

7.1. Дифференциальные усилительные каскады

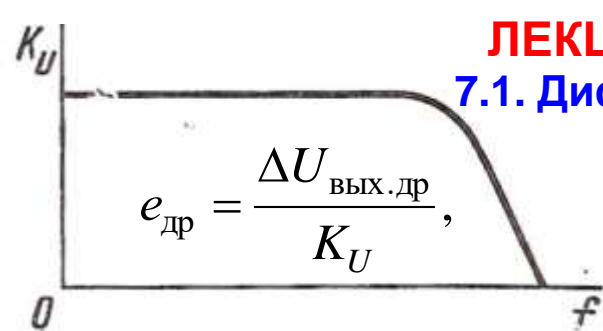


Рис. 7.1. Амплитудно-частотная характеристика усилителя постоянного тока.

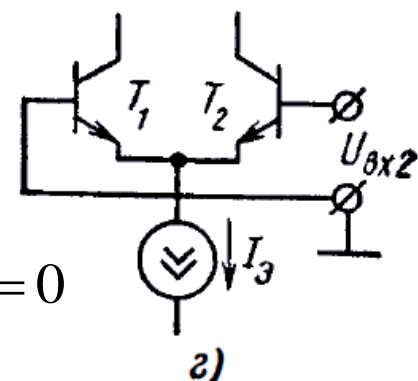
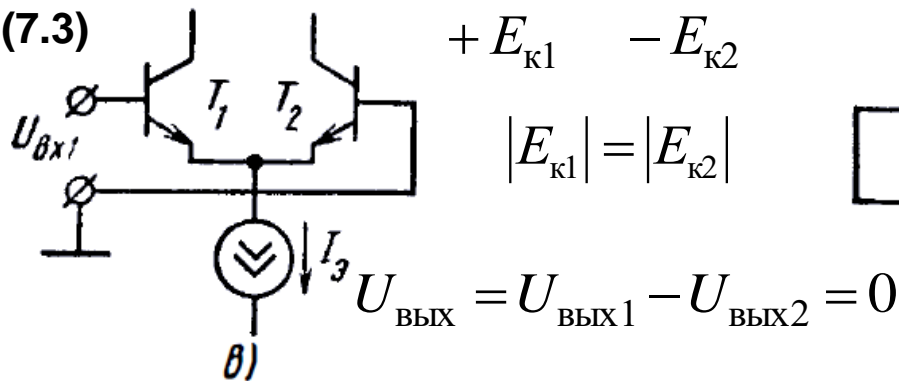
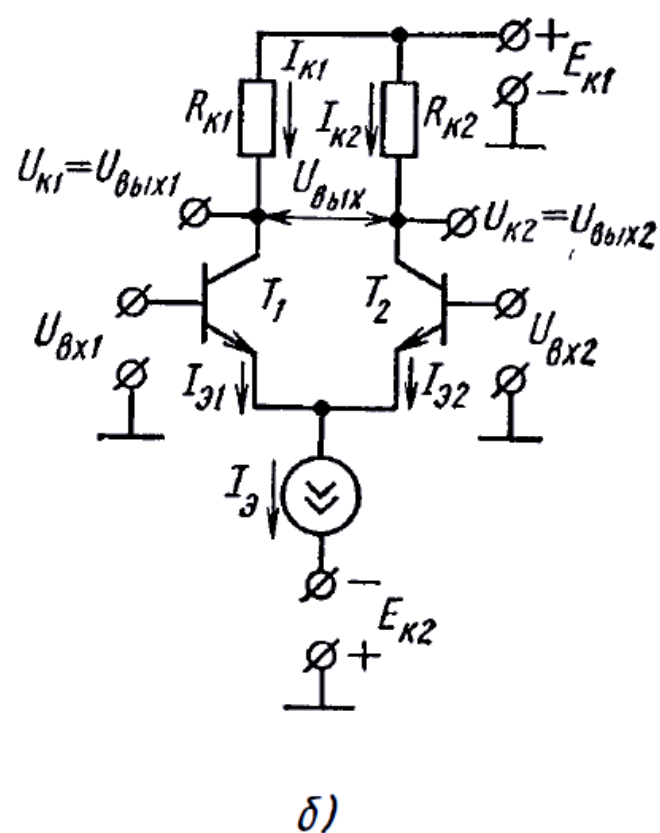
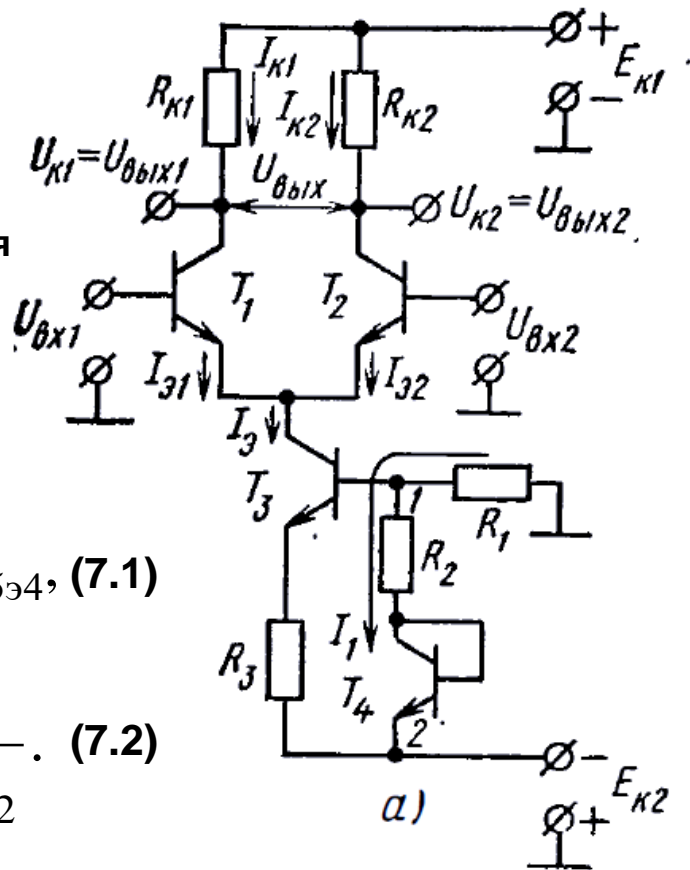
$$I_{\text{бз}} \ll I_{\text{э}} \Rightarrow I_{\text{эз}} \approx I_{\text{кз}} = I_{\text{э}}$$

$$U_{\text{бэз}} + I_{\text{э}} \cdot R_3 = I_1 \cdot R_2 + U_{\text{бэ4}}, \quad (7.1)$$

