

### 31. ИОН с термокомпенсацией.

### 32. Масштабный преобразователь опорного напряжения. Температурный коэффициент (ТК) напряжения база-эмиттер БТ. Источник с зонным опорным напряжением

Способность ПТ особым образом изменять свои параметры под влиянием температуры окружающей среды с образованием на сток-затворной характеристике

$$I_c = f(U_{зи})|_{U_{си} = const}$$

так называемой термостабильной точки (ТСТ) с координатами  $U_{зи.0}$  и  $I_{с.0}$  позволяет использовать его как источник термостабильного тока  $I_0 = I_{с.0}$  и опорного напряжения  $U_0 = U_{зи.0}$ .

Сток-затворные (проходные или передаточные) ПТ

$$I_c(U_{зи}) = I_{с.макс} \left( 1 - \frac{U_{зи}}{U_{зи.отс}} \right)^2,$$

а характеристики крутизны – прямой линией:

$$S(U_{зи}) = \frac{\partial I_c}{\partial U_{зи}}(U_{зи}) = S_{макс} \left( 1 - \frac{U_{зи}}{U_{зи.отс}} \right),$$

где  $I_{с.макс}$  и  $S_{макс}$  – максимальные значения тока-стока и крутизны, определяемые при  $U_{зи} = 0$ ;  $U_{зи.отс}$  – напряжение отсечки тока стока;

$$S_{макс} = \frac{\partial I_c}{\partial U_{зи}}(U_{зи})|_{U_{зи}=0} = -\frac{2I_{с.макс}}{U_{зи.отс}}.$$

Характеристику крутизны (3.2) с учётом (3.1) и (3.3) можно представить и в другом, удобном в ряде случаев для практического использования, виде:

$$S(U_{зи}) = -\frac{2I_{с.макс}}{U_{зи.отс}} \sqrt{\frac{I_c(U_{зи})}{I_{с.макс}}} = -\frac{2\sqrt{I_c(U_{зи})I_{с.макс}}}{U_{зи.отс}}.$$

Координаты ТСТ для ПТ с каналом n-типа описываются уравнениями

$$U_{зи.0} = U_{зи.отс} - 2\frac{\beta}{\alpha},$$

$$I_{с.0} = I_c(U_{зи})|_{U_{зи}=U_{зи.отс}},$$

где  $\alpha$  и  $\beta$  – температурные коэффициенты (ТК)

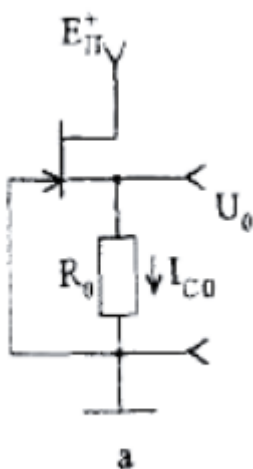
Используя (3.5) и (3.1), определяем соответствующий ТСТ ток стока (3.6)

$$I_{C.0} = I_{C.МАКС} \left( 1 - \frac{U_{ЗИ.0}}{U_{ЗИ.ОТС}} \right)^2 = \left( \frac{2\beta}{\alpha} \right)^2 \frac{I_{C.МАКС}}{U_{ЗИ.ОТС}^2},$$

или с учетом вышеприведенных значений ТК  $\beta$  и  $\alpha$

$$I_{C.0} \approx 0,44 \frac{I_{C.МАКС}}{U_{ЗИ.ОТС}^2 [В^{-2}]},$$

$$U_0 = I_{C.0} R_0 = -U_{ЗИ.0} = - \left( U_{ЗИ.ОТС} - \frac{2\beta}{\alpha} \right) = -(U_{ЗИ.ОТС} + 0,66[В]),$$



При повышении и понижении температуры входные характеристики смещаются в сторону меньших и больших входных напряжений соответственно. Напряжение между базой и эмиттером для кремниевых транзисторов уменьшается примерно на 2 мВ при увеличении температуры на каждый градус Цельсия

Для полупроводников без примесей он отрицателен (сопротивление с ростом температуры падает), поскольку при повышении температуры всё большее число электронов переходит в зону проводимости, соответственно увеличивается и концентрация дырок

