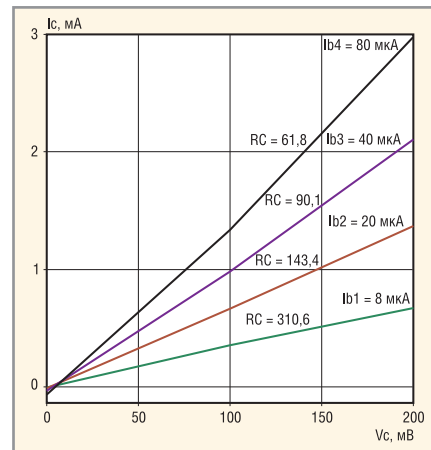


Рис. 28. Участок выходной ВАХ рисунка 26 для определения параметра RC

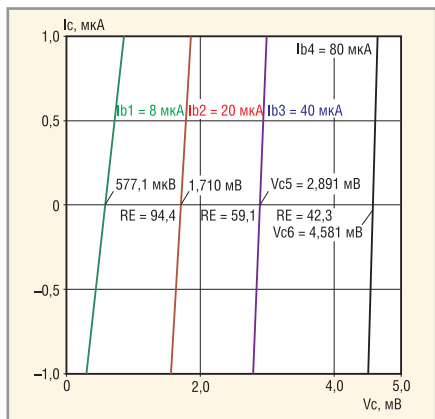


Рис. 29. Участок А выходной ВАХ рисунка 26 для определения параметра RE

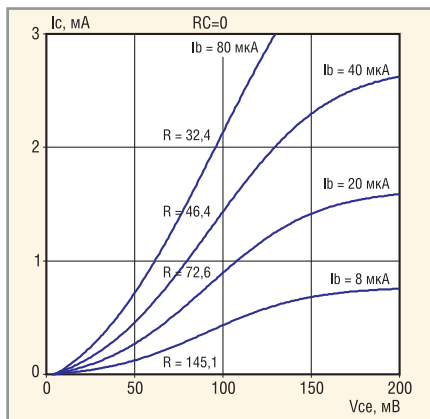


Рис. 30. Результаты моделирования выходной ВАХ при RC = 0

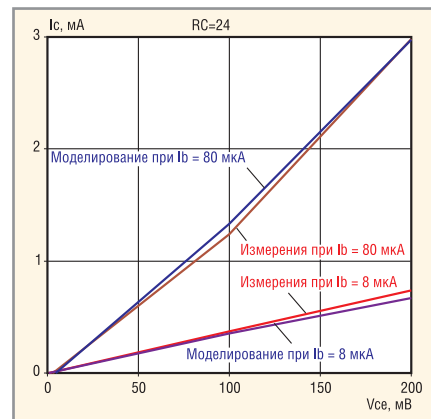


Рис. 31. Результаты измерений и моделирования выходной ВАХ при RC = 24

С помощью результатов измерений выходной ВАХ для прямого включения БТ с ОЭ можно определить:

- напряжение Эрли по соотношению (65), которое для обозначений рисунка 26 примет вид:

$$VAF \approx I_{C1}(V_{C2} - V_{C1}) / (I_{C2} - I_{C1}) \text{ при } I_B = \text{const}, |I_{C2} - I_{C1}| \ll I_{C1}, \quad (96)$$

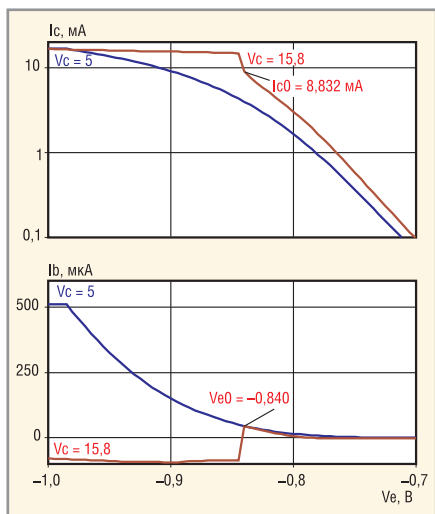


Рис. 32. Результаты измерений характеристики Гуммеля при максимальном коллекторном напряжении

