

Влияние дестабилизирующих факторов на работу транзисторного каскада

Под влиянием дестабилизирующих факторов возникают следующие изменения параметров транзисторов:

- изменения номинального напряжения база-эмиттер $\Delta U_{бэ}$;
- изменения коэффициента передачи тока коллектора $\Delta \beta$;
- изменения обратного тока коллектора $\Delta I_{ок}$.

Каждая из составляющих обусловлена двумя независимыми причинами – изменениями температуры и технологией изготовления транзистора, поэтому $\Delta U_{бэ} = \Delta U_{бэt} + \Delta U_{бэT}$, $\Delta \beta = \Delta \beta_t + \Delta \beta_T$, $\Delta I_{ок} = \Delta I_{окt} + \Delta I_{окT}$.

Температурные составляющие этих отклонений можно оценить с помощью следующих соотношений $\Delta U_{бэt} = -2,1 \cdot 10^{-3} \cdot \Delta t$ (температурный коэффициент минус 2,1 мВ/градус); $\Delta \beta = \beta \cdot 0,005 \cdot \Delta t$; $\Delta I_{ок} = I_{ок}(\exp(a \Delta t) - 1)$, где $a = 0,06$ для кремниевых транзисторов, и $a = 0,02$ – для германиевых.

Каждая составляющая порождает соответствующие изменения тока коллектора

$$\Delta I_{к} = \Delta I_1(\Delta U_{бэ}) + \Delta I_2(\Delta \beta) + \Delta I_3(\Delta I_{ок}).$$

Задача заключается в том, чтобы, зная составляющие нестабильностей $\Delta U_{бэ}$, $\Delta \beta$ и $\Delta I_{ок}$, вычислить суммарную нестабильность постоянного тока коллектора $\Delta I_{к}$.

Для решения этой задачи воспользуемся теоремой об эквивалентном генераторе, утверждающей, что любую 2-полюсную цепь, содержащую произвольное число резисторов, источников тока и источников ЭДС, можно эквивалентным образом представить в виде одного источника тока с параллельно включенным эквивалентным сопротивлением или в виде одного источника ЭДС с последовательно включенным сопротивлением (рис. 1).

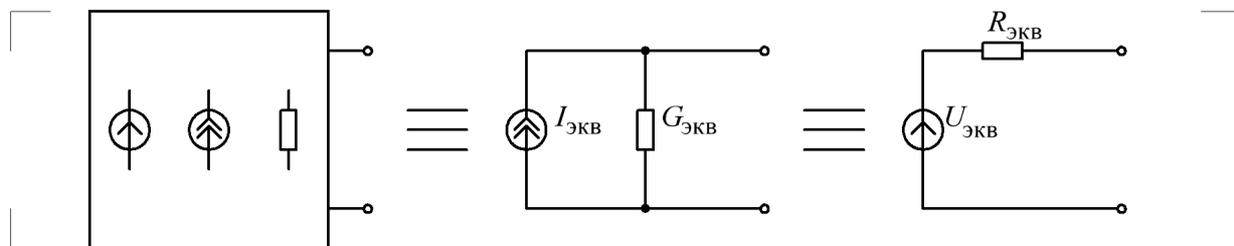


Рис. 1

Эта теорема позволяет цепи, внешние по отношению к выводам транзистора представить в эквивалентном виде (рис. 2а).