### 33. ПТ как источник термостабильного тока и опорного напряжения.

#### Прецизионные ИОН на ПТ и ОУ

Способность ПТ особым образом изменять свои параметры под влиянием температуры окружающей среды с образованием на сток-затворной характеристике так называемой термостабильной точки (ТСТ) с координатами позволяет использовать его как источник термостабильного тока и опорного напряжения. Сток-затворные (проходные или передаточные) характеристики практические всех типов ПТ, как с р-n-переходом, так и МОП транзисторов, работающих в режимах обеднения и обогащения, могут быть представлены квадратической параболой:

$$I_C(U_{ЗИ}) = I_{С.МАКС} \left( 1 - \frac{U_{ЗИ}}{U_{ЗИ.ОТС}} \right)^2,$$

Характеристики крутизны - прямой:

$$S(U_{ЗИ}) = \frac{\partial I_C}{\partial U_{ЗИ}}(U_{ЗИ}) = S_{МАКС} \left( 1 - \frac{U_{ЗИ}}{U_{ЗИ.ОТС}} \right),$$

$$S_{МАКС} = \frac{\partial I_C}{\partial U_{ЗИ}}(U_{ЗИ}) \Big|_{U_{ЗИ}=0} = -\frac{2I_{С.МАКС}}{U_{ЗИ.ОТС}}.$$

$$U_0 = I_{C0}R_0 = -U_{ЗИ0} = -\left( U_{ЗИ.ОТС} - \frac{2V}{6} \right) = -(U_{ЗИ.ОТС} + 0,66[V]),$$

Опорное напряжение:

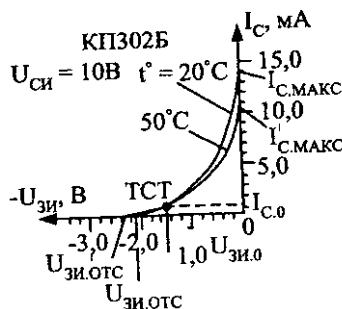


Рис. 3.3. Сток-затворные характеристики ПТ при двух значениях температуры

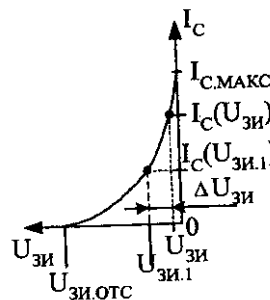
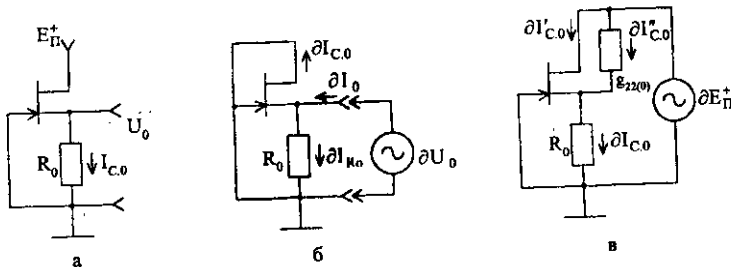


Рис. 3.4. Диаграммы сток-затворной характеристики ПТ, поясняющие метод измерения напряжения отсечки



$$R_{i.ГСТ} = \frac{1 + S_0 R_0}{g_{22(0)}} = \frac{F_0}{g_{22(0)}}.$$

Собственная выходная проводимость ПТ в общем случае определяется по его выходной характеристике:  $g_{22} = \frac{1}{R_i} = \frac{\partial I_C}{\partial U_{СИ}} \Big|_{U_{ЗИ}} = const = \frac{I_C}{U_B}.$

Коэффициент фильтрации питающего напряжения:  $K_{\Phi} = \frac{\partial E_{\Pi}^{+}}{\partial U_0} = \frac{R_{i.\Gamma CT}}{R_0}$ ,

$$E_{\Pi}^{+} = \frac{U_{\text{ЗИ.МАКС}} - U_{\text{ЗИ.ОТС}}}{2}.$$

Прецизионные источники опорного напряжения на основе ПТ.

