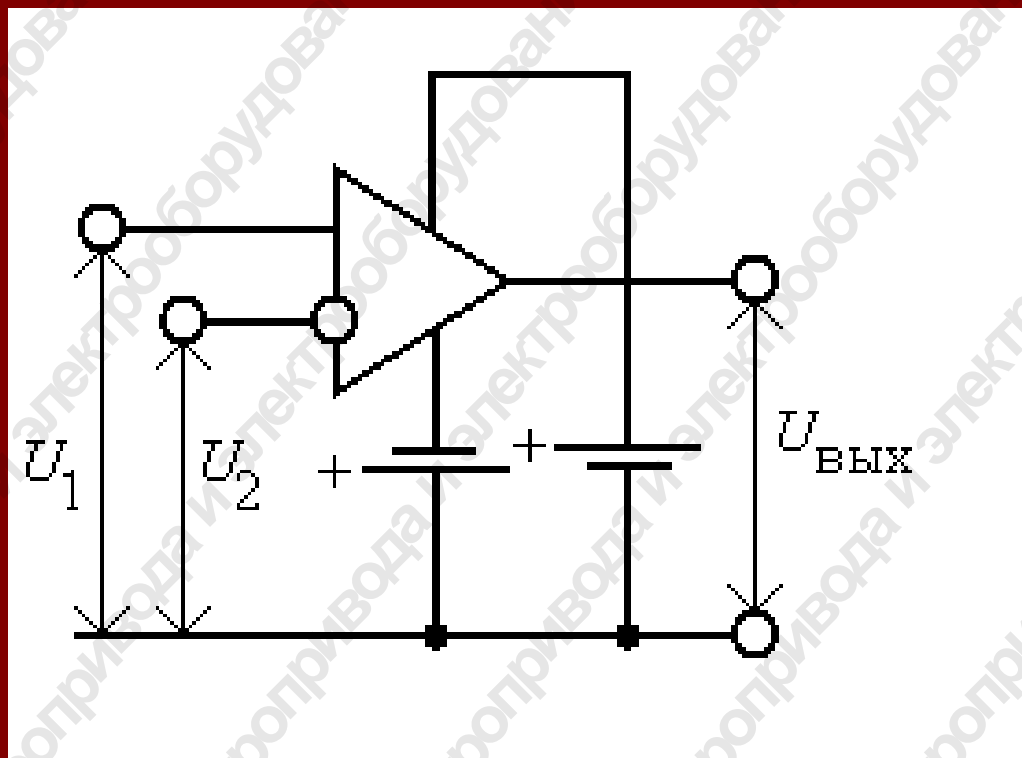


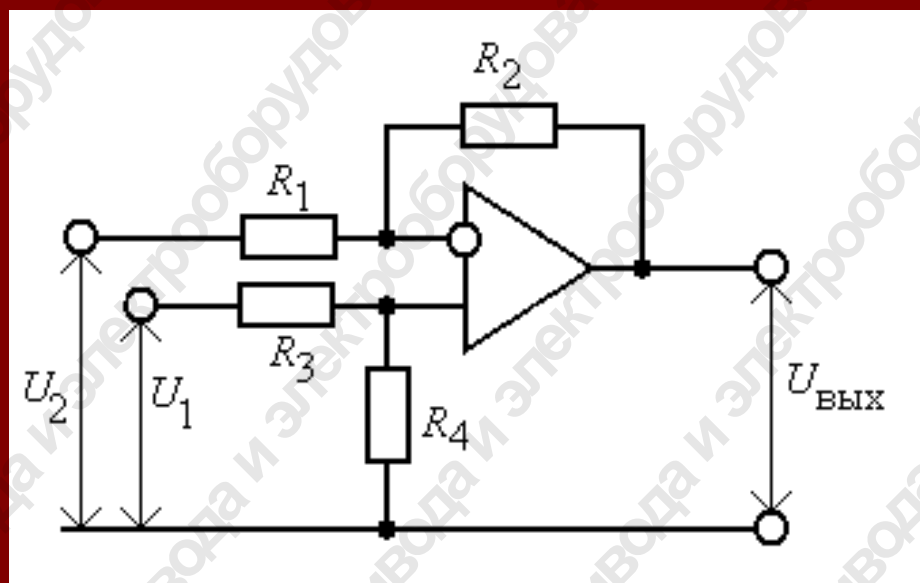
Операционный усилитель



Идеальный операционный усилитель

- Бесконечно большой дифференциальный коэффициент усиления по напряжению;
- Нулевое напряжение смещение нуля;
- Нулевые входные токи;
- Нулевое выходное напряжение;
- Коэффициент усиления синфазного сигнала равен нулю;
- Мгновенный отклик на изменение входного сигнала.