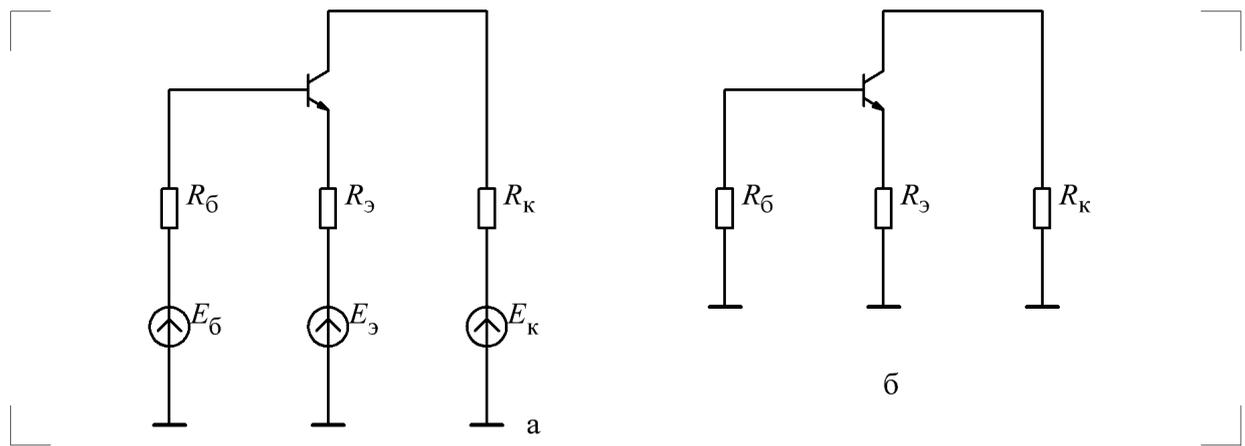


Рис. 2

С точки зрения анализа действия дестабилизирующих факторов при условии обеспечения положения ИРТ наличие источников постоянной ЭДС на выводах транзисторов не имеет значения, и эквивалентная схема каскада может быть представлена так, как показано на рис. 2б.

Влияние дестабилизирующих факторов на схеме можно отразить с помощью дополнительных источников тока и напряжения (рис. 3), а их действие приводит к тому, что положение ИРТ изменяется по сравнению с тем, что было обеспечено исходной схемой.

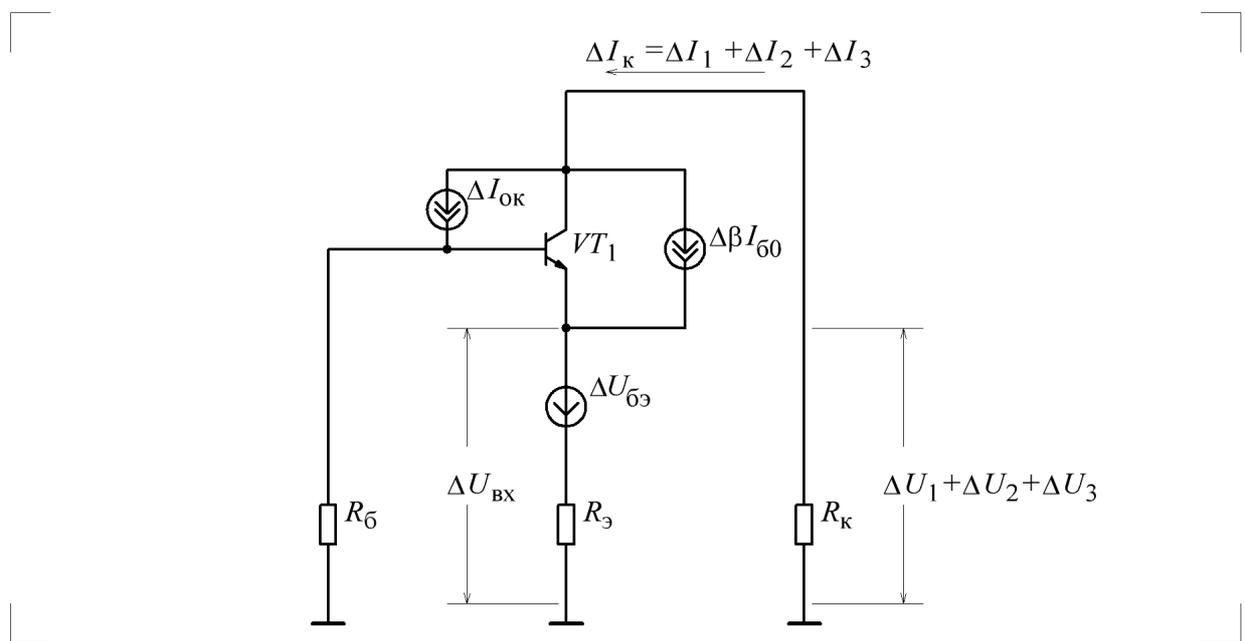


Рис. 3

Для анализа влияния источников нестабильности на ток коллектора воспользуемся малосигнальными параметрами. Необходимо найти зависимости $\Delta I_1(\Delta U_{бэ})$, $\Delta I_2(\Delta \beta)$ и $\Delta I_3(\Delta I_{ок})$.

