

ЛЕКЦИЯ 4. УСИЛИТЕЛИ НА БИПОЛЯРНЫХ ТРАНЗИСТОРАХ

1

4.1. Общие положения

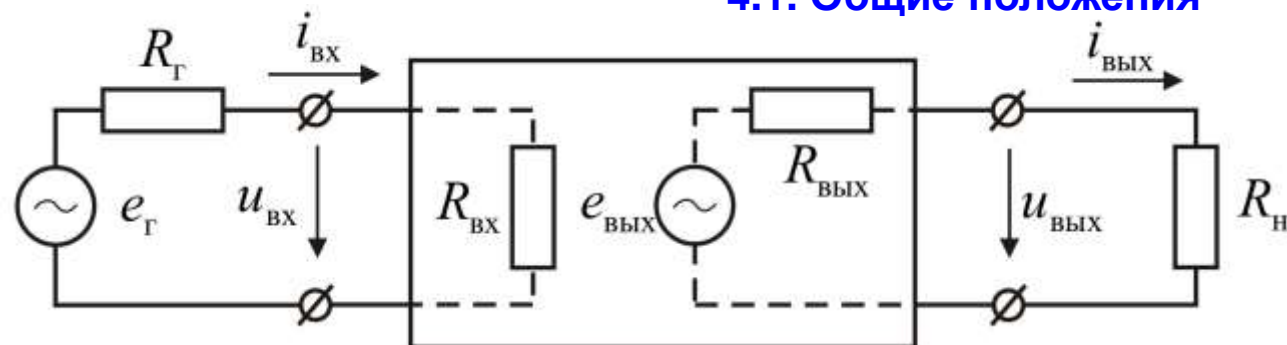


Рис. 4.1. Входные и выходные цепи усилителя.

$$K_U = \frac{U_{\text{ВЫХ}}}{U_{\text{ВХ}}};$$

$$K_I = \frac{I_{\text{ВЫХ}}}{I_{\text{ВХ}}}; \quad (4.1)$$

$$K_P = \frac{P_{\text{ВЫХ}}}{P_{\text{ВХ}}} = \frac{U_{\text{ВЫХ}} I_{\text{ВЫХ}}}{U_{\text{ВХ}} I_{\text{ВХ}}}$$

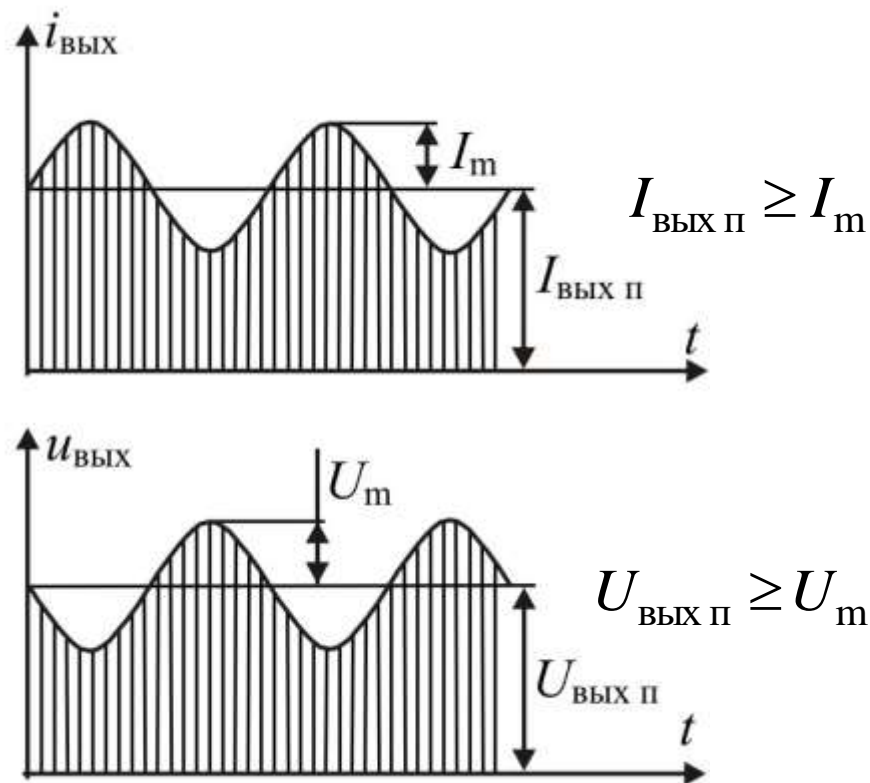
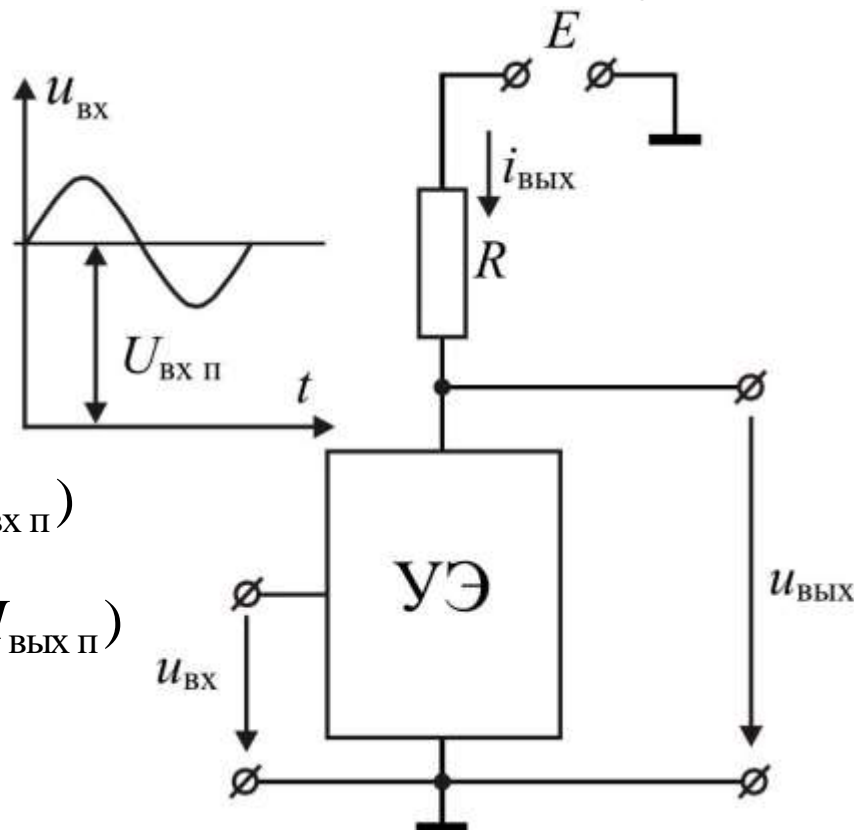
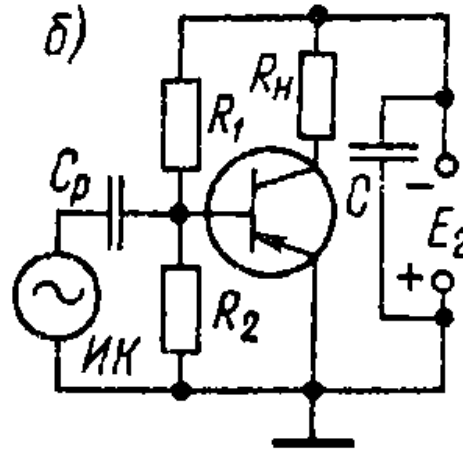
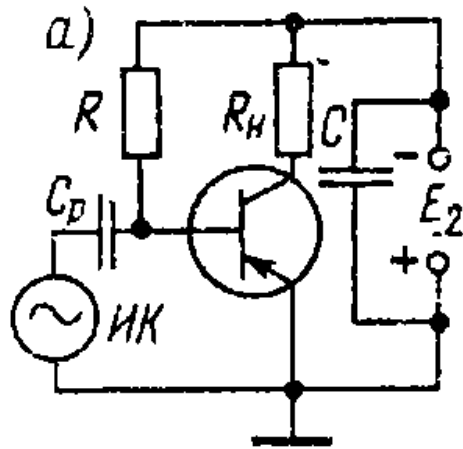