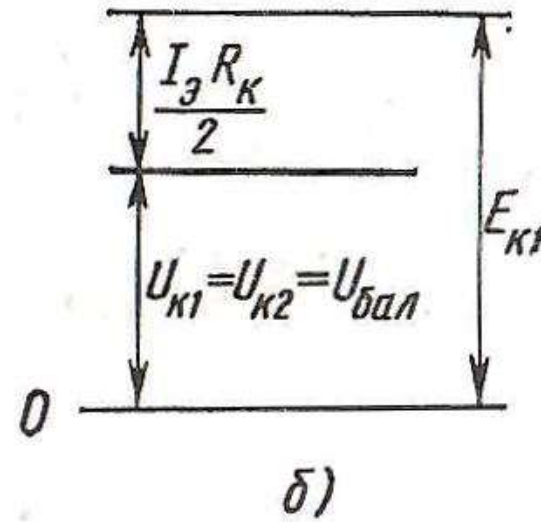
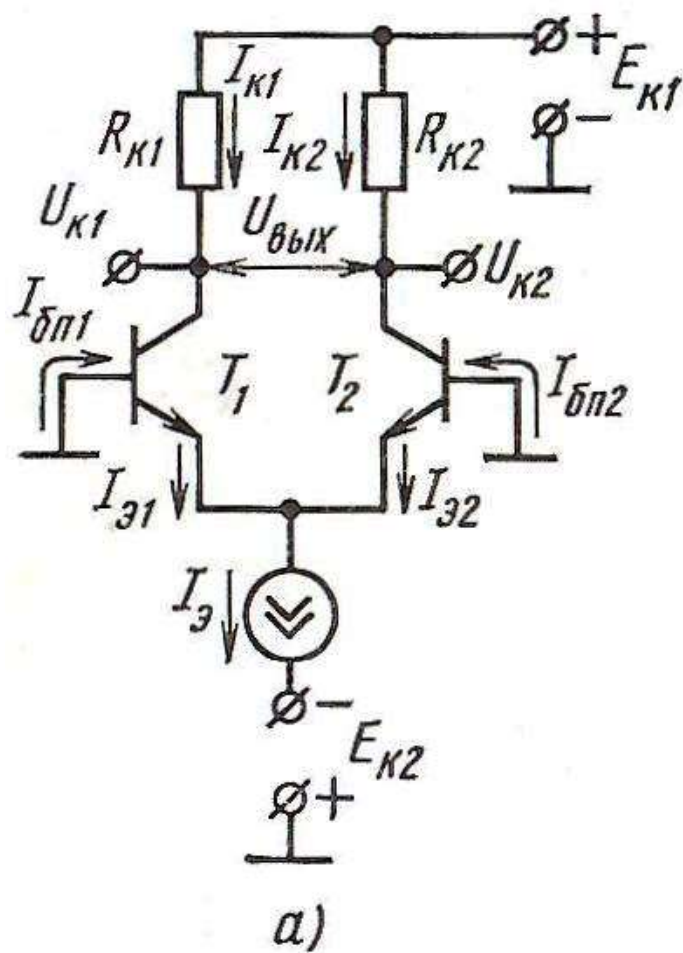
$$I_1 = \frac{E_{\text{к2}} - U_{\text{бэ4}}}{R_1 + R_2} \approx \frac{E_{\text{к2}}}{R_1 + R_2}. \quad (7.2)$$

$$I_{\text{э}} = \frac{I_1 \cdot R_2 + (U_{\text{бэ4}} - U_{\text{бэз}})}{R_3}. \quad (7.3)$$

Рис. 7.2. Схема (а) и упрощенная схема (б) параллельно-балансного (дифференциального) усилительного каскада; способы подачи дифференциального входного сигнала (в, г).



$$U_{\text{BX}} = 0$$



$$I_{\text{э}1} = I_{\text{э}2} = I_{\text{э}} / 2$$

$$I_{\text{бп}1} = I_{\text{бп}2} = \frac{I_{\text{э}}}{2(\beta + 1)} = I_{\text{BX.СМ}} \quad (7.4)$$

Рис. 7.3. Схема дифференциального каскада при входном сигнале, равном нулю (а); потенциальная диаграмма выходных цепей (б).

$$I_{\text{к}1} = I_{\text{к}2} = \alpha \frac{I_{\text{э}}}{2} \approx \frac{I_{\text{э}}}{2} \quad (7.5)$$

$$U_{\text{к}1} = U_{\text{к}2} = U_{\text{бал}} \approx E_{\text{к}1} - \frac{I_{\text{э}} \cdot R_{\text{к}}}{2}, \quad (7.6)$$