Дифференциальное включение



$$U_p = U_1 R_4 / (R_3 + R_4)$$

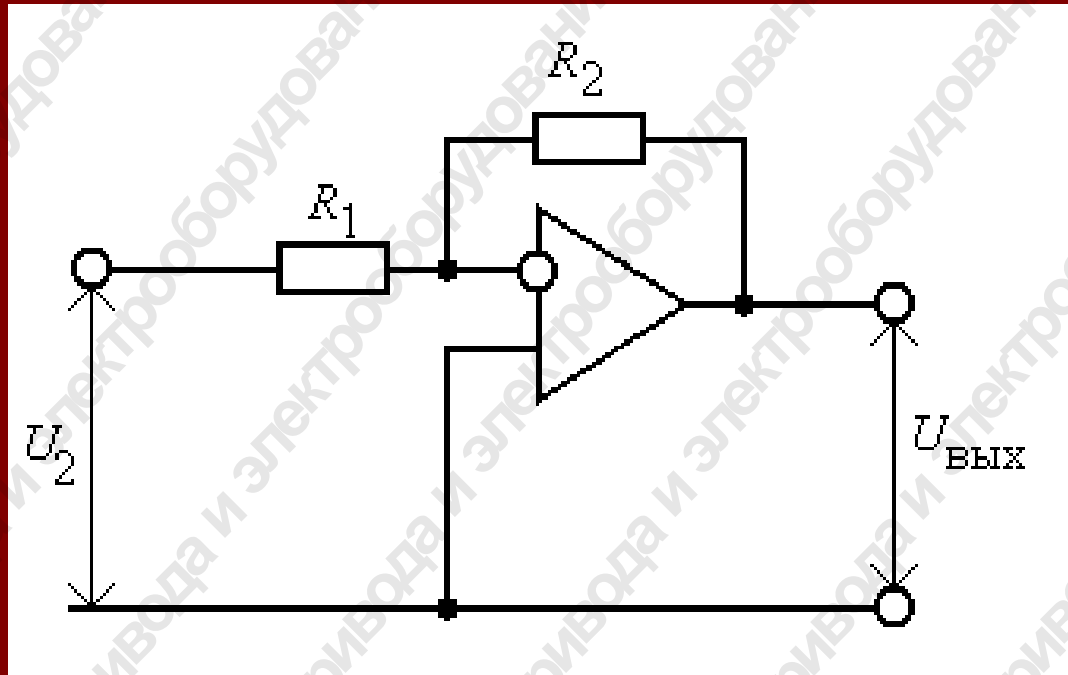
$$I_1 = (U_2 - U_p) / R_1$$

$$U_{\text{вых}} = U_p - I_1 R_2$$

$$U_{\text{вых}} = \frac{(R_1 + R_2) R_4}{R_1 (R_3 + R_4)} U_1 - \frac{R_2}{R_1} U_2$$

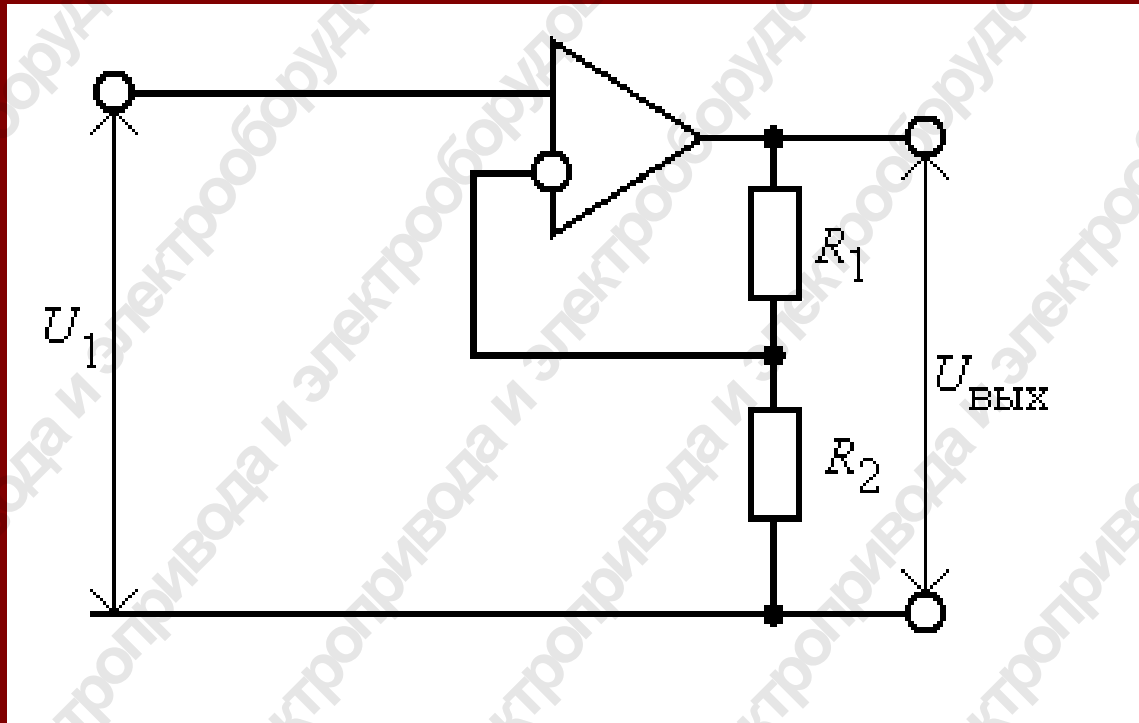
$$U_{\text{вых}} = (U_1 - U_2) R_2 / R_1$$