1. $\Delta I_1(\Delta U_{бэ})$. Эквивалентная схема каскада по отношению к источнику

$\Delta U_{бэ}$ представляет собой схему ОБ (рис. 4а).

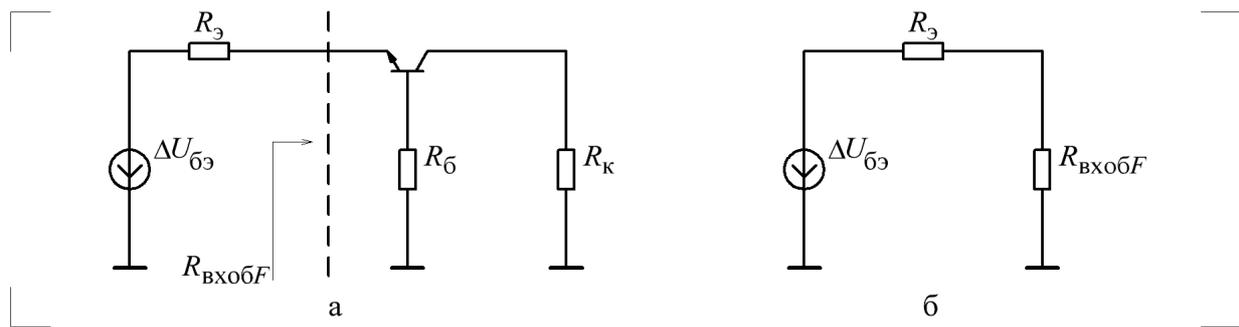


Рис. 4

Нестабильность коллекторного тока

$$\Delta I_1 = \frac{\Delta U_1}{R_к} = \frac{\Delta U_{бэ} K_{вхобF} K_{обF}}{R_к},$$

где $K_{обF} = \frac{g_{21} R_к}{1 + g_{11} R_б}$ – коэффициент передачи каскада ОБ_F, а в цепи базового вывода установлено сопротивление $R_б$; $K_{вхобF}$ – коэффициент передачи входной цепи каскада ОБ_F, определяемый с помощью схемы рис. 4б:

$$K_{вхобF} = \frac{R_{вхобF}}{R_{вхобF} + R_э} = \frac{1}{1 + R_э G_{вхобF}}.$$

Входная проводимость схемы ОБ_F равна

$$G_{вхобF} = \frac{g_{21}}{1 + g_{11} R_F} = \frac{g_{21}}{1 + g_{11} R_б}.$$

В результате

$$K_{вхобF} = \frac{1 + g_{11} R_б}{1 + g_{11} R_б + g_{21} R_э} \quad \text{и} \quad \Delta I_1 = \frac{\Delta U_{бэ} g_{21}}{1 + g_{11} R_б + g_{21} R_э}.$$

2. Нестабильность коэффициента передачи тока $\Delta\beta$ проявляет себя двояким образом $\Delta I_2(\Delta\beta) = \Delta I_{2,1}(\Delta\beta) + \Delta I_{2,2}(\Delta\beta)$. Первая составляющая обусловлена непосредственным влиянием $\Delta\beta$ на ток коллектора $\Delta I_{2,1}(\Delta\beta) = \Delta\beta I_{б0}$. Вторая составляющая порождается падением напряжения, создаваемым током $\Delta\beta I_{б0}$ на эквивалентном сопротивлении эмиттерной цепи (рис. 5а).