$$R_{\text{к}1} = R_{\text{к}2} = R_{\text{к}}$$

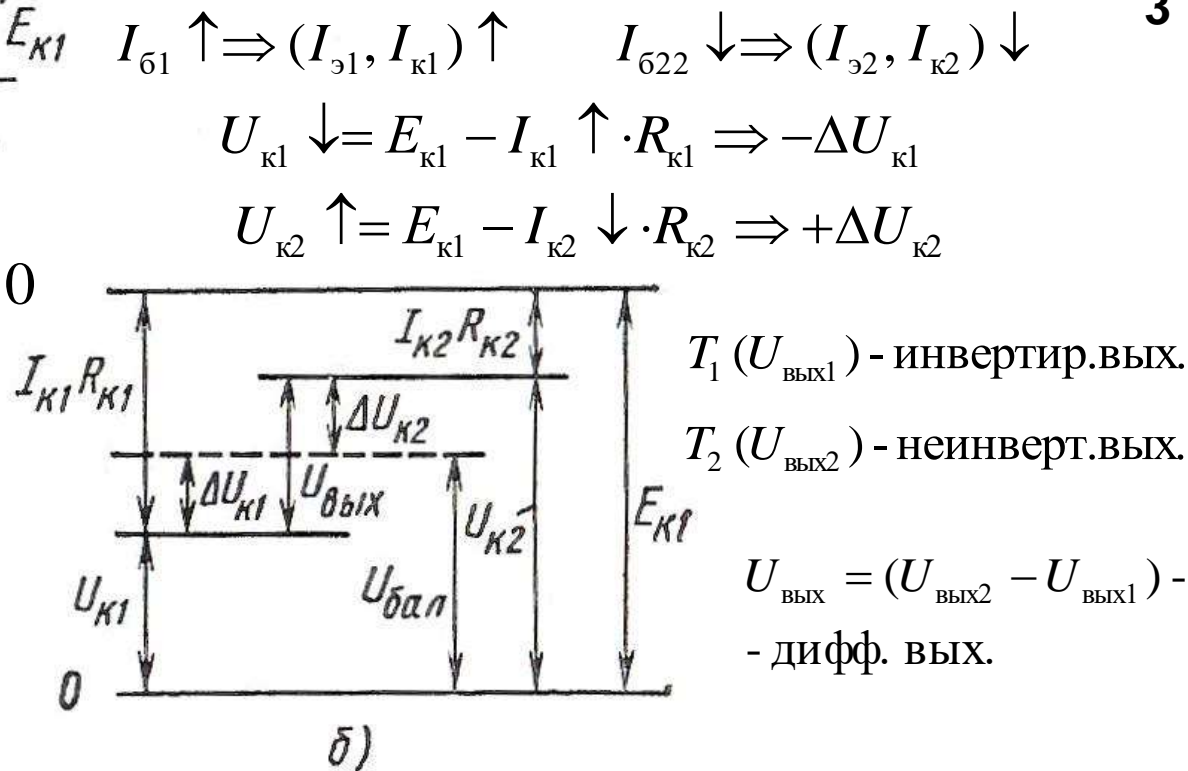
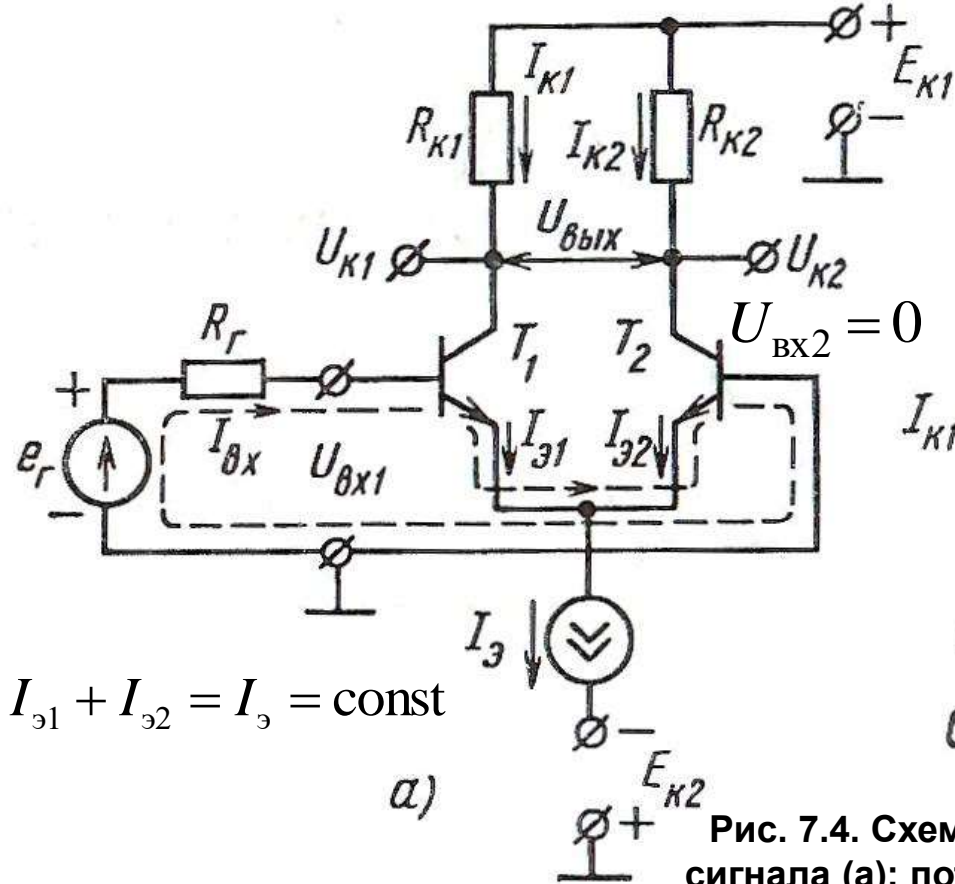


Рис. 7.4. Схема дифференциального входного сигнала (а); потенциальная диаграмма цепей (б).

$$U_{\text{ВЫХ}} = U_{\text{к}2} - U_{\text{к}1} = \Delta U_{\text{к}2} + \Delta U_{\text{к}1} = 2\Delta U_{\text{к}} \quad (7.7)$$

$$U_{\text{ВЫХ}1} = U_{\text{к}1} = E_{\text{к}1} - \alpha I_{\text{э}} R_{\text{к}} \approx E_{\text{к}1} - I_{\text{э}} R_{\text{к}}; \quad (7.8)$$

$$U_{\text{ВЫХ}2} = U_{\text{к}2} = E_{\text{к}1}; U_{\text{ВЫХ}1} = U_{\text{к}2} - U_{\text{к}1} \approx I_{\text{э}} R_{\text{к}}.$$

$$I_{\text{ВХ}} = \frac{e_r}{R_{\text{Г}} + r_{\text{ВХ}1} + r_{\text{ВХ}2}} = \frac{e_r}{R_{\text{Г}} + 2r_{\text{ВХ}}} = \frac{e_r}{R_{\text{Г}} + 2[r_{\text{б}} + (1 + \beta)r_{\text{э}}]}, \quad (7.9) \quad \pm \Delta I_{\text{к}} = \pm \beta \cdot I_{\text{ВХ}}$$

$$\pm \Delta U_{\text{ВЫХ}1,2} = \pm \Delta I_{\text{к}} \cdot R_{\text{к}} = \pm \beta I_{\text{ВХ}} \cdot R_{\text{к}} \quad (7.10) \quad K_{U1,2} = \frac{\Delta U_{\text{ВЫХ}1,2}}{e_r} = \frac{\beta \cdot R_{\text{к}}}{R_{\text{Г}} + 2r_{\text{ВХ}}} = \frac{\beta \cdot R_{\text{к}}}{R_{\text{Г}} + 2[r_{\text{б}} + (1 + \beta)r_{\text{э}}]} \quad (7.11)$$

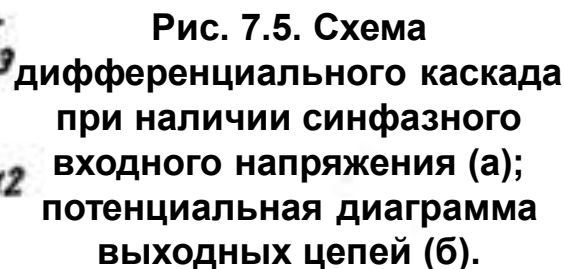
$$K_{U_{\text{Д}}} = \frac{\beta(2R_{\text{к}}\|R_{\text{H}})}{R_{\text{Г}} + 2r_{\text{БХ}}} = \frac{\beta(2R_{\text{к}}\|R_{\text{H}})}{R_{\text{Г}} + 2[r_6 + (1 + \beta)r_9]}. \quad (7.14)$$

$$U_{\text{ВЫХ}} = K_{U_{\text{Д}}} \cdot (U_{\text{ВХ1}} - U_{\text{ВХ2}}) \quad (7.16) \quad E_{\text{сиф}} = \min(U_{\text{ВХ1}} , U_{\text{ВХ2}}) \quad E_{\text{диф}} = e_{\Gamma} = U_{\text{ВХ1}} - U_{\text{ВХ2}}$$
$$U_{\text{бэл}} = U_{\text{к1}} = U_{\text{к2}} = \text{const}$$