Инвертирующее включение



$$K = \frac{U_{\text{ВЫХ}}}{U_2} = -\frac{R_2}{R_1}$$

Неинвертирующее включение

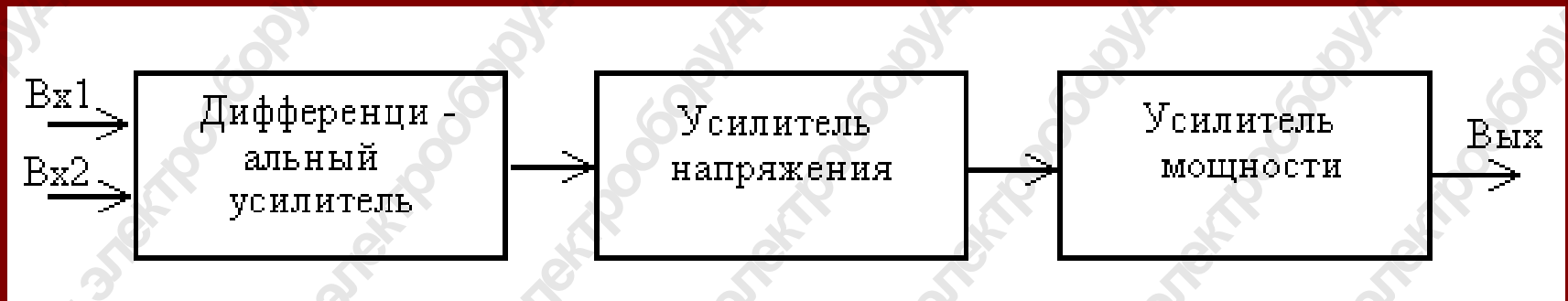


$$K = \frac{U_{\text{ВЫХ}}}{U_1} = 1 + \frac{R_1}{R_2}$$

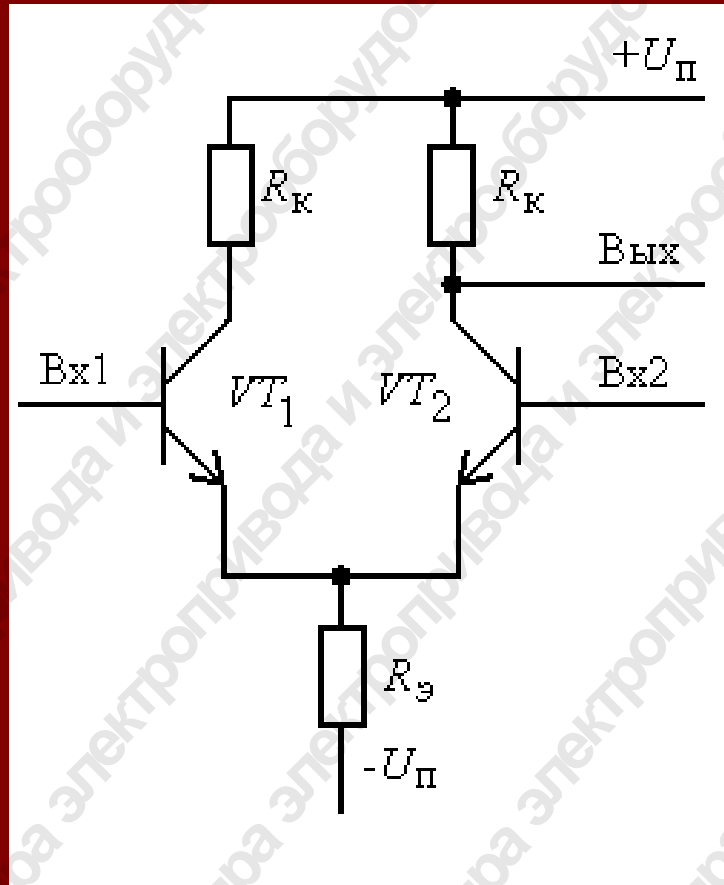
Внутренняя структура операционного усилителя

- Высокий коэффициент усиления по напряжению, в том числе и по постоянному току
- Малое напряжение смещения нуля
- Малые входные токи
- Высокое входное и низкое выходное сопротивление
- Высокий коэффициент ослабления синфазной составляющей (КОСС)
- Амплитудно частотная характеристика должна иметь в области высоких частот наклон – 20дБ/дек