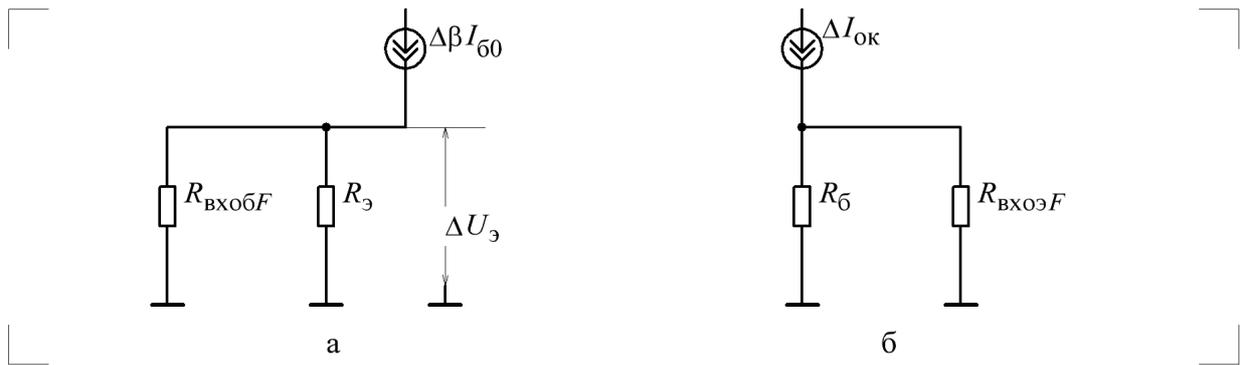


Рис. 5

$$\Delta U_3 = \Delta \beta I_{60} \frac{R_3 R_{\text{ВХОБ}F}}{R_3 + R_{\text{ВХОБ}F}} = \frac{R_3}{1 + R_3 G_{\text{ВХОБ}F}} = \Delta \beta I_{60} R_3 \frac{1 + g_{11} R_6}{1 + g_{11} R_6 + g_{21} R_3}.$$

Это падение напряжение оказывается приложенным к переходу база-эмиттер с противоположным знаком и усиливается каскадом ОБ_F, выделяясь на коллекторном сопротивлении. Изменения тока коллектора составят

$$\begin{aligned} \Delta I_{2.2} &= -\Delta \beta I_{60} R_3 \frac{1 + g_{11} R_6}{1 + g_{11} R_6 + g_{21} R_3} \cdot \frac{g_{21} R_k}{1 + g_{11} R_6} \cdot \frac{1}{R_k} = \\ &= -\Delta \beta I_{60} R_3 \frac{g_{21} R_3}{1 + g_{11} R_6 + g_{21} R_3} \end{aligned}$$

Полная нестабильность коллекторного тока, обусловленная $\Delta\beta$ равна

$$\begin{aligned} \Delta I_2 &= \Delta \beta I_{60} - \Delta \beta I_{60} R_3 \frac{g_{21} R_3}{1 + g_{11} R_6 + g_{21} R_3} = \\ &= \Delta \beta I_{60} R_3 \frac{1 + g_{11} R_6}{1 + g_{11} R_6 + g_{21} R_3} \end{aligned}$$

Знак "минус" в последнем выражении связан с тем, что рассматриваемые составляющие тока имеют противоположные знаки.

3. Влияние нестабильности обратного тока коллектора также проявляется двояко $\Delta I_3(\Delta I_{\text{ок}}) = \Delta I_{3.1}(\Delta I_{\text{ок}}) + \Delta I_{3.2}(\Delta I_{\text{ок}})$. Первая составляющая – это непосредственное протекание $\Delta I_{\text{ок}}$ в выходной цепи $\Delta I_{3.1} = \Delta I_{\text{ок}}$. Вторая составляющая обусловлена протеканием этого тока в базовой цепи транзистора (рис. 5б) и созданием разности потенциалов

$$\Delta U_6 = \Delta I_{\text{ок}0} \frac{R_6 R_{\text{ВХОЭ}F}}{R_6 + R_{\text{ВХОЭ}F}} = \Delta I_{\text{ок}0} \frac{R_6}{1 + R_6 G_{\text{ВХОЭ}F}} = \Delta I_{\text{ок}} \frac{(1 + g_{21} R_3) R_6}{1 + g_{11} R_6 + g_{21} R_3}.$$