Рис. 4.2. Принцип построения и временные диаграммы усилительного каскада.



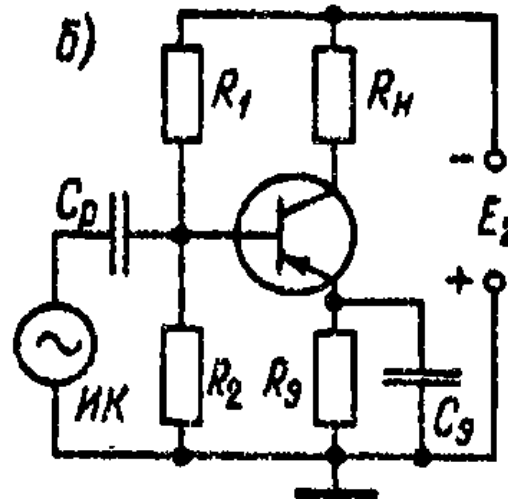
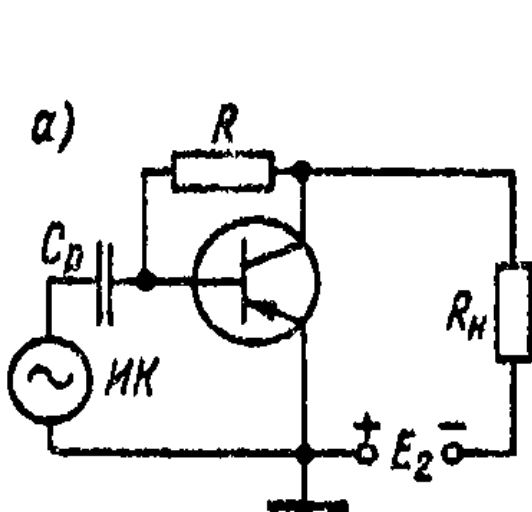
$$U_{\text{бэ0}} = E_2 - I_{\text{б0}} \cdot R. \quad (4.2)$$

$$R = \frac{E_2 - U_{\text{бэ0}}}{I_{\text{б0}}} \approx \frac{E_2}{I_{\text{б0}}}. \quad (4.3) \quad U_{\text{бэ0}} \ll E_2$$

$$R_1 = \frac{E_2 - U_{\text{бэ0}}}{I_{\text{д}} + I_{\text{б0}}} \approx \frac{E_2}{I_{\text{д}} + I_{\text{б0}}}; \quad R_2 = \frac{U_{\text{бэ0}}}{I_{\text{д}}}, \quad (4.4)$$

Рис. 4.3. Схемы подачи напряжения смещения на базу транзистора.

$$\frac{1}{\omega_{\text{H}} C_{\text{p}}} \ll R_{\text{BX}}. \quad (4.5) \quad \frac{1}{\omega_{\text{H}} C_{\text{p}}} \leq 0,1 \cdot R_{\text{BX}}. \quad (4.6) \quad C_{\text{p}} \geq \frac{10}{\omega_{\text{H}} R_{\text{BX}}}. \quad (4.7) \quad R'_{\text{BX}} = \frac{R_{\text{BX}} \cdot R_2}{R_{\text{BX}} + R_2}. \quad (4.8) \quad C \geq \frac{10 \cdot 10^6}{2\pi f_{\text{H}} R_{\text{H}}}. \quad (4.9)$$



$$T^{\circ} \uparrow \Rightarrow I_{\text{к}} \uparrow \Rightarrow U_{R_{\text{H}}} \uparrow \Rightarrow (U_{\text{R}} \text{ и } U_{\text{бэ}}) \downarrow \Rightarrow I_{\text{к}} \downarrow$$

$$U_{\text{э0}} = I_{\text{э0}} \cdot R_{\text{э}} \quad U_2 = I_{\text{д}} \cdot R_2$$

$$U_{\text{бэ0}} = U_2 - U_{\text{э0}}$$

$$T^{\circ} \uparrow \Rightarrow I_{\text{к}} \uparrow \Rightarrow I_{\text{э}} \uparrow \Rightarrow (U_{\text{э0}} = I_{\text{э0}} \cdot R_{\text{э}}) \uparrow \Rightarrow (U_{\text{бэ0}} = U_2 - U_{\text{э0}}) \downarrow \Rightarrow I_{\text{э}} \downarrow \Rightarrow I_{\text{к}} \downarrow$$

$$R_1 \approx \frac{E_2 - U_{\text{э0}}}{I_{\text{д}} + I_{\text{б0}}}; \quad R_2 \approx \frac{U_{\text{э0}}}{I_{\text{д}}}; \quad R_{\text{э}} = \frac{U_{\text{э0}}}{I_{\text{э0}}}. \quad (4.11)$$

Рис. 4.4. Схемы температурной стабилизации режима покоя усилительного каскада.