В реальных ДУ при $E_{\text{сиф}} < 0 \Rightarrow I_{\text{э}} - \Delta I_{\text{э}} \Rightarrow$
 $\Rightarrow I_{\text{к1}} - \Delta I_{\text{к1}}, I_{\text{к2}} - \Delta I_{\text{к2}} \Rightarrow (U_{\text{к1}} = U_{\text{к2}} = U_{\text{бал}}) \uparrow$

$$U_{\text{бал}} \pm \Delta U_{\text{бал}} \quad K_{\text{сinf}} = \frac{\Delta U_{\text{бал}}}{E_{\text{сinf}}},$$

$$KOCC = 20 \lg \frac{K_{\text{сinf}}}{K_{U_{\text{д}}}}$$



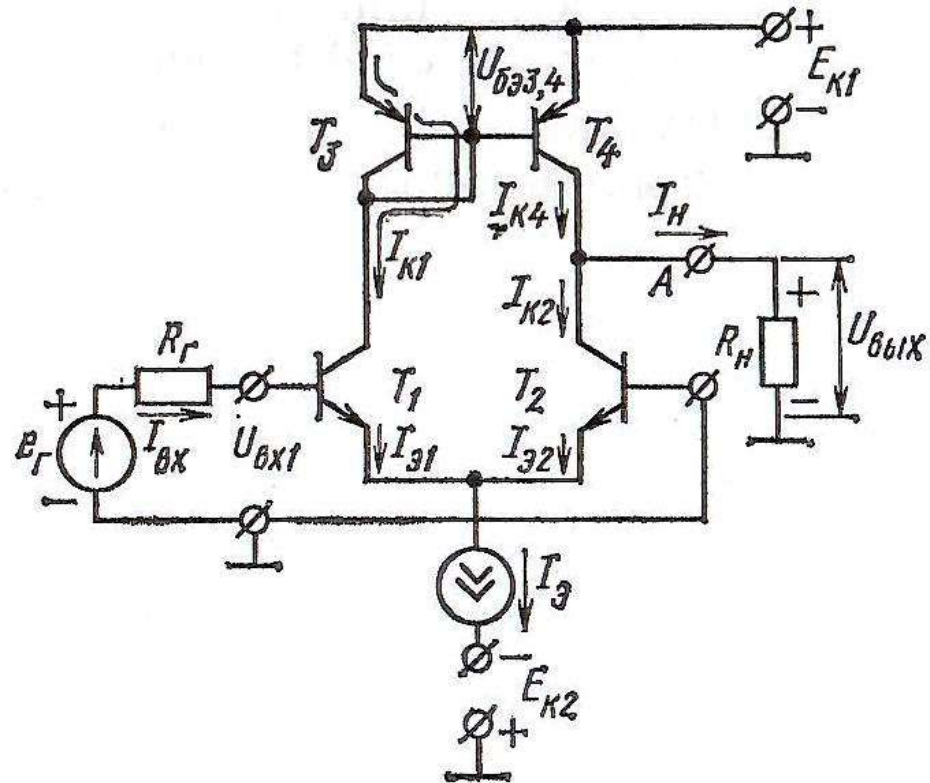


Рис. 7.6. Схема дифференциального каскада с динамическими нагрузками.

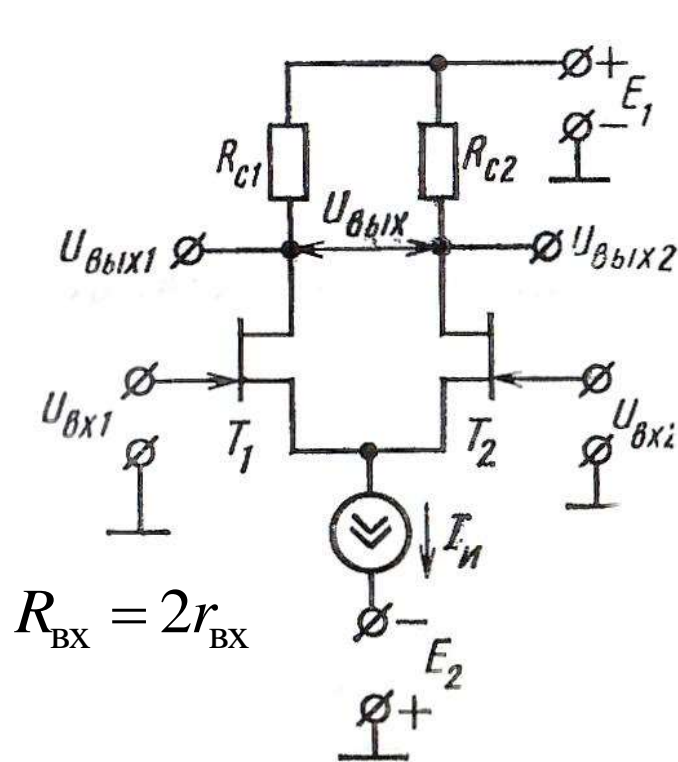


Рис. 7.7. Схема дифференциального каскада на полевых транзисторах.

$$e_r = 0 \Rightarrow I_{K1} = I_{K2} = I_{K4} \approx I_3 / 2 \Rightarrow I_H = 0, U_{\text{вых}} = 0 \quad e_r > 0 \Rightarrow (I_{61} \uparrow, I_{62} \downarrow) \Rightarrow (I_{K1} \uparrow, I_{K2} \downarrow)$$

$$I_{K1} = I_{K4} = I_3 / 2 + \beta \cdot I_{\text{BX}}, I_{K2} = I_3 / 2 - \beta \cdot I_{\text{BX}} \quad I_H = I_{K4} - I_{K2} = 2\beta \cdot I_{\text{BX}} \quad U_{\text{вых}} = 2\beta \cdot I_{\text{BX}} \cdot R_H$$

$$K_U = \frac{U_{\text{вых}}}{e_r} = \frac{2\beta \cdot I_{\text{BX}} \cdot R_H}{I_{\text{BX}} (R_T + 2r_{\text{BX}})} = \frac{2\beta \cdot R_H}{R_T + 2[r_6 + (1 + \beta)r_3]}. \quad (7.17)$$