где  $(I_{C2}, V_{C2}), (I_{C1}, V_{C1})$  – координаты рабочей точки на кривых рисунка 26;

- зависимость  $\beta(I_C, V_C)$  в виде набора значений  $\beta(I_{C1}, V_{C1}), \beta(I_{C3}, V_{C3})$  и т.д.:

$$\begin{aligned} \beta(I_{C1}, V_{C1}) &= I_{C1} / I_{B1}, \\ \beta(I_{C3}, V_{C3}) &= I_{C3} / I_{B2}, \end{aligned} \quad (97)$$

по которой возможно определить параметры модели с использованием методов, рассмотренных в п. 11;

- сопротивление коллектора RC по тангенсу угла наклона касательной к ВАХ в режиме насыщения (см. рисунок 28);
- сопротивление эмиттера RE по расстоянию между кривыми на начальном участке ВАХ (участок А на рисунке 26 увеличен и показан на рисунке 29):

$$RE = (V_{C6} - V_{C5}) / (I_{B4} - I_{B3}) \text{ при } I_C = 0. \quad (98)$$

Сравнивая соотношения (54) и (96), можно утверждать, что напряжение Эрли, описываемое соотношением (96), представляет собой координату точки

пересечения касательной к ВАХ транзистора с ОЭ в активном режиме работы с осью  $V_C$ , что совпадает с известным качественным представлением  $VAF$  [8].

Величина параметра RE, рассчитанная по ВАХ, показанной на рисунке 29, сильно зависит от режима измерений. Поскольку при определении RE применяются значения  $V_C$ , полученные при  $I_C = 0$ , метод идентификации RE по результатам измерений начального участка ВАХ транзистора с ОЭ аналогичен методу п. 8. В этом случае для уменьшения погрешности целесообразно задавать большие базовые токи, близкие по величине к  $I_{EMAX}$  ( $I_{B3}, I_{B4}$  на рисунке 29 должны быть в диапазоне десятков мА), а для предотвращения потери работоспособности БТ при таких базовых токах следует проводить измерения при  $V_C < 100$  мВ.

Рассчитанная величина сопротивления коллектора RC (см. рис. 28) также существенно зависит от режима работы. Моделирование ВАХ при параметре модели RC = 0 (см. рис. 30) позволило установить, что даже в этом случае наклон графиков разный. В связи с этим рекомендуется идентификацию параметра RC проводить путём подбо-

ра его величины таким образом, чтобы достичь совпадения результатов измерений и моделирования в одинаковых условиях начального участка ВАХ транзистора с ОЭ. На рисунке 31 показано, что удовлетворительное совпадение результатов измерений и моделирования получено при  $RC = 24$ , в то время как значение сопротивления, рассчитанного по наклону этих кривых, составило 61,8 и 310,6 Ом.

### ИЗМЕРЕНИЕ ХАРАКТЕРИСТИКИ ГУММЕЛЯ ПРИ МАКСИМАЛЬНОМ КОЛЛЕКТОРНОМ НАПРЯЖЕНИИ (п. 19 ТАБЛИЦЫ 3)

Целью измерений является регистрация зависимости  $I_C = f(V_{BE})$  при коллекторном напряжении, обеспечивающем выполнение условия  $I_B = 0$  (см. рис. 7), для определения сопротивления эмиттера [15]. Анализ модели Гуммеля–Пуна позволил установить справедливость соотношения:

$$I_C \approx IS \left( 1 - \frac{V_{BE}}{VAR} - \frac{V_{BC}}{VAF} \right) \exp \frac{V_{BE}}{NF\phi_T} \approx IS_0 \exp \frac{V_{BEEXT} - I_B R_B - I_E RE}{NF\phi_T}, \quad (99)$$

$$IS_0 = IS \left( 1 - \frac{V_{BE}}{VAR} - \frac{V_{BC}}{VAF} \right), \quad (100)$$

где, как и ранее, нижний индекс (EXT) обозначает падение напряжения на выводах «внешнего» транзистора.