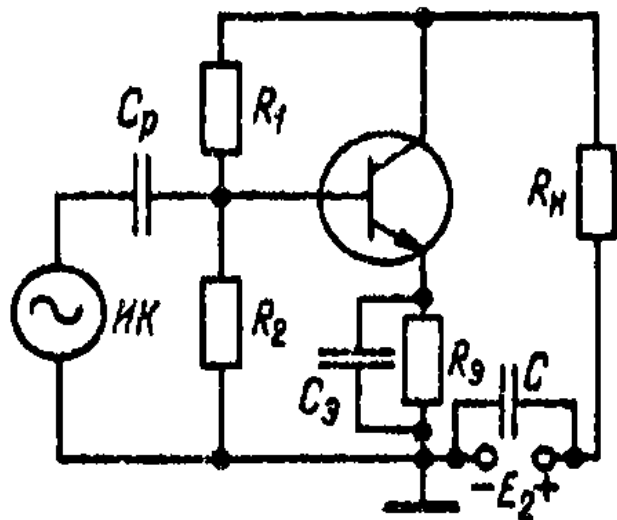


Рис. 4.5. Схема коллекторно-эмиттерной стабилизации.

$$E_2 = I_{\text{б0}} \cdot R + U_{\text{бэ0}} + I_{\text{э0}} \cdot R_{\text{ИК}},$$

(4.12)

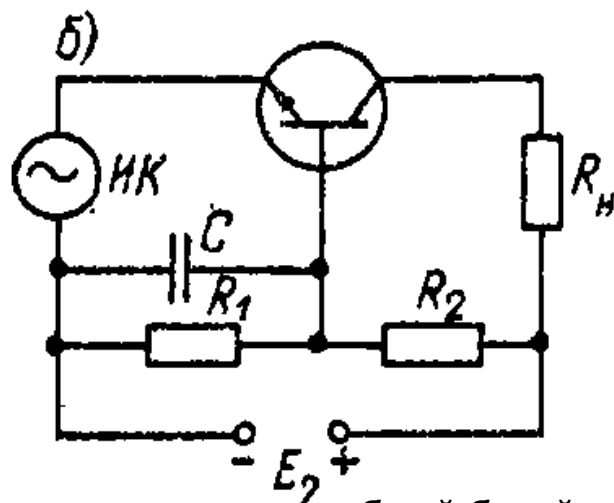
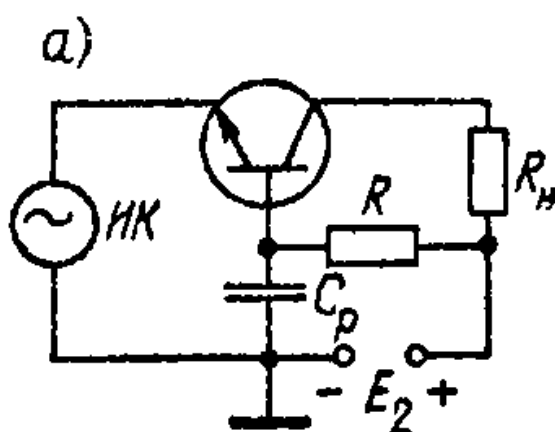
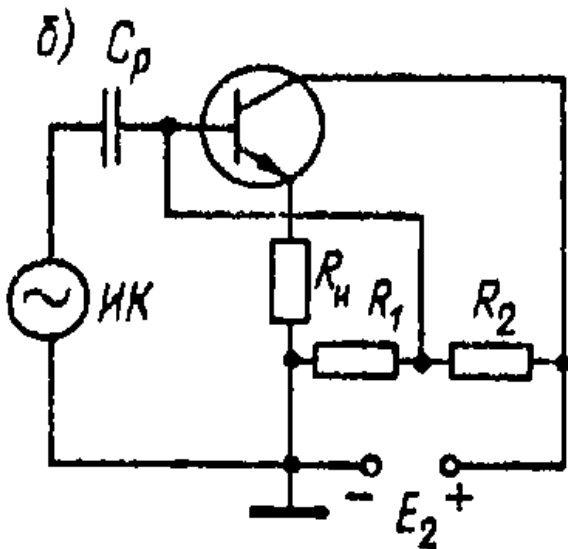
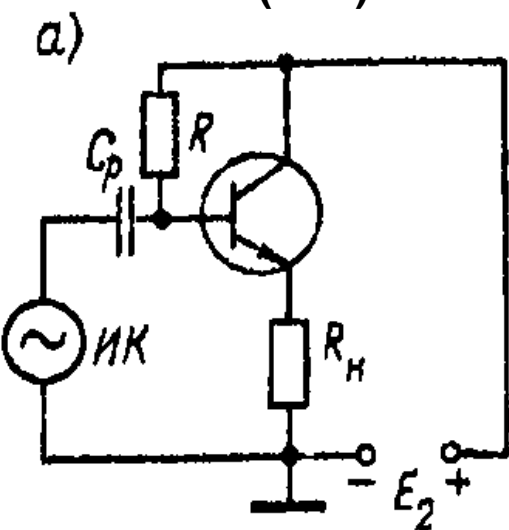


Рис. 4.6. Схема питания транзистора, включенного с общей базой.

$$R = \frac{E_2 - U_{\text{бэ0}} - I_{\text{э0}} \cdot R_{\text{ИК}}}{I_{\text{б0}}}, \quad R_1 = \frac{U_{\text{бэ0}} + I_{\text{э0}} \cdot R_{\text{ИК}}}{I_{\text{д}}}, \quad R_2 = \frac{E_2 - I_{\text{д}} \cdot R_1}{I_{\text{д}} + I_{\text{б0}}} \quad (4.13)$$

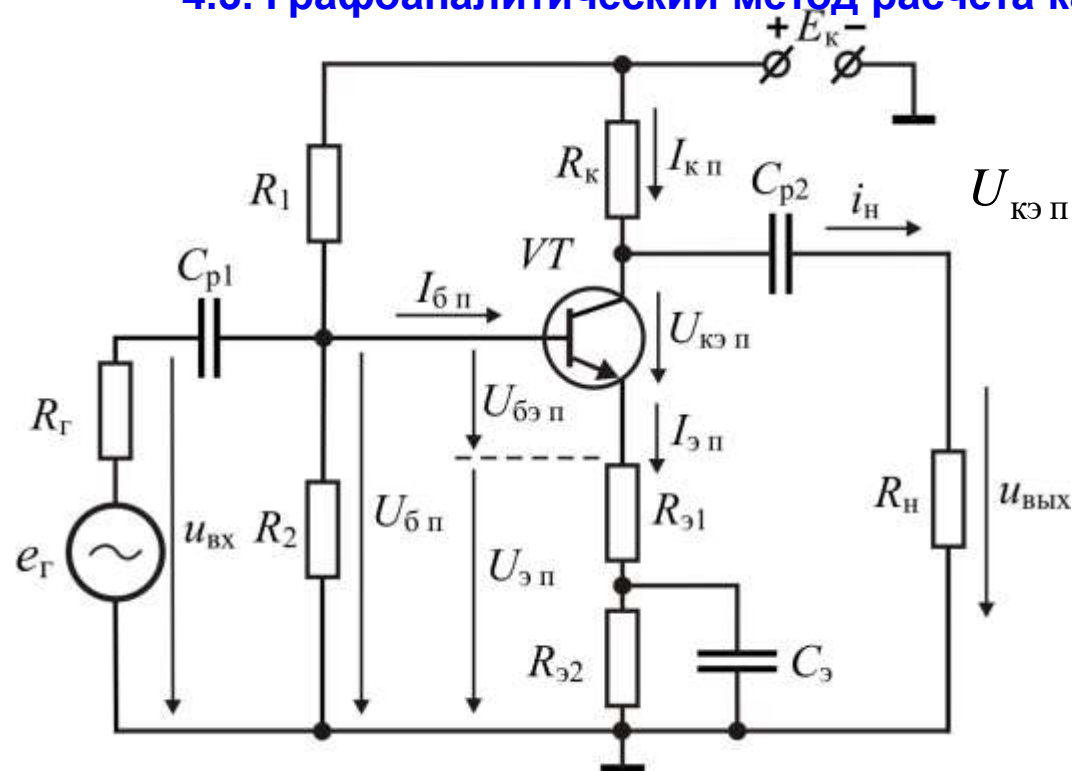


$$E_2 = I_{\text{б0}} \cdot R + U_{\text{бэ0}} + I_{\text{э0}} \cdot R_{\text{н}}. \quad (4.15)$$