Внутренняя структура операционного усилителя



Внутренняя структура операционного усилителя

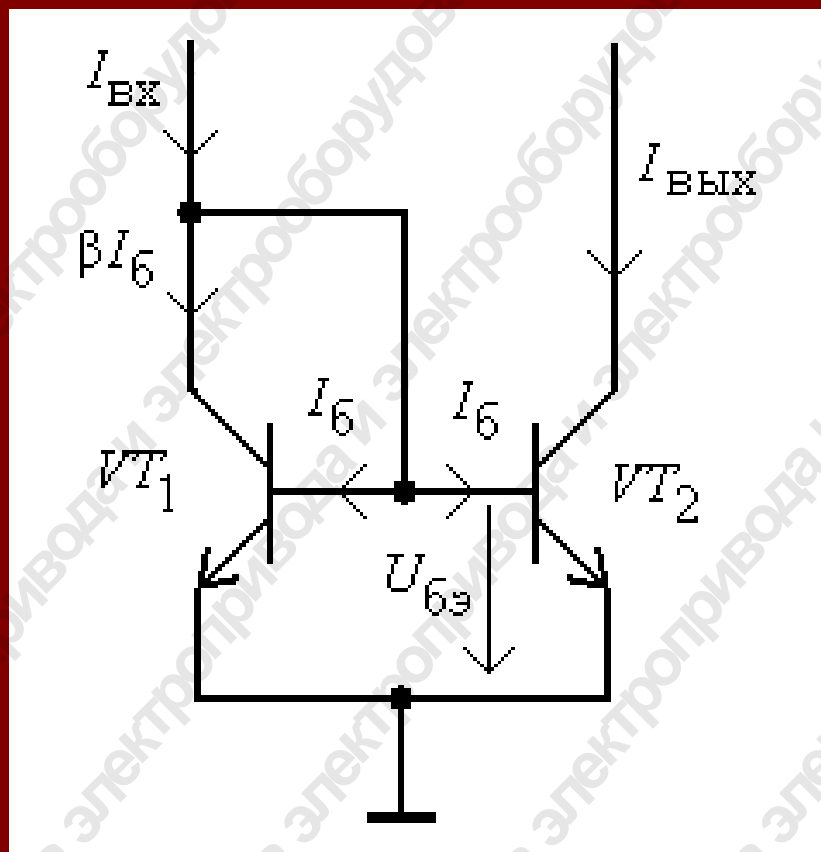


$$K_{\text{диф}} = \frac{R_{\text{К}}}{2r_{\text{Э}}}$$

$$K_{\text{синф}} = -\frac{R_{\text{К}}}{2R_{\text{Э}} + r_{\text{Э}}}$$

