

## Стабилизация положения рабочей точки усилительного элемента

В процессе работы положение рабочей точки усилительного элемента изменяется. Это происходит вследствие действия дестабилизирующих факторов, основные из которых:

1. температура;
2. изменение параметров транзистора (старение, замена транзистора при ремонте и др.).

Поскольку изменение положения рабочей точки может привести к падению работоспособности усилительного каскада или к увеличению нелинейных искажений на практике применяют специальные меры для стабилизации рабочей точки усилительного элемента.

Основные способы стабилизации рабочей точки:

1. термокомпенсация;
2. термостабилизация (применение отрицательной обратной связи).

# I. Термокомпенсация (параметрическая стабилизация)

Рабочая точка задана методом фиксированного напряжения. В качестве резистора  $R_2$  делителя применяется терморезистор с отрицательным температурным коэффициентом сопротивления (ТКС), т.е. сопротивление данного резистора уменьшается с ростом температуры.

Ток делителя: 
$$I_{\text{дел}} \cong \frac{E_{\text{к}}}{R_1 + R_2} \gg I_{0\text{б}}.$$

Напряжение покоя базы:

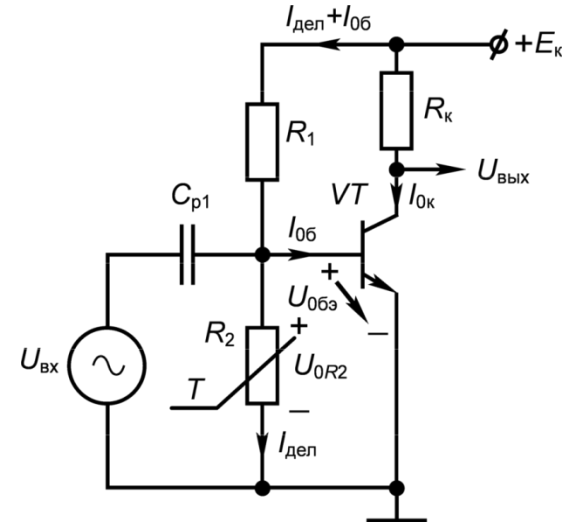
$$U_{0\text{бэ}} \cong U_{R_2} = \frac{E_{\text{к}} \cdot R_2}{R_1 + R_2} = I_{\text{дел}} \cdot R_2.$$

### Механизм компенсации

С ростом температуры возрастает ток покоя коллектора  $I_{0\text{к}}$ .  
Но с ростом температуры снижается сопротивление резистора  $R_2 \Rightarrow$

$$U_{0\text{бэ}} \cong \frac{E_{\text{к}} \cdot R_2 \downarrow}{R_1 + R_2 \downarrow} \Rightarrow I_{0\text{б}} \downarrow \Rightarrow I_{0\text{к}} \downarrow = I_{0\text{б}} \downarrow \cdot \beta$$

Путём выбора  $R_2$  с соответствующим ТКС изменения положения рабочей точки, вызванные изменением температуры окр. Среды можно сделать минимальными, т.е. скомпенсированными.



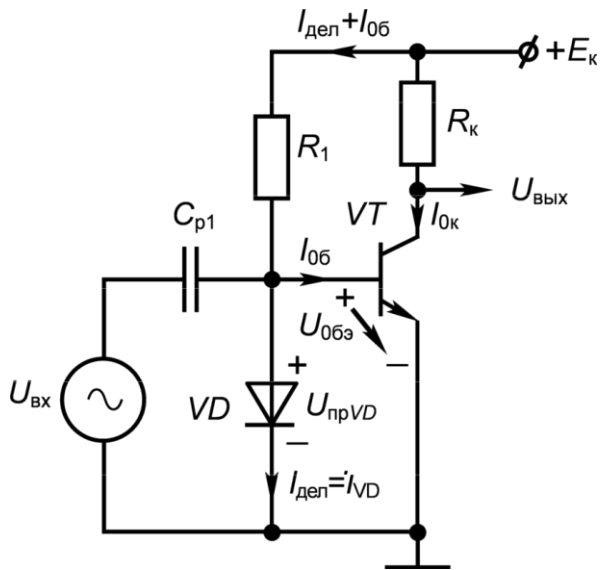
Усилительный каскад ОЭ с термокомпенсацией

**N.B.** Ток коллектора определяется:

$$I_{\text{к}} = I_{\text{б}} \cdot \beta + I_{\text{к0}}$$

Обратный (тепловой) ток  $I_{\text{к0}}$  возрастает в 2 раза при повышении температуры на каждые  $8^\circ\text{C}$  у кремниевого транзистора.