$$K_U|_{R_T=0} = \frac{\beta \cdot R_H}{r_6 + (1 + \beta)r_3}. \quad (7.18)$$

7.2. Операционные усилители

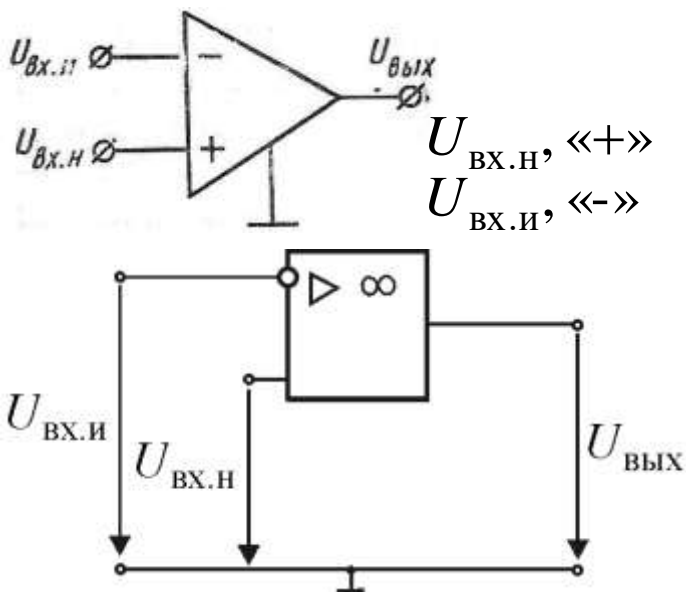


Рис. 7.8. Обозначение ОУ в электронных схемах

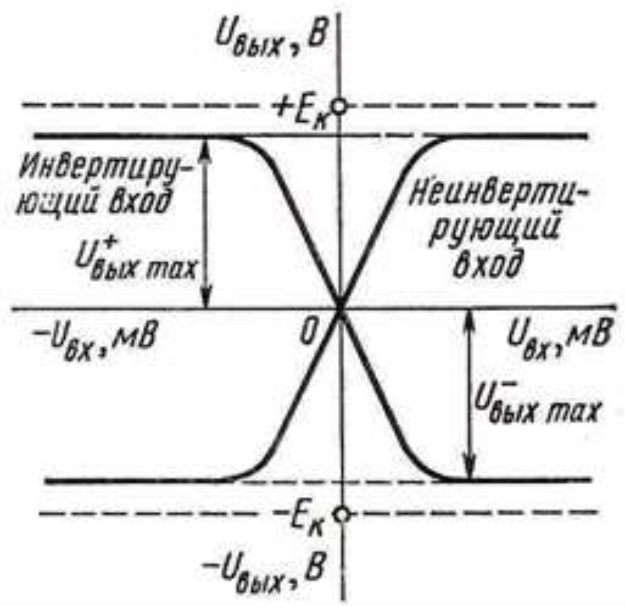


Рис. 7.10. Передаточные характеристики ОУ.

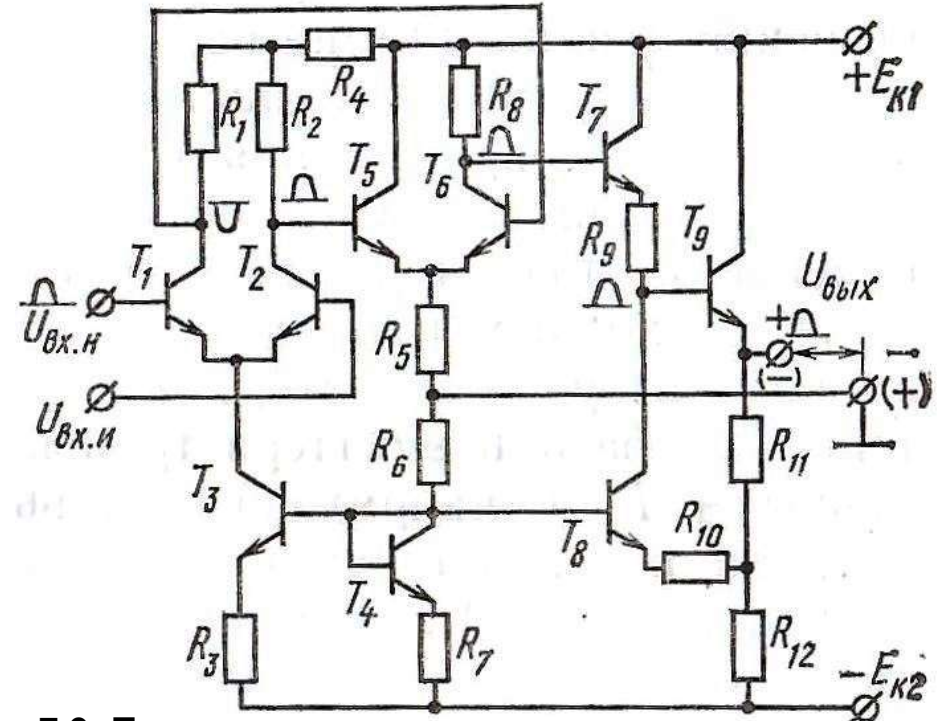
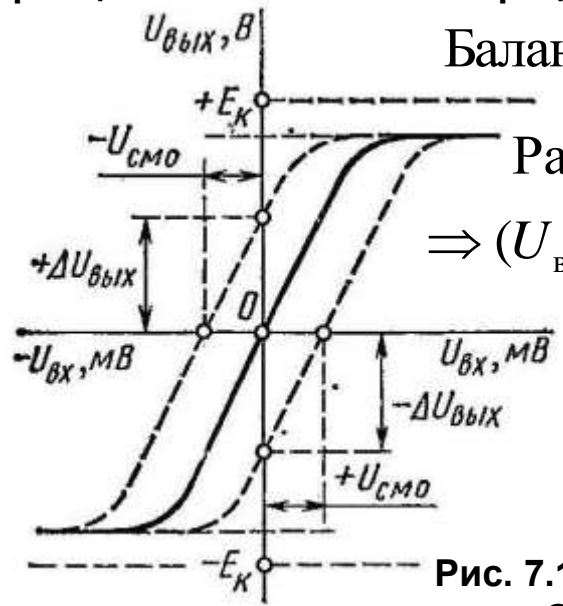


Рис. 7.9. Принципиальная схема операционного усилителя.

$$K_{UOY} = \frac{\Delta U_{BЫX}}{\Delta U_{BX}}$$



Баланс ОУ: $(U_{BX} = 0) \Rightarrow (U_{BЫX} = 0)$

Разбаланс ОУ: $(U_{BX} = 0) \Rightarrow (U_{BЫX} = +\Delta U_{BЫX}, U_{BЫX} = -\Delta U_{BЫX})$

$$U_{BX} = U_{CM0} \Rightarrow U_{BЫX} = 0$$

$$\Delta U_{BЫX} = K_{UOY} \cdot U_{CM0}$$

Рис. 7.11. Передаточные характеристики ОУ при наличии разбаланса.