$$R = \frac{E_2 - U_{\text{бэ0}} - I_{\text{э0}} \cdot R_{\text{н}}}{I_{\text{б0}}}. \quad (4.16)$$

$$R_1 = \frac{U_{\text{бэ0}} + I_{\text{э0}} \cdot R_{\text{н}}}{I_{\text{д}}}, \quad R_2 = \frac{E_2 - I_{\text{д}} \cdot R_1}{I_{\text{д}} + I_{\text{б0}}} \quad (4.17)$$

Рис. 4.7. Схема питания транзистора, включенного по схеме ОК.



Линия нагрузки по постоянному току

$$U_{КЭП} = E_K - I_{КП} R_K - I_{ЭП} R_{Э} = E_K - I_{КП} R - \frac{I_{КП}}{\alpha} R_{Э}. \quad (4.18)$$

При $\alpha \rightarrow 1$, $U_{КЭП} = E_K - I_{КП} (R_K + R_{Э})$; (4.19)

$$R_K + R_{Э} = R_K + R_{Э1} + R_{Э2} = R_{\sim} \quad U_{КП} \approx E_K / 2$$

Линия нагрузки по переменному току

$$R_{К\sim} = \frac{R_K R_H}{R_K + R_H} \quad (4.20) \quad K_U = \frac{R_{К\sim}}{R_{Э1}} \quad (4.21)$$

$$R_{\sim} = R_{К\sim} + R_{Э1}$$

Рис. 4.8. Усилитель с общим эмиттером.

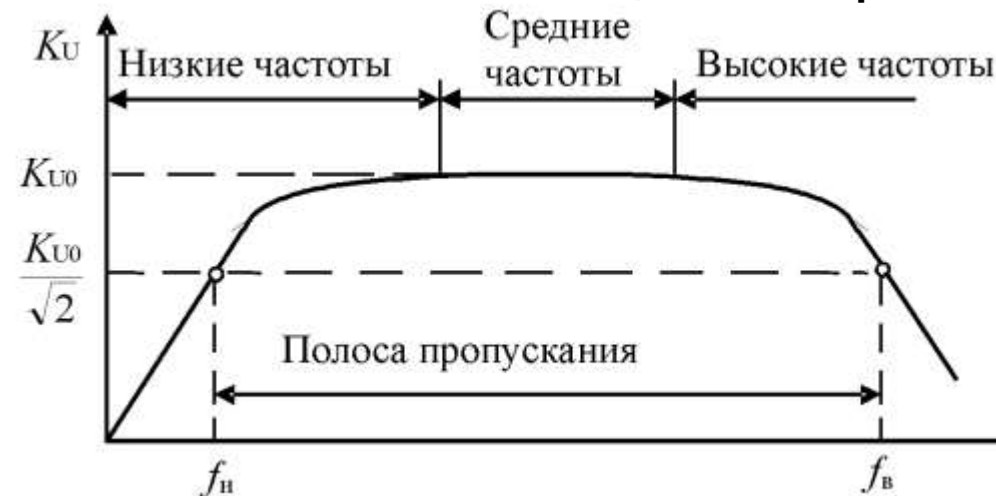


Рис. 4.11. Амплитудно-частотная характеристика.

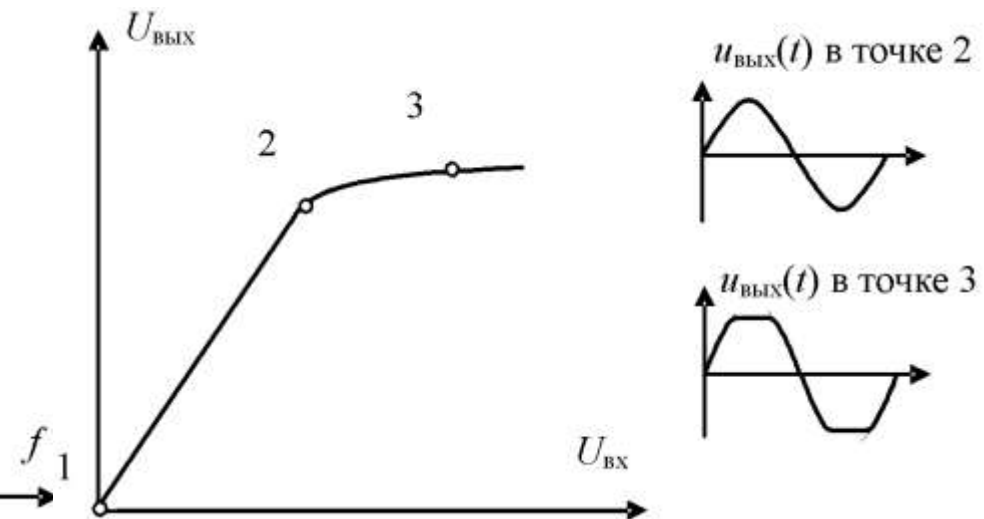
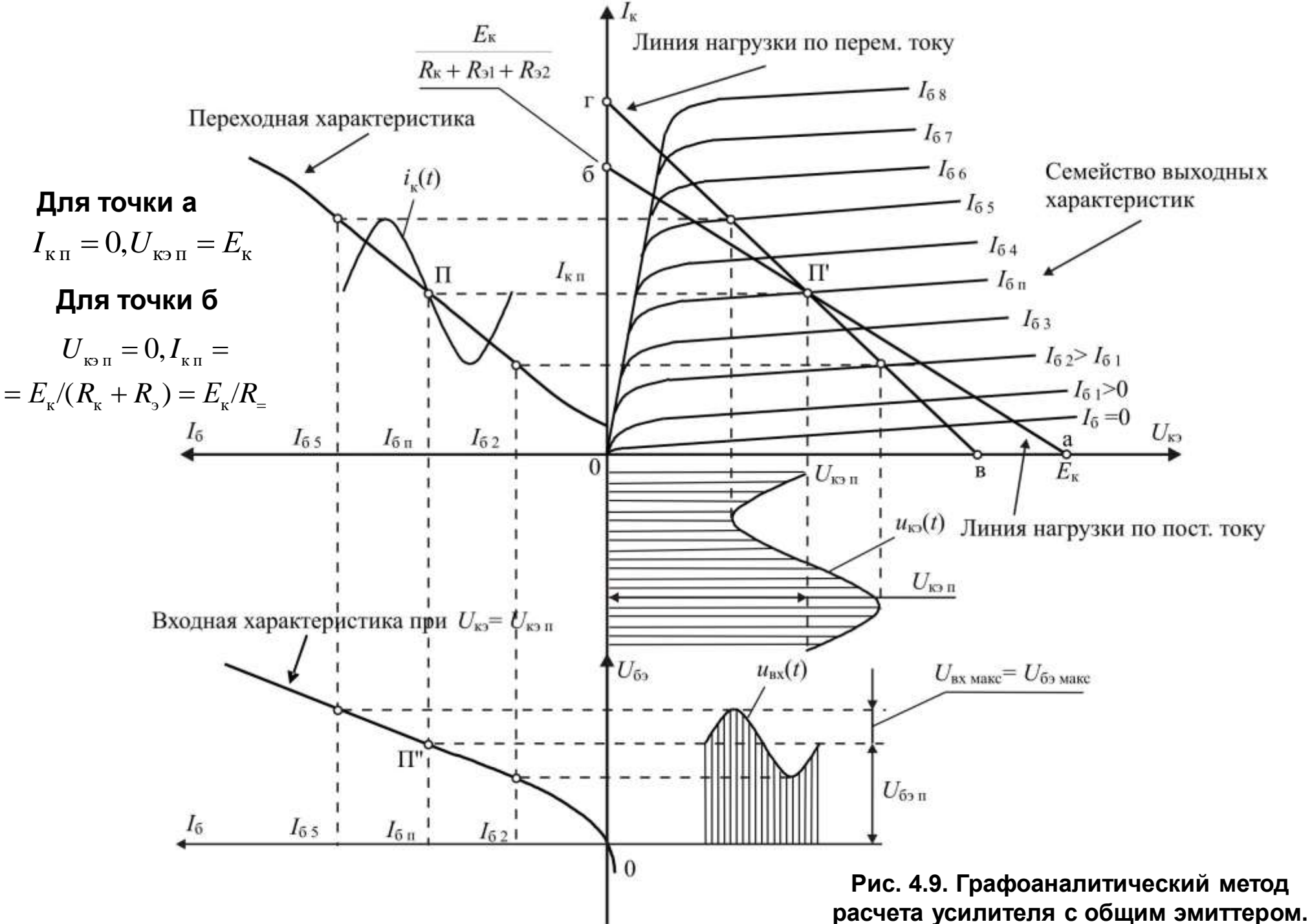