Поскольку  $I_{0\text{к}} = (I_{0\text{б}} \cdot \beta) \downarrow + I_{\text{к0}} \uparrow$ , ток покоя коллектора  $I_{0\text{к}}$  будет изменяться в меньшей степени нежели при отсутствии термокомпенсации. Таким образом происходит компенсация.



Усилительный каскад ОЭ  
с термокомпенсацией

На практике вместо  $R_2$  ставят полупроводниковый диод или стабилитрон.

В данной схеме:  $U_{VD} = U_{об}$ .

### Механизм компенсации

С ростом температуры возрастает ток покоя коллектора  $I_{ок}$ .  
Но с ростом температуры снижается прямое напряжение  $U_{прVD} \Rightarrow U_{об} \downarrow = U_{прVD} \downarrow \Rightarrow I_{об} \downarrow \Rightarrow I_{ок} \downarrow = I_{об} \downarrow \cdot \beta$ .

**N.B.** Прямое напряжение диода характеризуется отрицательным температурным коэффициентом напряжения (ТКН) –  $(1 \div 3) \text{ мВ}/^\circ\text{C}$ .  
Типовое значение:

$$\text{ТКН}_{\text{тип}} = 2,5 \text{ мВ}/^\circ\text{C}$$

На практике требуется подбор диода по ТКН и по необходимому напряжению смещения.

## II. Термостабилизация (применение отрицательной обратной связи)

### 1. Коллекторная стабилизация

Коллекторное напряжение (выходной сигнал) через  $R_6$  подается на базу, причём коллекторное напряжение противофазно входному сигналу, т.е. в данном случае используется отрицательная обратная связь.

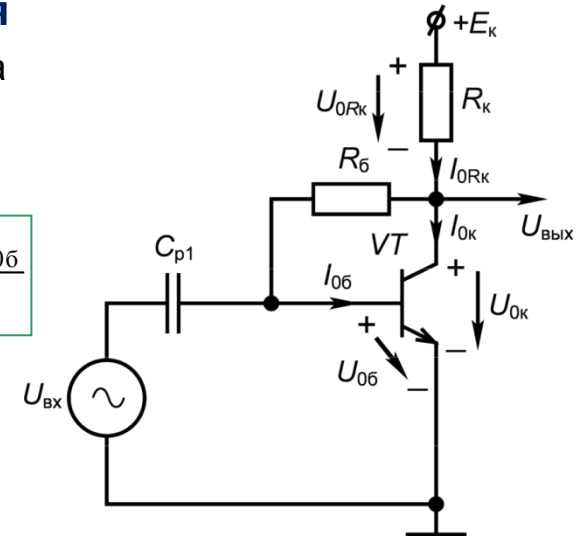
Основные соотношения по законам Кирхгофа:

$$E_k = U_{0Rk} + U_{0k}; \quad I_{0Rk} = I_{06} + I_{0k};$$

$$U_{0k} = I_{06} \cdot R_6 + U_{06} \Rightarrow I_{06} = \frac{U_{0k} - U_{06}}{R_6};$$