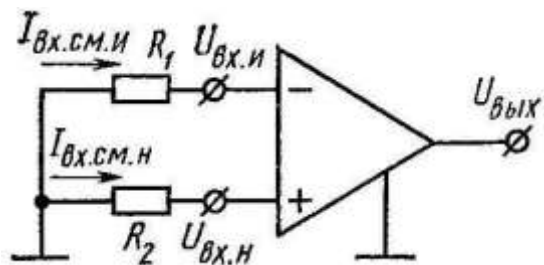
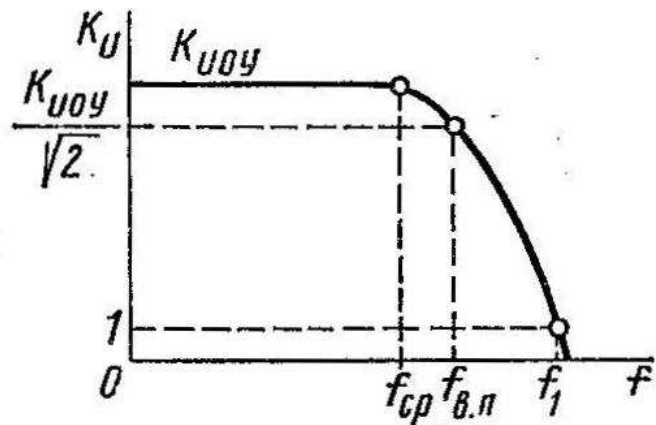
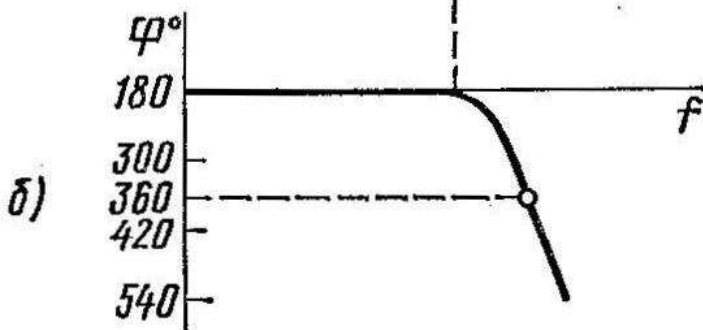


Рис. 7.12. Введение дополнительных резисторов во входные цепи ОУ для исключения разбаланса, создаваемого входными токами.

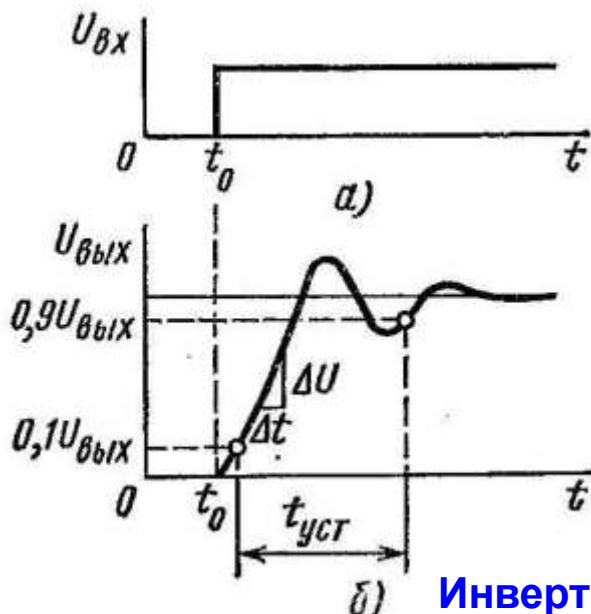


a)



б)

Рис. 7.13. Амплитудно-частотная (а) и фазо-частотная (б) характеристики ОУ.



Инвертирующий усилитель

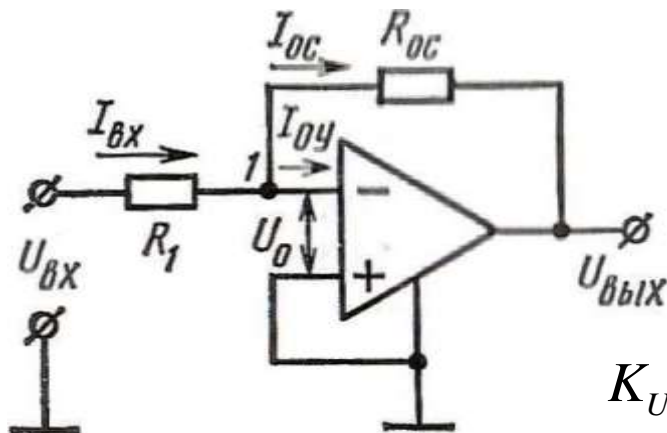


Рис. 7.15. Схема инвертирующего усилителя.

$$\frac{U_{\text{вх}}}{R_1} = -\frac{U_{\text{вых}}}{R_{\text{oc}}} \quad (7.20) \quad R_{\text{вх}} = R_1$$

$$K_{\text{Уи}} = \frac{U_{\text{вых}}}{U_{\text{вх}}} = -\frac{R_{\text{oc}}}{R_1} \quad (7.21)$$

$$v_{U_{\text{вых}}} = 0,1 \div 100 \text{ В/мкс}^7$$

$$t_{\text{уст}} = 0,05 \div 2 \text{ мкс}$$

Идеализированный ОУ

$$R_{\text{вхОУ}} \rightarrow \infty.$$

$$K_{\text{УОУ}} \rightarrow \infty, K_{\text{ИОУ}} \rightarrow \infty$$

Рис. 7.14. Реакция ОУ на воздействие скачка напряжения на входе.