Рис. 4.10. Амплитудная характеристика усилителя.



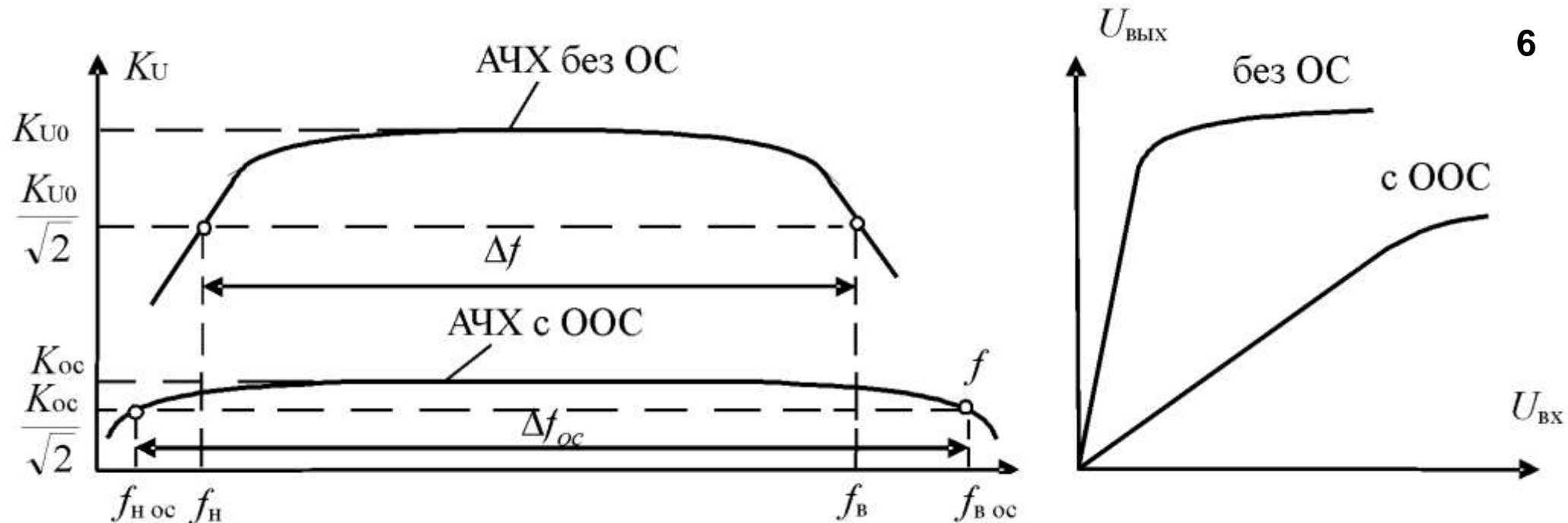


Рис. 4.12. Влияние ООС на характеристики усилителя.

Температурная стабилизация точки покоя

$$I_{\text{кп}} \uparrow \Rightarrow I_{\text{эп}} \uparrow \Rightarrow U_{\text{эп}} \uparrow = I_{\text{эп}} \uparrow (R_{\text{э1}} + R_{\text{э2}}) = I_{\text{эп}} \uparrow \cdot R_{\text{э}}$$

$$U_{\text{бп}} = \text{const} \quad U_{\text{бэп}} \downarrow = U_{\text{бп}} - U_{\text{эп}} \uparrow \Rightarrow I_{\text{бп}} \downarrow \Rightarrow I_{\text{кп}} \downarrow = \beta \cdot I_{\text{бп}} \downarrow \quad U_{\text{эп}} \approx (0,1 \div 0,3) E_{\text{к}}$$