$$\text{КОСС} = \frac{K_{\text{диф}}}{K_{\text{синф}}} \approx \frac{R_{\text{Э}}}{r_{\text{Э}}}$$

Схема токового зеркала



$$I_{\text{ВЫХ}} = \beta I_{\text{ВХ}} / (\beta + 2) \approx I_{\text{ВХ}}$$

Стандартная схема операционного усилителя

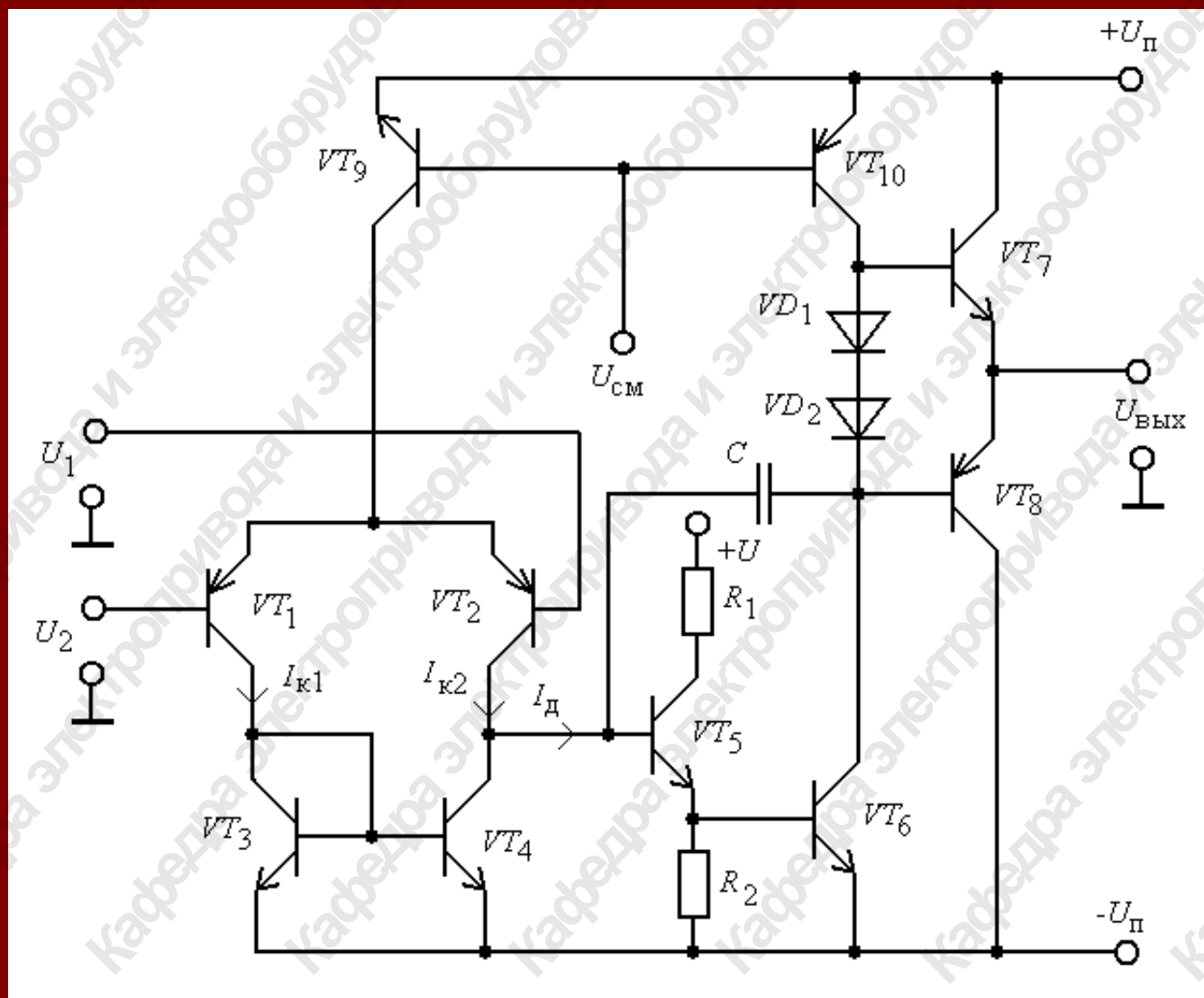
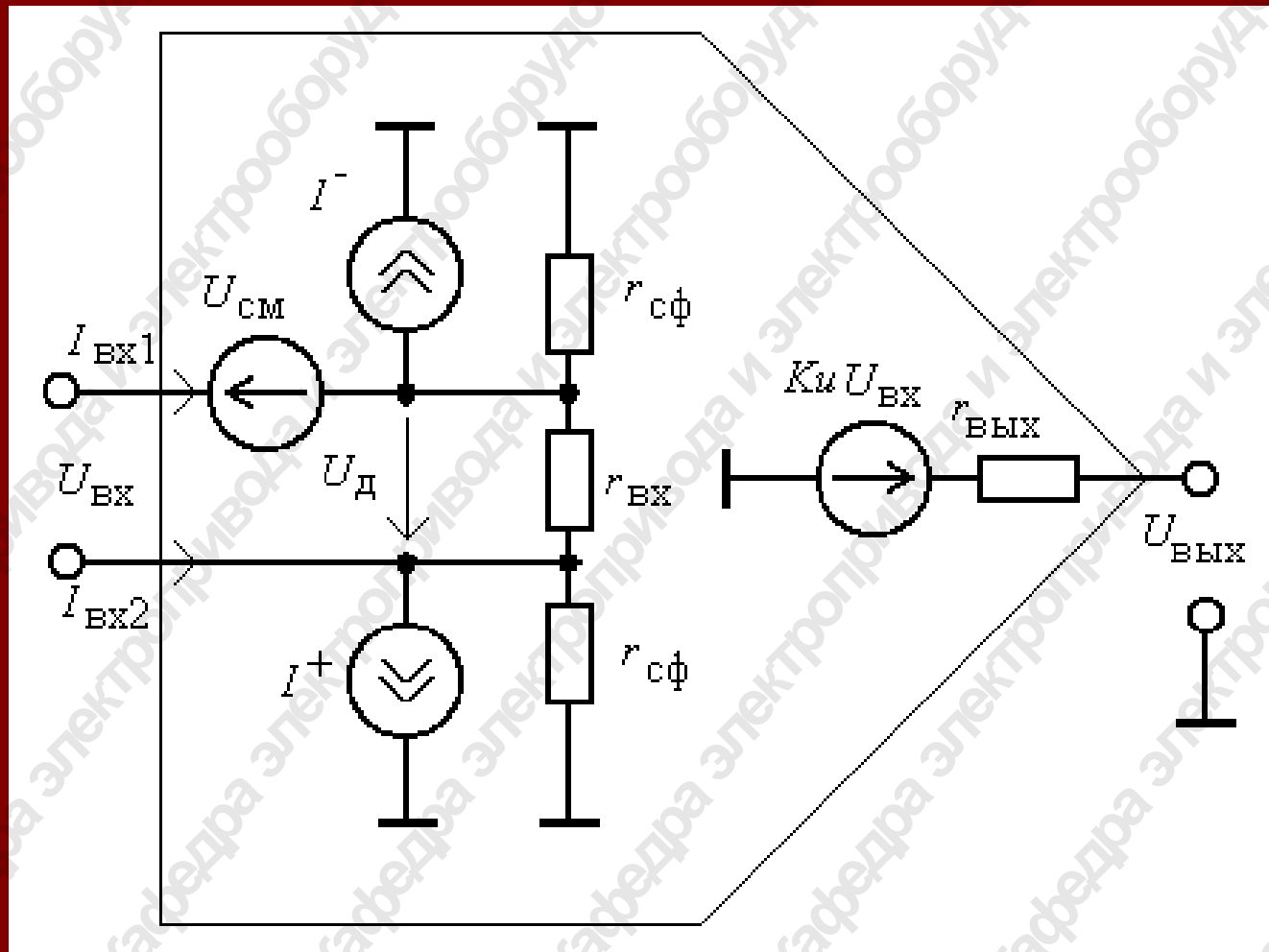