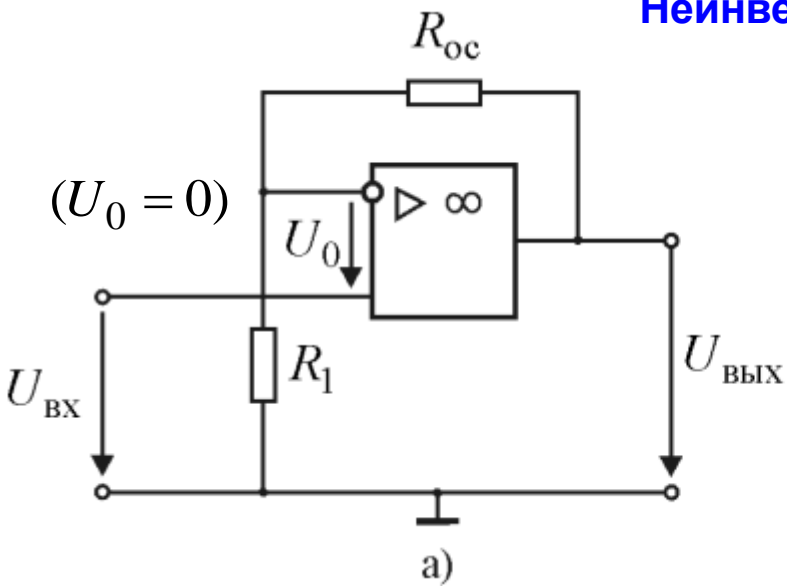
$$R_{\text{вхОУ}} = \infty \Rightarrow I_{\text{ОУ}} = 0 \Rightarrow \Rightarrow I_{\text{вх}} = I_{\text{oc}}$$

$$\frac{U_{\text{вх}} - U_0}{R_1} = -\frac{U_{\text{вых}} - U_0}{R_{\text{oc}}} \quad (7.19)$$

$$K_{\text{УОУ}} \rightarrow \infty \Rightarrow U_0 = \frac{U_{\text{вых}}}{K_{\text{УОУ}}} \rightarrow 0$$

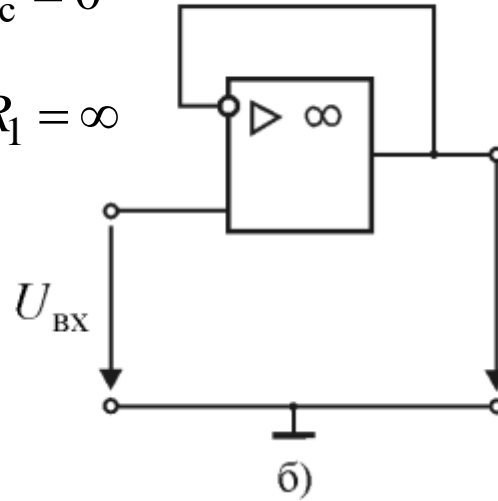
$$R_{\text{вых}} = \frac{R_{\text{выхОУ}} \left(1 + \frac{R_{\text{oc}}}{R_1} \right)}{K_{\text{УОУ}}} \quad (7.22)$$

Неинвертирующий усилитель



$$R_{oc} = 0$$

$$R_1 = \infty$$



$$U_{BX} = U_{ВЫХ} \frac{R_1}{R_1 + R_{oc}}, \quad (7.23)$$

$$K_{UH} = 1 + \frac{R_{oc}}{R_1}. \quad (7.24)$$

$$R_{BX} = R_{BX. \text{ неинв}} \rightarrow \infty$$

$$R_{ВЫХ} = \frac{R_{ВЫХОУ} \left(1 + \frac{R_{oc}}{R_1} \right)}{K_{UOU}} \rightarrow 0$$

Рис. 7.16. Неинвертирующий усилитель (а), повторитель напряжения (б).

Преобразователь тока в напряжение

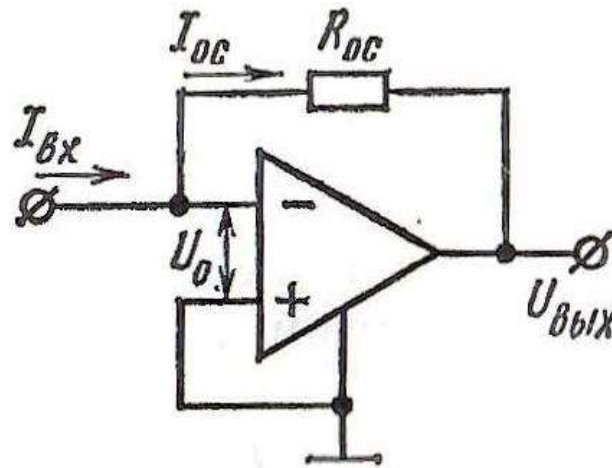


Рис. 7.17. Схема преобразователя тока в напряжение.

$$I_{BX} = I_{oc} = -\frac{U_{ВЫХ}}{R_{oc}} \Rightarrow U_{ВЫХ} = -I_{BX} \cdot R_{oc} \quad (7.25)$$

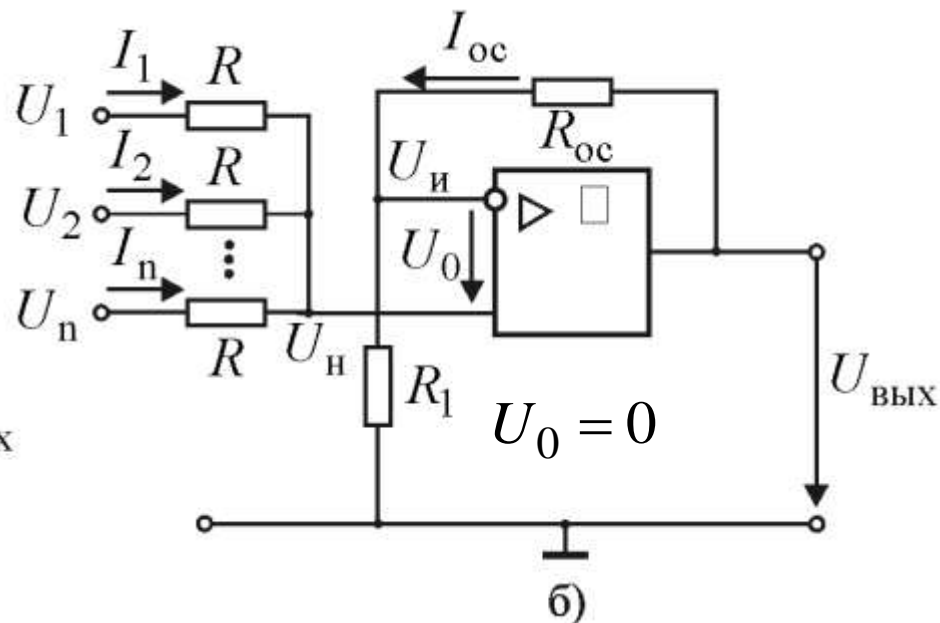
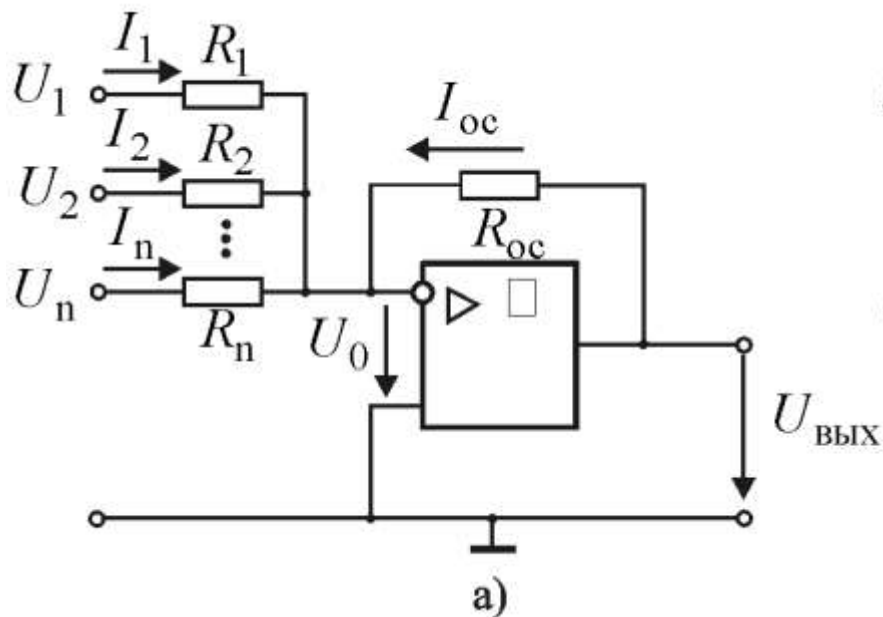