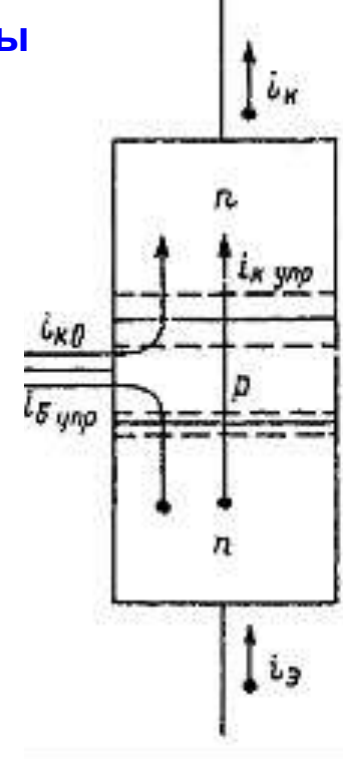
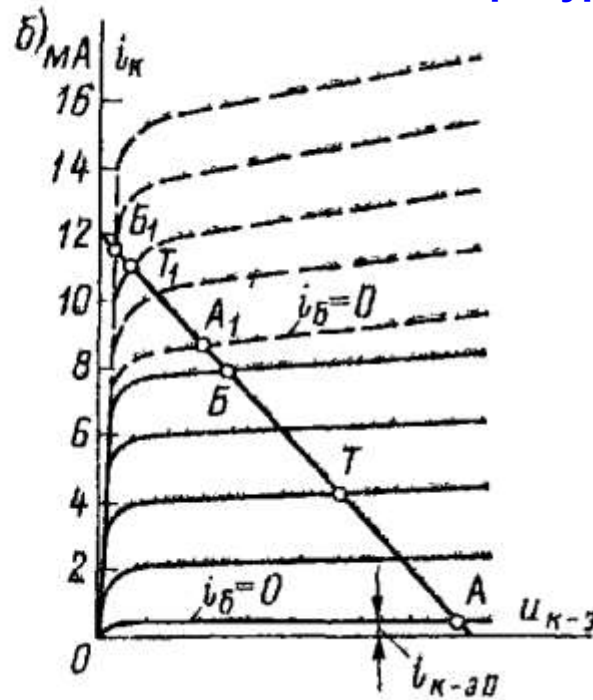
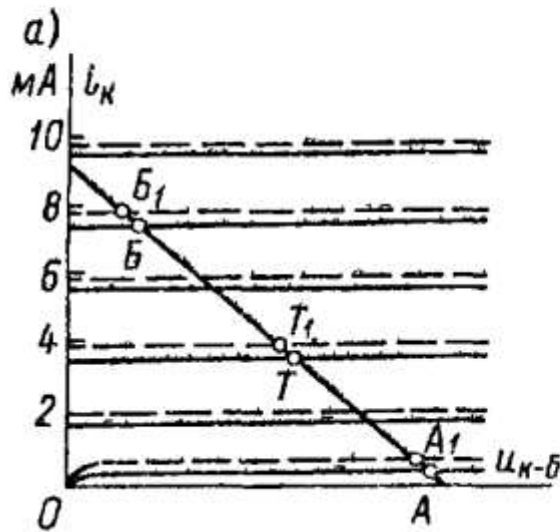


Рис. 4.13. Влияние температуры на выходные характеристики транзистора при его включении по схеме ОБ (а) и ОЭ (б).

Схема ОБ $\beta = 100$, $I_{K0} = 2 \text{ мкА}$, 20°C , $20^\circ\text{C} \rightarrow 70^\circ\text{C}$ ($\Delta T = 50^\circ\text{C}$)

$I_{K0} \uparrow 2 \text{ раза при } \Delta T = 10^\circ\text{C} \Rightarrow I_{K0} \uparrow 2^5 = 32 \text{ при } \Delta T = 50^\circ\text{C} \Rightarrow I_{K0} = 64 \text{ мкА}$ ($\Delta I_{K0} = 62 \text{ мкА}$)

При $I_Э = \text{const}$, $I_K = \alpha \cdot I_Э + I_{K0} \Rightarrow \Delta I_K = 62 \text{ мкА}$

Схема ОЭ

$\beta = 100$, $I_{K0} = 2 \text{ мкА}$, 20°C , $I_{KЭ0} \approx \beta \cdot I_{K0} = 100 \cdot 2 = 200 \text{ мкА}$,

$I_{KЭ0} \uparrow 2^5 = 32 \text{ при } \Delta T = 50^\circ\text{C} \Rightarrow I_{KЭ0} = 6400 \text{ мкА}$ ($\Delta I_K = 6200 \text{ мкА} = 6,2 \text{ мА}$)

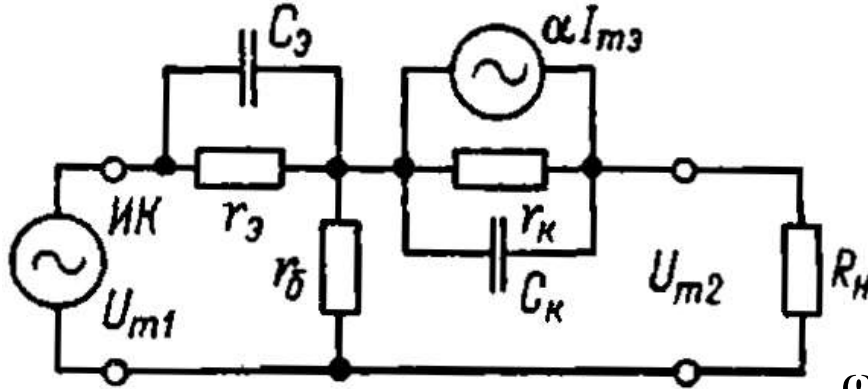


Рис. 4.14. Эквивалентная схема транзистора с учетом емкостей переходов.

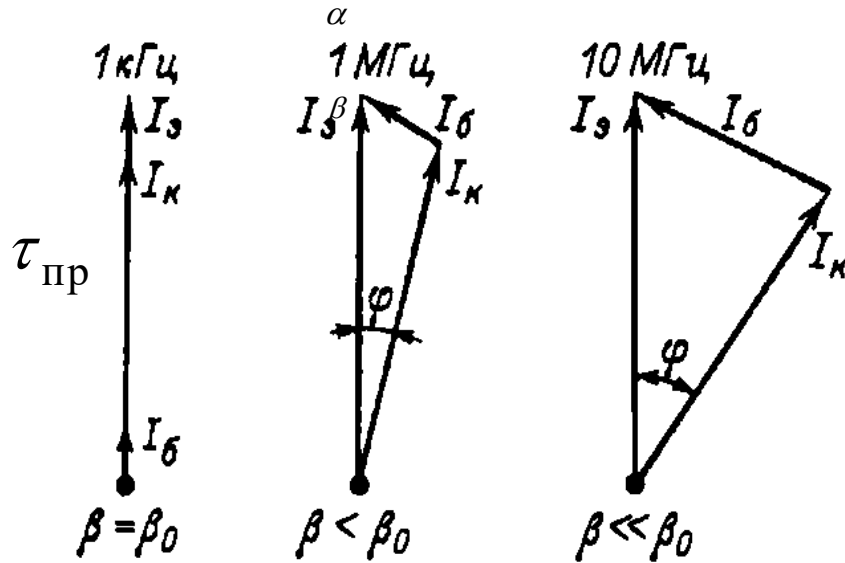


Рис. 4.15. Векторная диаграмма токов транзистора на различных частотах.