Введение новой переменной  $IS_0$ , величину которой допустимо определить из результатов измерений, позволяет упростить выражение для коллекторного тока и выделить в нём только факторы, влияющие на отклонение зависимости  $I_C = f(V_{BE})$  от экспоненты в области больших токов. При отсутствии базового тока справедливы соотношения:

$$RI = \frac{V_{BEEXT0} - NF\phi_T \ln \frac{I_{C0}}{IS_0}}{I_{C0}}, \quad (101)$$

$$IS_0 \approx I_{C1} \exp \left( - \frac{V_{BE1}}{NF\phi_T} \right), \quad (102)$$

где  $V_{BEEXT0}$  – измеренное напряжение на прямо смещённом эмиттерном переходе при  $I_B = 0$ ;  $I_{C0}$  – коллекторный ток при  $I_B = 0$ ;  $I_{C1}$  – коллекторный ток, соответствующий напряжению на прямо смещённом эмиттерном переходе, равном  $V_{BE1}$ , при максимальном коллекторном напряжении, в области

малых и средних токов (в которой можно пренебречь падением напряжения на сопротивлениях полупроводниковых областей и влиянием генерации-рекомбинации в ОПЗ).

Таким образом, для идентификации параметра  $RE$  можно рекомендовать:

1. Измерить зависимость  $I_B = f(V_{BE})$  аналогично п. 5 при коллекторном напряжении, меньшем  $V_{CBMAX}$ , и определить величину ограничения базового тока. Так, на рисунке 32 зависимость  $I_B = f(V_{BE})$  зарегистрирована при  $V_{CB} = 5$  В и выбрано ограничение базового тока на уровне 500 мкА;
2. Измерить зависимость  $I_B = f(V_{BE})$  при коллекторном напряжении  $V_{CBMAX}$ , обеспечивающем выполнение условия  $I_B = 0$  ( $V_{CB} = 15,8$  В на рисунке 32). Определить  $V_{BEEXT0}$ ;  $I_{C0}$ ;
3. Измерить  $I_{C1}$ ,  $V_{BE1}$  в области малых и средних токов по графику, соответствующему  $V_{CBMAX}$ , рассчитать переменную  $IS_0$  с помощью соотношения (102) или (100);
4. Рассчитать параметр  $RE$  по соотношению (101).

Для исследуемого БТ:  $V_{CBMAX} = 15,8$  В;  $V_{BEEXT0} = 0,840$  В;  $I_{C0} = 8,83$  мА;  $IS_0 = 3,44 \times 10^{-16}$  А;  $RE = 7,71$  Ом.

Выводы:

- идентификацию параметров модели Гуммеля–Пуна, описывающих вольтамперные характеристики, целесообразно проводить на основе электрических измерений с использованием методов, рассмотренных в пп. 4–10;
- существуют объективные причины, затрудняющие однозначное определение всех параметров модели на основе измерений, главная из которых заключается в том, что все модели только приближённо описывают поведение элементов;
- рекомендуется настроить параметры модели для совпадения результатов моделирования и измерений характеристик БТ, особо значимых для конкретной области применения [3]. Так, для моделирования прецизионных аналоговых микросхем необходимо настроить параметры  $BF$ ,  $ISE$ ,  $IKF$ ,  $VAF$  по зависимостям  $I_E = f(V_{BE})$  (см. рис. 5а) и  $\beta(I_E, V_C)$  (см. рис. 23); параметры  $RE$ ,  $RC$  – по вольтамперной характеристике для схемы с общим эмиттером в режиме насыщения (см. рис. 28).

*Продолжение следует*

### ЛИТЕРАТУРА

22. <http://www.mnipi.by/ocziograf13.html>. 