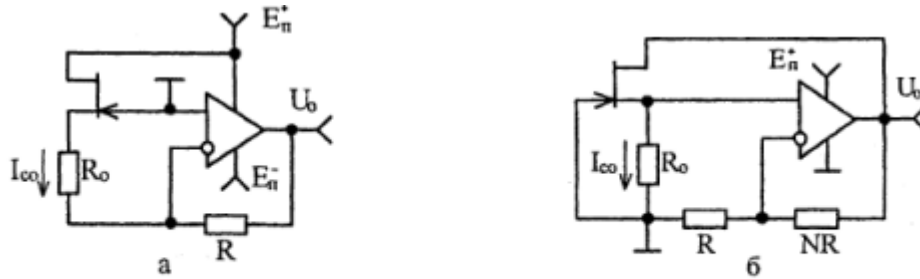


Рис. 3.6. ИОН с масштабным преобразованием термостабильного тока стока ПТ в напряжение на основе инвертирующей (а) и неинвертирующей (б) ОС

$$K_{\Phi} = \frac{R_{i.\Gamma CT}}{R}, \quad U_0 = I_{co} R_0 (1 + N) \geq -U_{\text{ЗИ.ОТС}}, \quad N = \frac{U_0}{I_{co} R_0} - 1, \quad K_{\Phi} = \frac{\partial E_{\Pi}^{+}}{\partial U_{\text{CM.0}}} \cdot \frac{\partial U_{\text{CM.0}}}{\partial U_0}.$$

$$R_{i.U_0} = \frac{R_{\text{вх.ИХ}}}{1 + \frac{K_0}{1 + N}}.$$

### 34. Основные типы каскадов и особенности их реализации в ПИС. Однотактные и двухтактные

Используемые в ПИС каскады можно условно разделить на 3 группы: однотактные, двухтактные и дифференциальные.

К однотактным относят каскады с ОЭ, ОК и ОБ

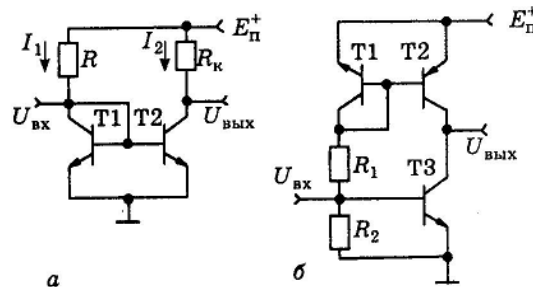


Рис.4.6. Однотактные каскады усиления напряжения

Каскад с ОЭ (рис. а) обеспечивает необходимый режим по постоянному току за счет использования ДТС на Т1 и Т2. При условии  $R=2R_k$  выходное напряжение в режиме покоя  $U_{вых0}=E_n/2$ . Коэффициент передачи подобных каскадов с ОЭ

$$|K| = \frac{Y_{21}}{Y_{22} + Y_n} \approx Y_{21} R_n = \frac{R_k}{r_3}$$

Максимальный коэффициент передачи будет соответствовать максимальному сопротивлению нагрузки  $R_{\text{макс}} = \frac{E_n}{2I_2} = \frac{E_n}{2I_3}$

$$|K_{\text{макс}}| \approx \frac{R_{\text{макс}}}{r_3} = \frac{E_n}{2\phi_T}$$

С целью повышения коэффициента передачи можно вместо сопротивления  $R_k$  использовать БТ (рис. б). Для этой схемы коэффициент передачи:

$$|K| = \frac{Y_{21(T3)}}{Y_{22(T3)} + Y_{22(T2)}}$$

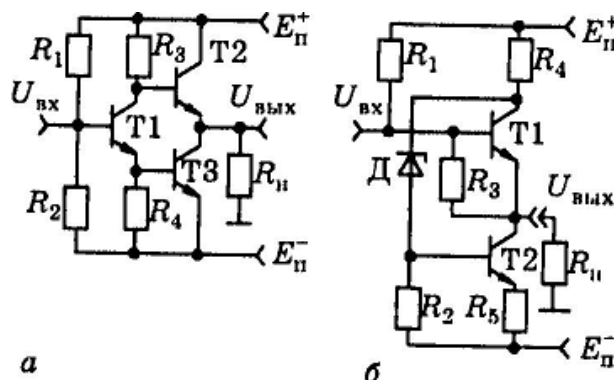


Рис.4.7. Двухтактные каскады усиления мощности

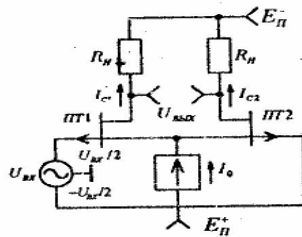


Рис.8.47. Упрощенная схема ДУ на ПТ с подключенным источником сигнала  $U_{вх}$

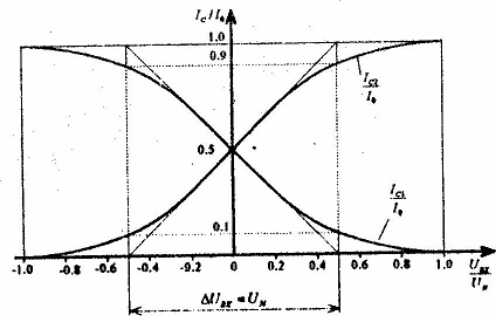


Рис.8.48. Нормированные характеристики токов стока дифференциальной пары ПТ

$$I_{C1} = I_{C.МАКС} \left( 1 - \frac{U_{ЗИ} + U_{ВХ}/2}{U_{ЗИ.ОТС}} \right)^2 = I_{C.МАКС} \left( \sqrt{\frac{I_0}{2I_{C.МАКС}}} - \frac{U_{ВХ}}{2U_{ЗИ.ОТС}} \right)^2 = \frac{I_0}{2} \left( 1 - \frac{U_{ВХ}}{U_N} \right)^2, \quad (8.355)$$

$$I_{C2} = I_{C.МАКС} \left( 1 - \frac{U_{ЗИ} - U_{ВХ}/2}{U_{ЗИ.ОТС}} \right)^2 = \frac{I_0}{2} \left( 1 + \frac{U_{ВХ}}{U_N} \right)^2, \quad (8.356)$$

где  $I_0, U_N$  - ток ГСТ и нормированное входное напряжение дифференциальной пары ПТ ДУ;

Сумма токов стока ПТ соответствует току ГСТ

$$I_0 = I_{C1} + I_{C2} = I_{C1} \left( 1 + \frac{I_{C2}}{I_{C1}} \right) = I_{C2} \left( 1 + \frac{I_{C1}}{I_{C2}} \right),$$

который дает возможность эти токи (8.355) и (8.356) представить в виде

$$\frac{I_{C1}}{I_0} = \frac{1}{1 + \left( \frac{1 + U_{ВХ}/U_N}{1 - U_{ВХ}/U_N} \right)^2} = \frac{1}{2} - \frac{U_{ВХ}/U_N}{1 + (U_{ВХ}/U_N)^2}, \quad (8.358)$$

$$\frac{I_{C2}}{I_0} = \frac{1}{1 + \left( \frac{1 - U_{ВХ}/U_N}{1 + U_{ВХ}/U_N} \right)^2} = \frac{1}{2} + \frac{U_{ВХ}/U_N}{1 + (U_{ВХ}/U_N)^2}.$$

$$S(U_{ВХ}) = \frac{\partial I_C}{\partial U_{ВХ}}(U_{ВХ}) = \frac{I_0}{U_N} \cdot \frac{1 - (U_{ВХ}/U_N)}{1 + (U_{ВХ}/U_N)^2} = S(0) \frac{1 - (U_{ВХ}/U_N)}{1 + (U_{ВХ}/U_N)^2},$$

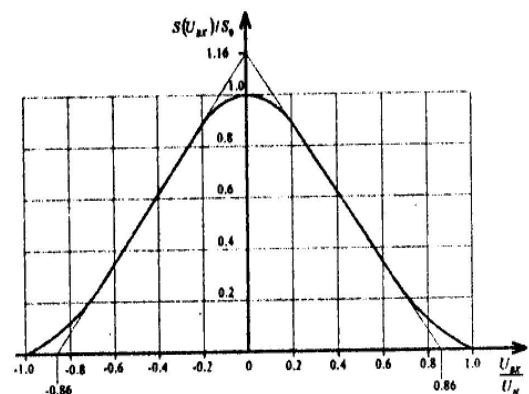


Рис.8.49. Нормированная характеристика крутизны дифференциальной пары ПТ и ее линейная аппроксимация