Низкие частоты

$$r_K \gg R_H, \frac{1}{\omega C_K} \gg R_H \Rightarrow I_H \approx \alpha \cdot I_{m3} \Rightarrow k_i \approx \alpha$$

Высокие частоты

$$\omega \rightarrow \infty, \frac{1}{\omega C_K} \rightarrow 0, I_{C_K} \approx \alpha \cdot I_{m3} \Rightarrow k_i \approx \alpha \rightarrow 0 \Rightarrow k_p \rightarrow 0$$

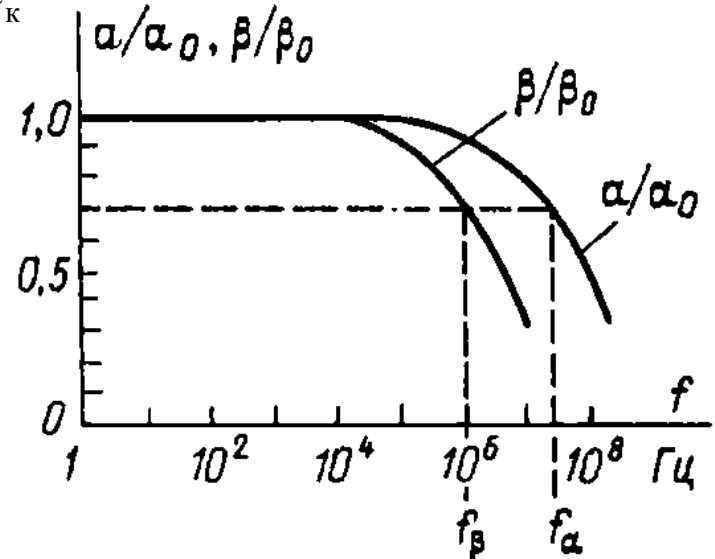


Рис. 4.16. Уменьшение коэффициентов α и β с повышением частоты.

$$\begin{aligned} \alpha &= 0,7 \cdot \alpha_0 & f_\alpha \\ \beta &= 0,7 \cdot \beta_0 & f_\beta \end{aligned} \quad f_\beta \approx \frac{f_\alpha}{\beta} \quad (4.22)$$

4.6. Ключевой режим работы транзистора

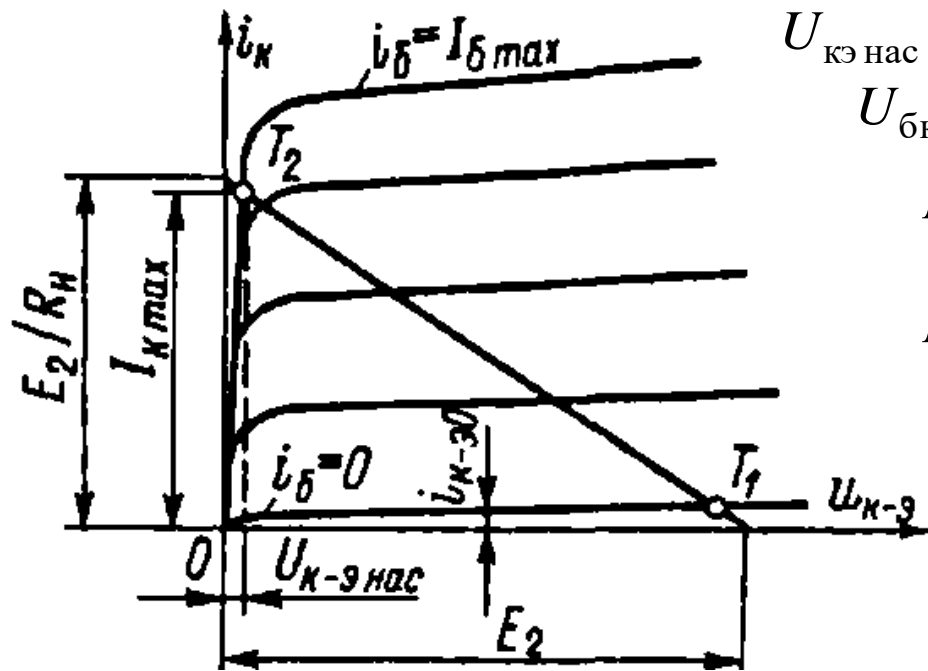


Рис. 4.17. Определение параметров ключевого режима с помощью выходных характеристик.

$$U_{\text{кэ нас}} = 0,2 \text{ В} \quad U_{\text{бэ}} = 0,6 \text{ В}$$

$$U_{\text{бк}} = 0,6 - 0,2 = 0,4 \text{ В}$$

$$I_{\text{б max}}, I_{\text{к max}}, U_{\text{кэ нас}}$$

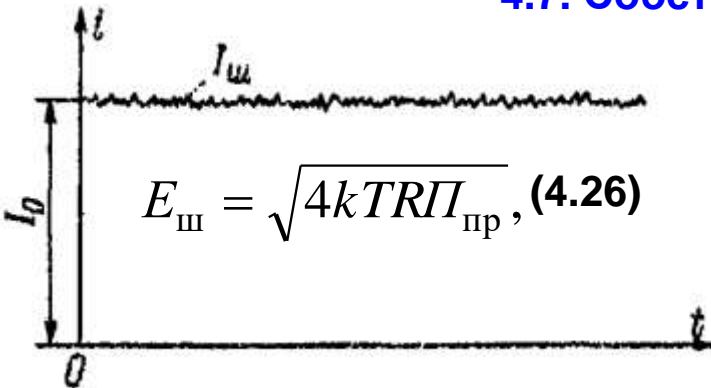
$$I_{\text{к max}} \approx \frac{E_2}{R_H} \quad (4.23)$$

$$B \approx \frac{I_{\text{к max}}}{I_{\text{б max}}} \quad (4.24)$$

$$R_{\text{нас}} \approx \frac{U_{\text{кэ нас}}}{I_{\text{к max}}} \quad (4.25)$$

$$t_{\text{выкл}} = \tau_p + \tau_c \quad t_{\text{вкл}} = \tau_3 + \tau_\phi$$

4.7. Собственные шумы транзисторов и диодов



$$E_{\text{ш}} = \sqrt{4kTR\Pi_{\text{пр}}}, \quad (4.26)$$

$$E_{\text{ш}} \approx \frac{1}{8} R \Pi_{\text{пр}}, \quad (4.27) \quad R = 40 \text{ кОм} \quad \Pi_{\text{пр}} = 10 \text{ кГц} \quad E_{\text{ш}} = 2,5 \text{ мкВ.}$$

$$F_{\text{ш}} = \frac{P_{\text{с вх}} / P_{\text{ш вх}}}{P_{\text{с вых}} / P_{\text{ш вых}}} \quad (4.28)$$

$$F = 10 \lg F_{\text{ш}} \quad (4.29)$$

$$F \approx 3 \div 30 \text{ дБ}$$

Рис. 4.19. Флюктуации тока.