$$U_{0k} = E_k - U_{0Rk} = E_k - (I_{06} + I_{0k}) \cdot R_k.$$

$$R_6 = \frac{U_{0k} - U_{06}}{I_{06}}$$



Усилительный каскад по схеме ОЭ с коллекторной стабилизацией

#### Принцип действия

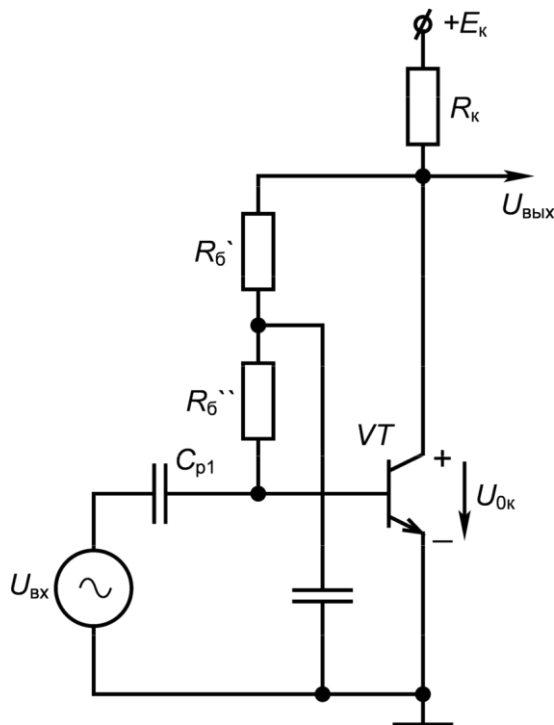
$$t^\circ \uparrow \Rightarrow I_{k0} \uparrow \Rightarrow I_{0k} \uparrow \Rightarrow U_{0Rk} \uparrow = I_{0k} \uparrow \cdot R_k \Rightarrow U_{0k} \downarrow = E_k - U_{0Rk} \uparrow \Rightarrow I_{06} \downarrow = \frac{U_{0k} \downarrow - U_{06}}{R_6} \Rightarrow I_{0k} \downarrow \Rightarrow I_{06} \downarrow \cdot \beta$$

В схеме действует отрицательная обратная связь (ООС), которая не дает измениться положению рабочей точки в той степени, которая была бы (при всех вариантах + и -) при отсутствии данной ООС. Причем изменение положения рабочей точки тем меньше, чем сильнее действие ООС.

Схема представляет собой систему автоматического регулирования с параллельной ООС по напряжению. Данная ОС существует и по переменной и по постоянной составляющей.

**Достоинство:** простота схема

**Недостатки:** 1. снижение коэффициента усиления каскада за счёт действия ОС по переменной составляющей; 2. Такой способ стабилизации обеспечивает фиксацию рабочей точки при  $\Delta t = (20 \div 30)^\circ \text{C}$ .



$$R_{\sigma} = R_{\sigma}^{\prime} + R_{\sigma}^{\prime\prime}; \quad R_{\sigma}^{\prime} \approx R_{\sigma}^{\prime\prime}.$$

$$R_{\sigma} = \frac{U_{0к} - U_{0б}}{I_{0б}};$$

По постоянному току режим не изменился.  
По переменной составляющей сигнал не воздействует на вход транзистора.

*Усилительный каскад по схеме ОЭ с коллекторной стабилизацией с устранением ООС по переменной составляющей*

Схемы ОК и ОБ с коллекторной стабилизацией представлены на слайде 8.

## 2. Эмиттерная стабилизация

Для организации ООС в эмиттерную цепь введено сопротивление  $R_э$ . Данное сопротивление является датчиком изменения коллекторного тока транзистора при изменении температуры. Рабочая точка задана методом фиксированного напряжения.

В схеме  $I_{дел} \gg I_{0б}$ , т.е. потенциал базы (отн. «земли») оказывается зафиксированным и практически не зависит от  $I_{0б}$ :

$$U_{0R62} = \frac{E_k \cdot R_{62}}{R_{61} + R_{62}} = \text{const.}$$

По 2-му закону Кирхгофа справедливо:

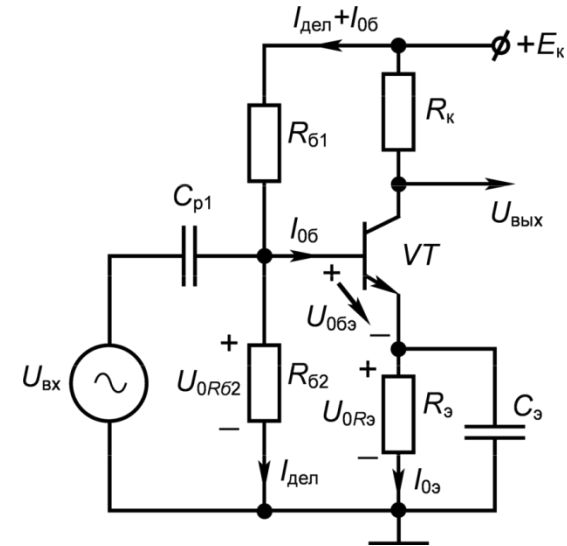
$$U_{0бэ} = U_{0R62} - U_{0Rэ}.$$

### Принцип действия

Под действием увеличивающейся температуры:

$$\begin{aligned} t^\circ \uparrow \Rightarrow I_{к0} \uparrow \Rightarrow I_{0к} \uparrow \Rightarrow I_{0э} \uparrow \Rightarrow U_{0Rэ} \uparrow = I_{0э} \uparrow \cdot R_э \Rightarrow U_{0бэ} \downarrow = U_{0R62} (\text{const}) - U_{0Rэ} \uparrow \Rightarrow I_{0б} \downarrow \Rightarrow \\ \Rightarrow I_{0к} \downarrow \Rightarrow I_{0б} \downarrow \cdot \beta. \end{aligned}$$