Рис. 7.18. Схема инвертирующего (а) и неинвертирующего (б) сумматора.

Инвертирующий сумматор

$$I_{\text{оу вх}} = 0 \Rightarrow I_{\text{oc}} = -(I_1 + I_2 + \dots + I_n)$$

$$\frac{U_{\text{вых}}}{R_{\text{oc}}} = -\left(\frac{U_1}{R_1} + \frac{U_2}{R_2} + \dots + \frac{U_n}{R_n}\right)$$

$$R_{\text{oc}} = R_1 = R_2 = \dots = R_n \ll R_{\text{вх}}.$$

$$U_{\text{вых}} = -(U_1 + U_2 + \dots + U_n) \quad (7.26)$$

$$U_{\text{вых}} = -\left(\frac{R_{\text{oc}}}{R_1} U_1 + \frac{R_{\text{oc}}}{R_2} U_2 + \dots + \frac{R_{\text{oc}}}{R_n} U_n\right). \quad (7.27)$$

Неинвертирующий сумматор

$$U_{\text{н}} = U_{\text{и}} = \frac{R_1}{R_1 + R_{\text{oc}}} U_{\text{вых}}.$$

$$\frac{U_1 - U_{\text{н}}}{R} + \frac{U_2 - U_{\text{н}}}{R} + \dots + \frac{U_n - U_{\text{н}}}{R} = 0 \Rightarrow \quad (7.28)$$

$$\Rightarrow U_1 + U_2 + \dots + U_n = n \frac{R_1}{R_1 + R_{\text{oc}}} U_{\text{вых}},$$

$$U_{\text{вых}} = \frac{R_1 + R_{\text{oc}}}{nR_1} (U_1 + U_2 + \dots + U_n). \quad (7.29)$$

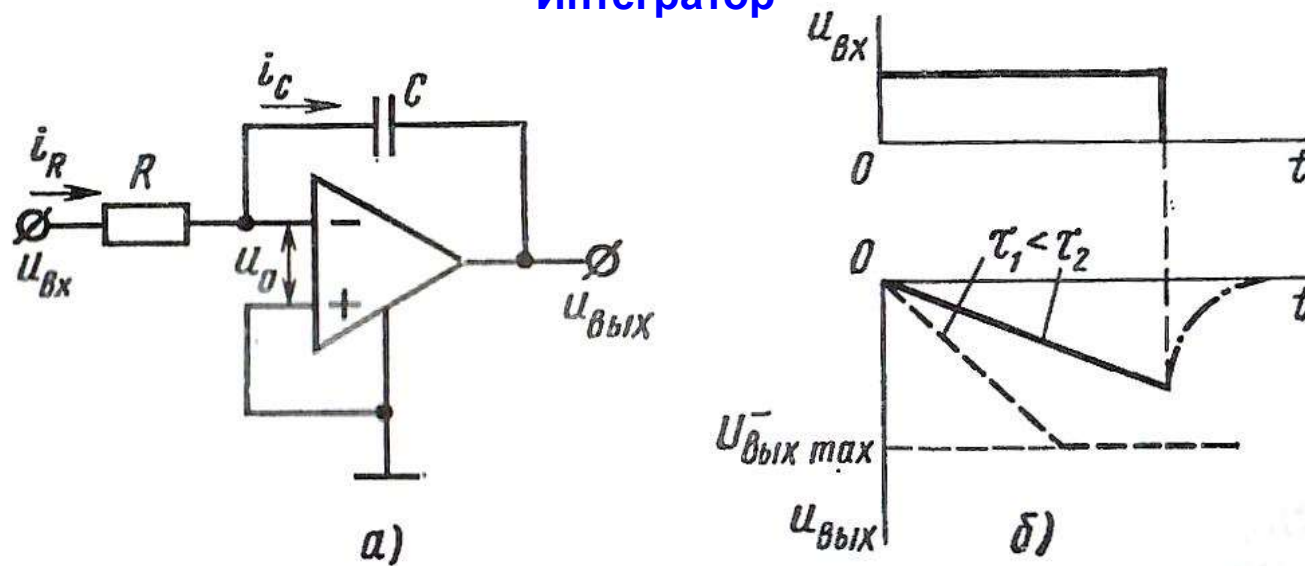


Рис. 7.19. Схема интегратора (а); временные диаграммы (б), иллюстрирующие характер изменения выходного напряжения при наличии единичного скачка напряжения на входе.

$$i_C = i_R \Rightarrow -C \frac{du_{BYX}}{dt} = \frac{u_{BX}}{R} \Rightarrow u_{BYX} = -\frac{1}{RC} \int_0^t u_{BX} dt + U_{BYX\ 0}, \quad (7.30)$$

$$t = 0, u_{BX} = 0 \text{ и } u_{BYX} = 0 \Rightarrow u_{BYX} = -\frac{1}{\tau} \int_0^t u_{BX} dt, \tau = RC \quad (7.31)$$

$$\tau_{\text{разр}} = C(R + R_{\text{выхОУ}})$$