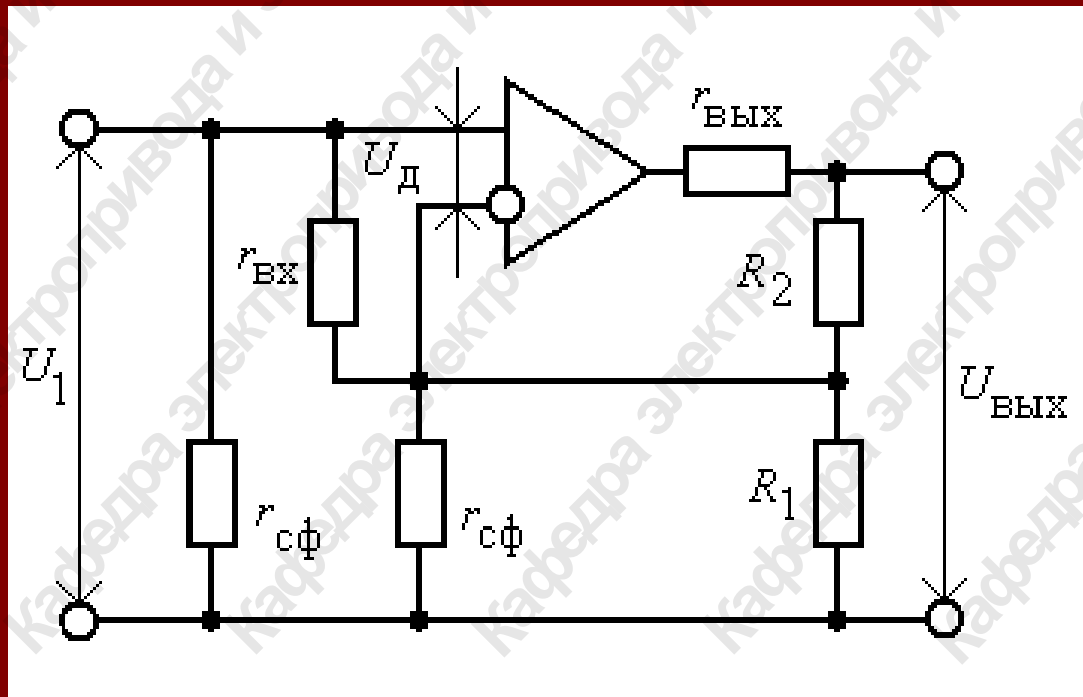
Схема замещения операционного усилителя



Входное сопротивление схемы

$$U_{\text{Д}} = U_{\text{ВЫХ}} / K_U = U_1 / (1 + K_U \beta),$$

$$R_{\text{ВХ}} = r_{\text{ВХ}} (1 + K_U \beta) \parallel r_{\text{сф}}$$



Выходное сопротивление схемы

$$r_{\text{вых}} = \left. \frac{\partial U_{\text{вых}}}{\partial I_{\text{вых}}} \right|_{U_n = \text{const}}$$

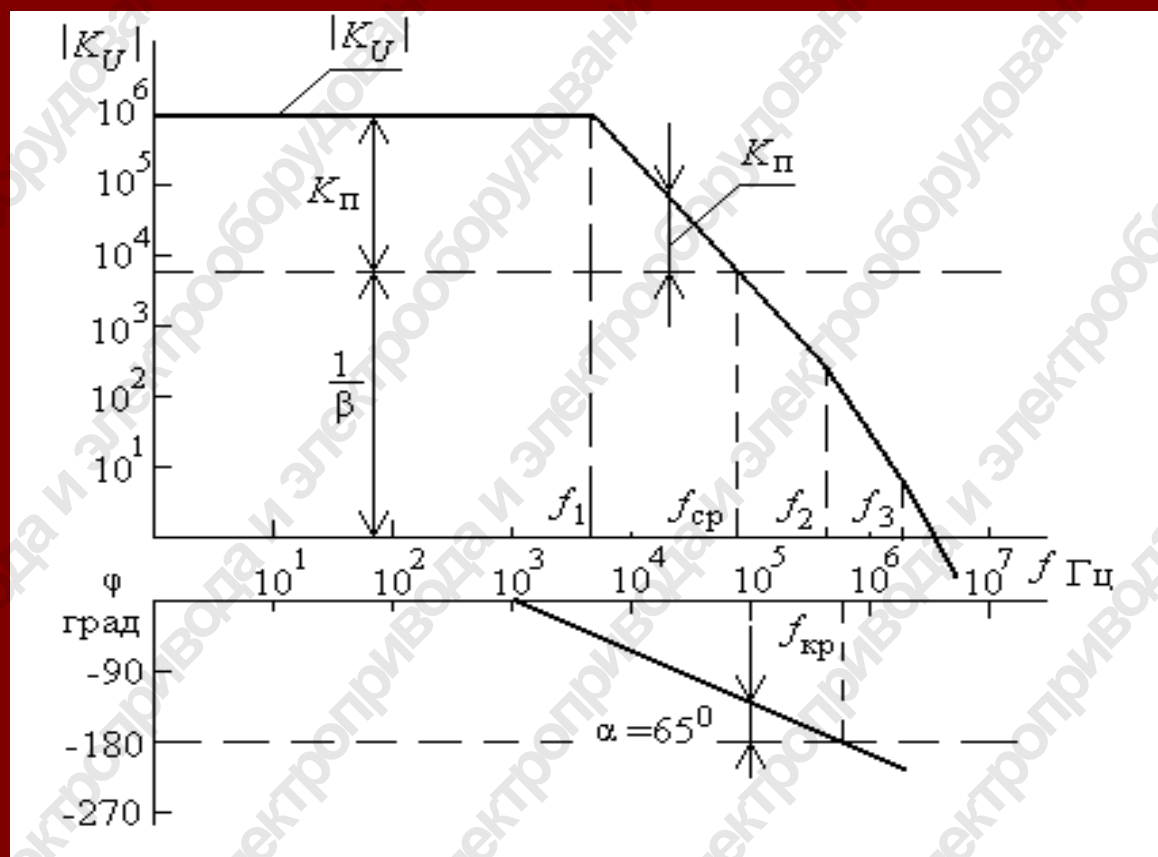
$$r_{\text{вых}} = \left. \frac{\partial U_{\text{вых}}}{\partial I_{\text{вых}}} \right|_{U_1 = \text{const}}$$

$$dU_{\text{д}} = -dU_{\text{н}} = -\beta dU_{\text{вых}}$$

$$dU_{\text{вых}} = K_{\text{д}} dU_{\text{д}} - r_{\text{вых}} dI_{\text{вых}}$$