В схеме действует ООС, препятствующая изменению положения рабочей точки. Данная связь действует по постоянному току благодаря резистору  $R_э$ , включенному в эмиттерную цепь транзистора. Обратной связи по переменной составляющей нет, т.к.  $R_э$  по «переменке» зашунтировано емкостью  $C_э$ .



Усилительный каскад по схеме ОЭ с коллекторной стабилизацией

Емкостное сопротивление конденсатора должно быть на порядок меньше  $R_3$ :

$$X_{C_3} = \frac{1}{\omega_n C_3} = 0,1C_3, \quad \text{где } \omega_n \text{ – нижняя граничная частота полосы усиления каскада.}$$

Эффективность данного вида стабилизации тем выше, чем больше сопротивление в эмиттерной цепи.

На практике задаются:

$$U_{0R_3} = I_{0_3} \cdot R_3 = (0,1 \div 0,3)E_k \quad \text{или} \quad U_{0R_3} = (3 \div 5)\text{В.}$$

При этом с ростом стабильности снижается КПД.

Данный способ позволяет поддерживать исходный режим по постоянному току при изменении температуры  $\Delta t = (70 \div 100)^\circ\text{C}$ .

Для расчета элементов цепи задаемся  $I_{0_6}$  и  $U_{0_6_3}$  (из входной характеристики транзистора и требуемого класса усиления), тогда

$$R_{\sigma 1} = \frac{E_k - U_{0R_62}}{I_{\text{дел}} + I_{0_6}} = \frac{E_k - (U_{0_6_3} + U_{0R_3})}{I_{\text{дел}} + I_{0_6}}; \quad R_{\sigma 2} = \frac{U_{0R_62}}{I_{\text{дел}}} = \frac{U_{0_6_3} + U_{0R_3}}{I_{\text{дел}}}.$$

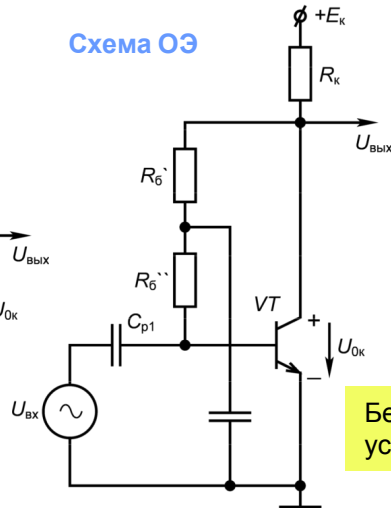
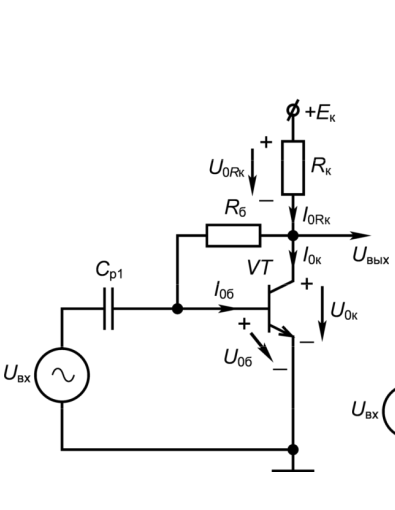
Рассмотренный вид стабилизации может быть использован в различных схемах включения транзистора (см. следующий слайд).

В данной схеме стабилизации используется последовательная ООС по току.