Это изменение оказывается приложенным к перехода база-эмиттер с тем же знаком, оно усиливается схемой ОЭ_F, в результате чего изменение тока кол-

лектора равно

$$\begin{aligned}\Delta I_{3.2} &= \Delta U_{\bar{\sigma}} K_{\text{оэ}F} \frac{1}{R_{\text{к}}} = \Delta I_{\text{ок}} \frac{(1+g_{21} R_{\bar{\sigma}}) R_{\bar{\sigma}}}{1+g_{11} R_{\bar{\sigma}}+g_{21} R_{\bar{\sigma}}} \cdot \frac{g_{21} R_{\text{к}}}{1+g_{21} R_{\bar{\sigma}}} \cdot \frac{1}{R_{\text{к}}} = \\ &= \Delta I_{\text{ок}} \frac{1+g_{21} R_{\bar{\sigma}}}{1+g_{11} R_{\bar{\sigma}}+g_{21} R_{\bar{\sigma}}}\end{aligned}$$

Полная нестабильность тока коллектора, обусловленная 3 фактором является суммой

$$\Delta I_3 = \Delta I_{\text{ок}} + \Delta I_{\text{ок}} \frac{1+g_{21} R_{\bar{\sigma}}}{1+g_{11} R_{\bar{\sigma}}+g_{21} R_{\bar{\sigma}}} = \Delta I_{\text{ок}} \frac{1+g_{21} R_{\bar{\sigma}}+g_{21} R_{\bar{\sigma}}+g_{21} R_{\bar{\sigma}}}{1+g_{11} R_{\bar{\sigma}}+g_{21} R_{\bar{\sigma}}}$$

Если учесть, что $g_{21} \gg g_{11}$, а также при условии $R_{\bar{\sigma}} \gg R_{\bar{\sigma}}$, то

$$\Delta I_3 \approx \Delta I_{\text{ок}} \frac{1+g_{21} R_{\bar{\sigma}}}{1+g_{11} R_{\bar{\sigma}}+g_{21} R_{\bar{\sigma}}}$$

Тогда суммарная нестабильность тока коллектора, обусловленная всеми тремя факторами, составит

$$\begin{aligned}\Delta I_{\text{к}} &= \Delta I_1 + \Delta I_2 + \Delta I_3 = \\ &= \frac{\Delta U_{\bar{\sigma}} g_{21}}{1+g_{11} R_{\bar{\sigma}}+g_{21} R_{\bar{\sigma}}} + \Delta \beta I_{\bar{\sigma}0} R_{\bar{\sigma}} \frac{1+g_{11} R_{\bar{\sigma}}}{1+g_{11} R_{\bar{\sigma}}+g_{21} R_{\bar{\sigma}}} + \Delta I_{\text{ок}} \frac{1+g_{21} R_{\bar{\sigma}}}{1+g_{11} R_{\bar{\sigma}}+g_{21} R_{\bar{\sigma}}} = \\ &= \frac{\Delta U_{\bar{\sigma}} g_{21} + \Delta \beta I_{\bar{\sigma}0} R_{\bar{\sigma}} (1+g_{11} R_{\bar{\sigma}}) + \Delta I_{\text{ок}} (1+g_{21} R_{\bar{\sigma}})}{1+g_{11} R_{\bar{\sigma}}+g_{21} R_{\bar{\sigma}}}\end{aligned}$$

Как видно из последней формулы нестабильность коллекторного тока зависит от влияния дестабилизирующих факторов (параметры $\Delta U_{\bar{\sigma}}$, $\Delta \beta$, $\Delta I_{\text{ок}}$), от параметров транзистора (g_{11} , g_{21}) и эквивалентных сопротивлений $R_{\bar{\sigma}}$, $R_{\bar{\sigma}}$, то есть от параметров схемы, в состав которой входит транзистор.

Заметим, что в многокаскадной схеме с непосредственными связями нестабильность тока коллектора последнего каскада обусловлено не только собственной нестабильностью, но отклонениями токов от их номинальных значений в предыдущих каскадах.