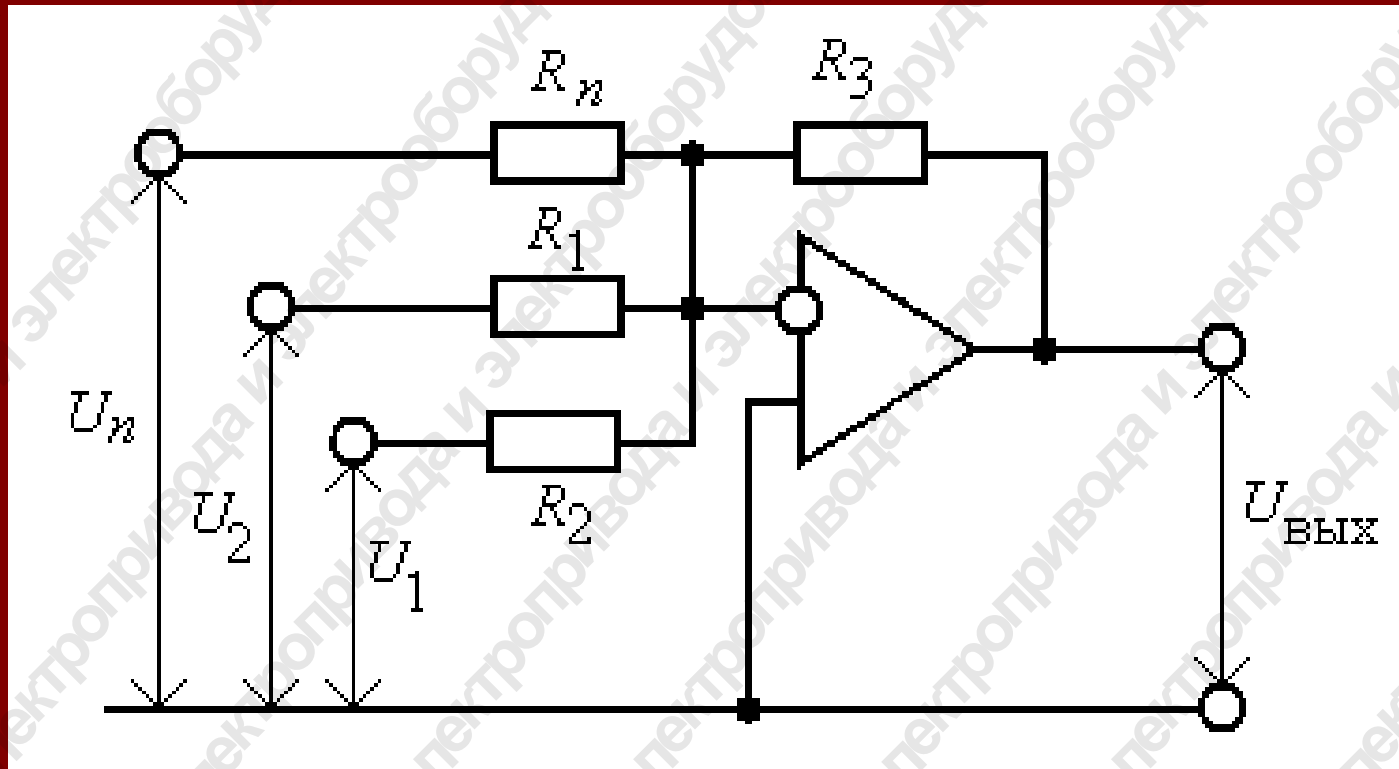
$$R_{\text{вых}} = \frac{r_{\text{вых}}}{1 + \beta K_{\text{д}}}$$

Частотная характеристика ОУ



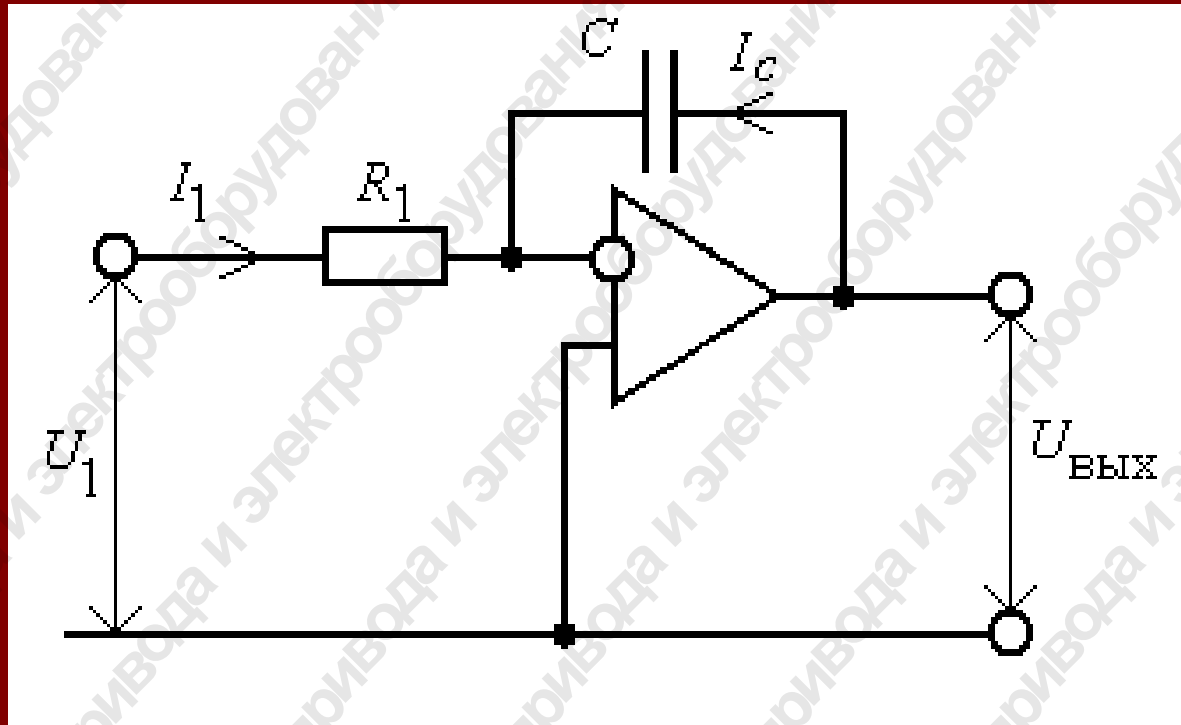
$$\frac{1}{\beta} = \begin{cases} 1 - K, & \text{для инвертирующего включения} \\ K, & \text{для неинвертирующего включения} \end{cases}$$