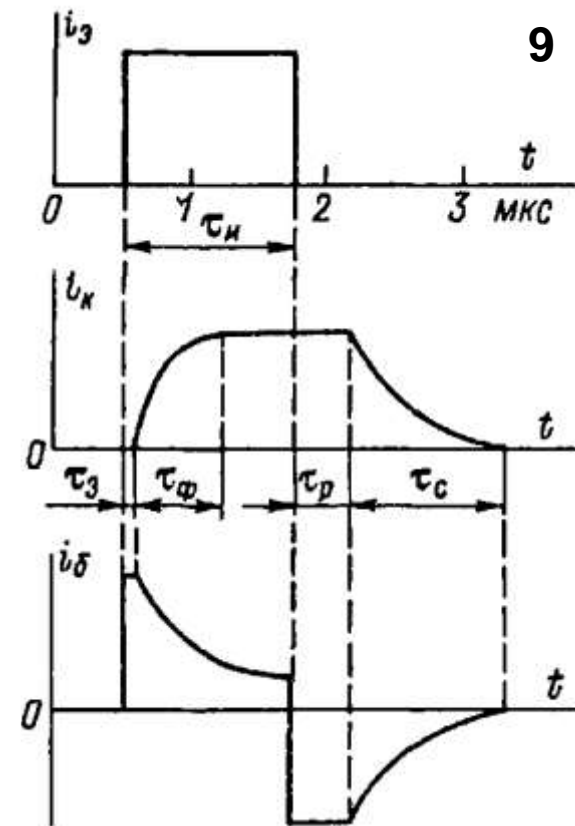


Рис. 4.18. Искажение формы импульса тока транзистором.

4.8. Основные типы биполярных транзисторов

$$P_{\text{к max}} \leq 0,3 \text{ Вт}; \quad 0,3 \text{ Вт} < P_{\text{к max}} < 1,5 \text{ Вт}; \quad P_{\text{к max}} > 1,5 \text{ Вт}$$

$$f_{\text{пр}} \leq 3 \text{ МГц}; \quad 3 \text{ МГц} < f_{\text{пр}} < 30 \text{ МГц}; \quad f_{\text{пр}} > 30 \text{ МГц}$$

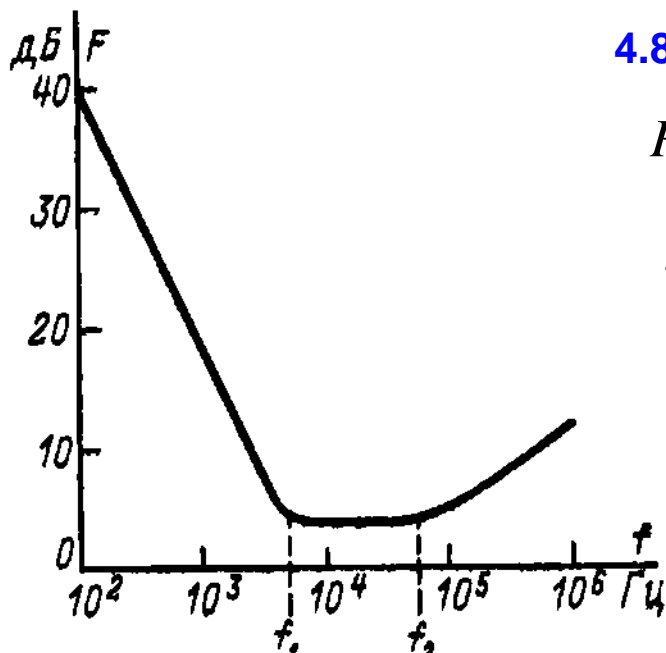


Рис. 4.20. Зависимость коэффициента шума транзистора от частоты.

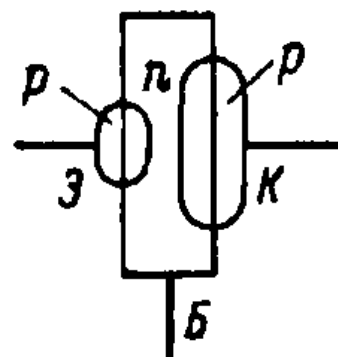


Рис. 4.21. Принцип устройства сплавного транзистора.

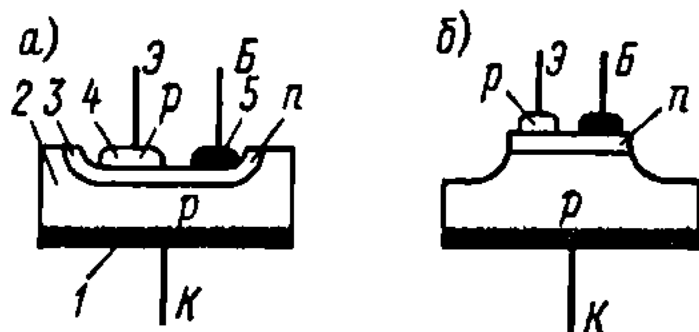


Рис. 4.22. Принцип устройства сповно-диффузионного транзистора (а) и метатранзистора (б). 1 – основание коллектора; 2 – коллектор (исходный материал); диффузионный слой базы; 4 – эмиттерный сплав; 5 – сплав для вывода базы.

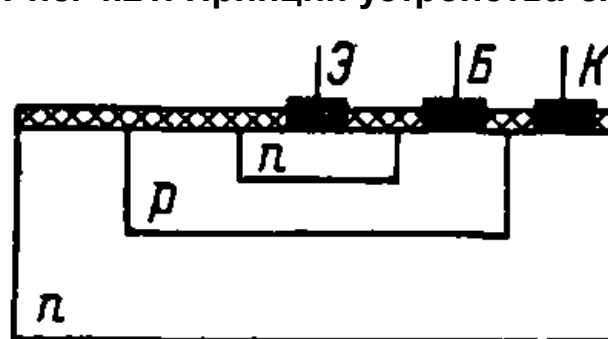


Рис. 4.23. Принцип устройства планарного транзистора.

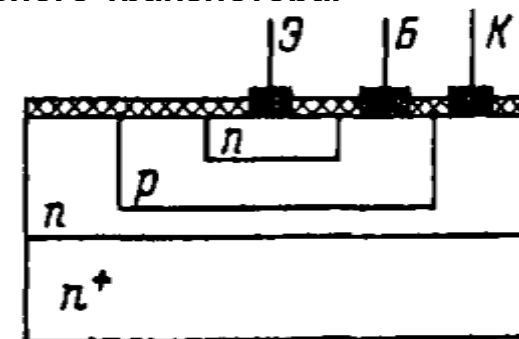


Рис. 4.24. Принцип устройства планарно-эпитаксиального транзистора.