# Стабилизация положения рабочей точки усилительного элемента

## I. Коллекторная стабилизация

Схема ОЭ



Без снижения усиления

Схема ОБ

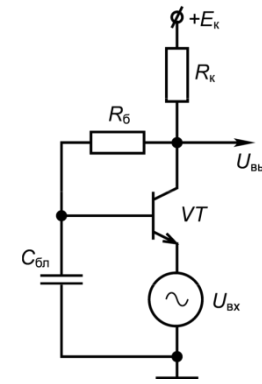
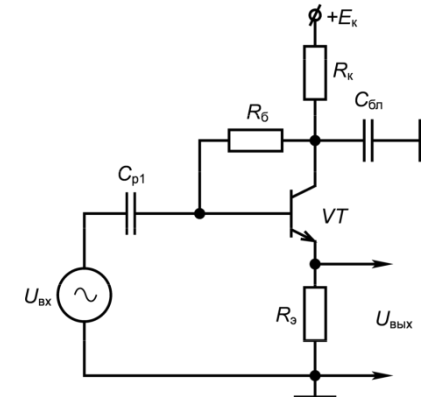


Схема ОК



## II. Эмиттерная стабилизация

Схема ОЭ

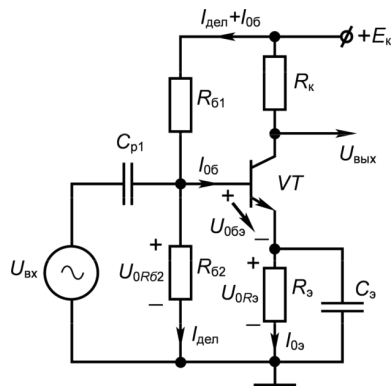


Схема ОБ

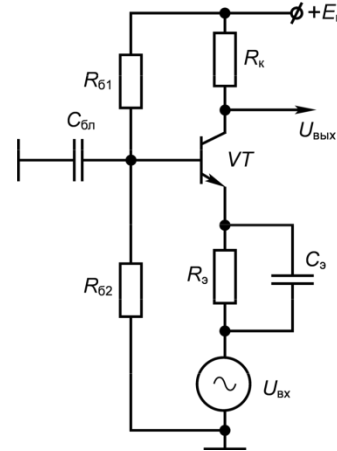
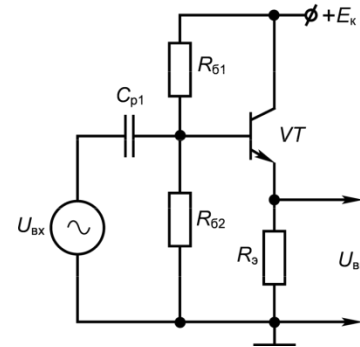


Схема ОК



Данная схема – эмиттерный повторитель. Соотношения те же, что и для схемы ОЭ.

Особенностью схемы является ООС по напряжению, существующая и по переменной составляющей. Следствием 100% ООС является снижение коэффициента усиления по напряжению до 1 (и меньше).

Схема ОБ. По переменной составляющей база транзистора через блокирующий конденсатор  $C_{бп}$  подключена к «земле» (общая точка для входной и выходной цепей каскада), превращая схему усилителя в схему с ОБ. По постоянной составляющей схема идентична сх. ОЭ,  $\Rightarrow$ , все расчетные соотношения, а также механизм стабилизации положения рабочей точки точно такие же как в сх. ОЭ.

Следствием данного вида ОС является весьма высокое входное и малое выходное сопротивление каскада, что позволяет использовать его в качестве согласующего (т.е.  $R_f > R_H$ ). Схема характеризуется высокой стабильностью положения рабочей точки.



## Ссылки

---

1. Гусев В.Г., Гусев Ю.М. Электроника и микропроцессорная техника: Учеб. для вузов. – М.: Высш. шк., 2008. – 798 с.
2. Забродин Ю.С. Промышленная электроника: учебник для вузов — Москва: Альянс, 2013. — 496 с.
3. Лачин В.И., Савёлов Н.С. Электроника: Учебное пособие. – Изд. 8-е. – Ростов н/Д: Феникс, 2010. – 703 с.
4. Миловзоров О.В., Панков И.Г. Электроника [Электронный ресурс] : учебник для бакалавров / О. В. Миловзоров, И. Г. Панков. — 5-е изд. — Москва: Юрайт, 2013. — Доступ из корпоративной сети ТПУ. Схема доступа: <http://www.lib.tpu.ru/fulltext2/m/2014/FN/fn-37.pdf>
5. Фомичев Ю.М., Сергеев В.М. Электроника. Элементная база, аналоговые и цифровые функциональные устройства [Электронный ресурс] : учебное пособие; Национальный исследовательский Томский политехнический университет (ТПУ). — Доступ из корпоративной сети ТПУ. Схема доступа: <http://www.lib.tpu.ru/fulltext2/m/2012/m59.pdf>