Сумматор



$$U_{\text{ВЫХ}} / R_3 = -(U_1 / R_1 + U_2 / R_2 + \dots + U_n / R_n)$$

Интегратор



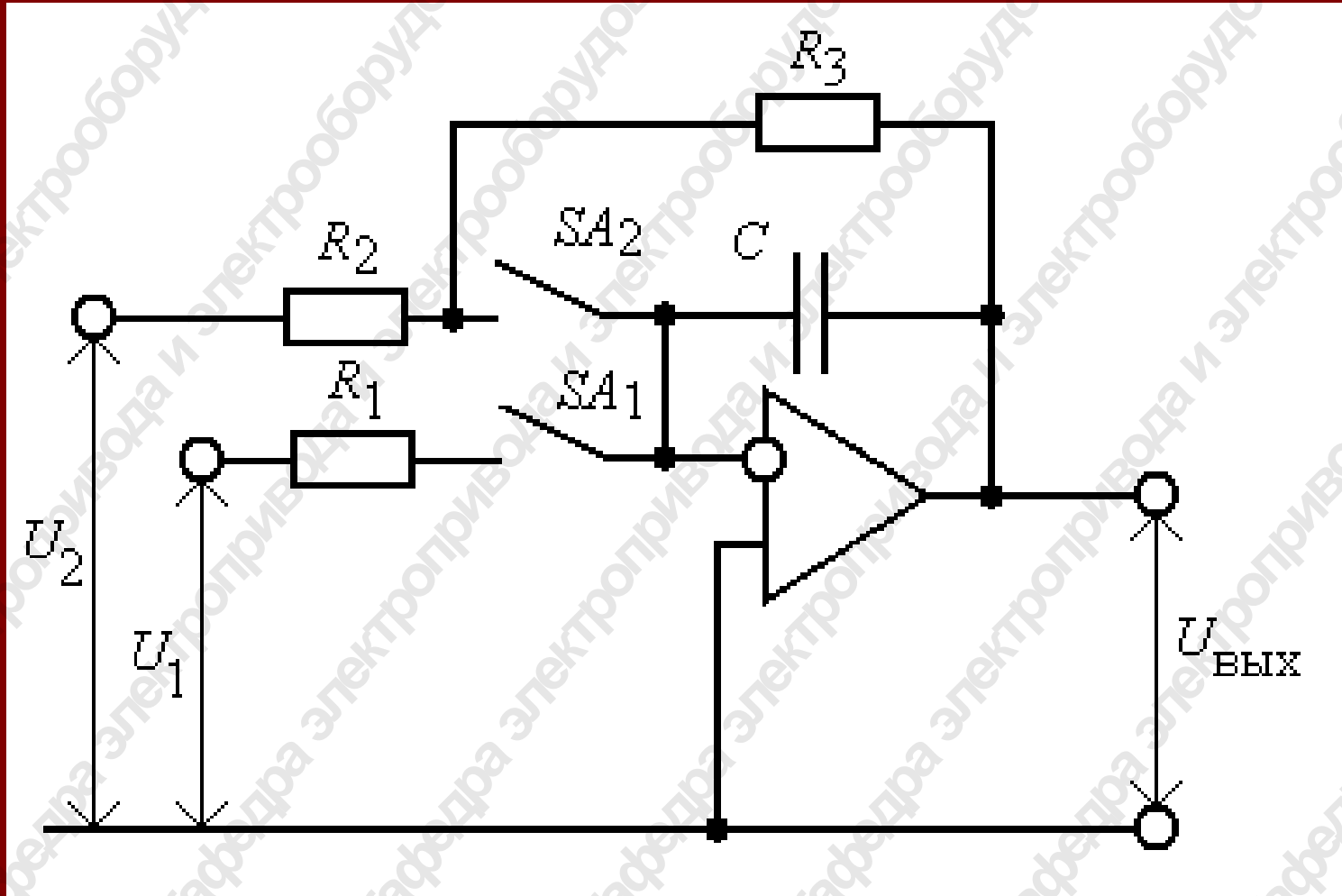
$$i_1 = -i_c$$

$$i_1 = u_1 / R_1$$

$$U_{\text{ВЫХ}}(t) = U_c(t) = U_c(0) + \frac{1}{C} \int_0^t i_c(t) dt$$

$$U_{\text{ВЫХ}}(t) = U_{\text{вЫХ}}(0) - \frac{1}{RC} \int_0^t U_1(t) dt$$

Интегратор

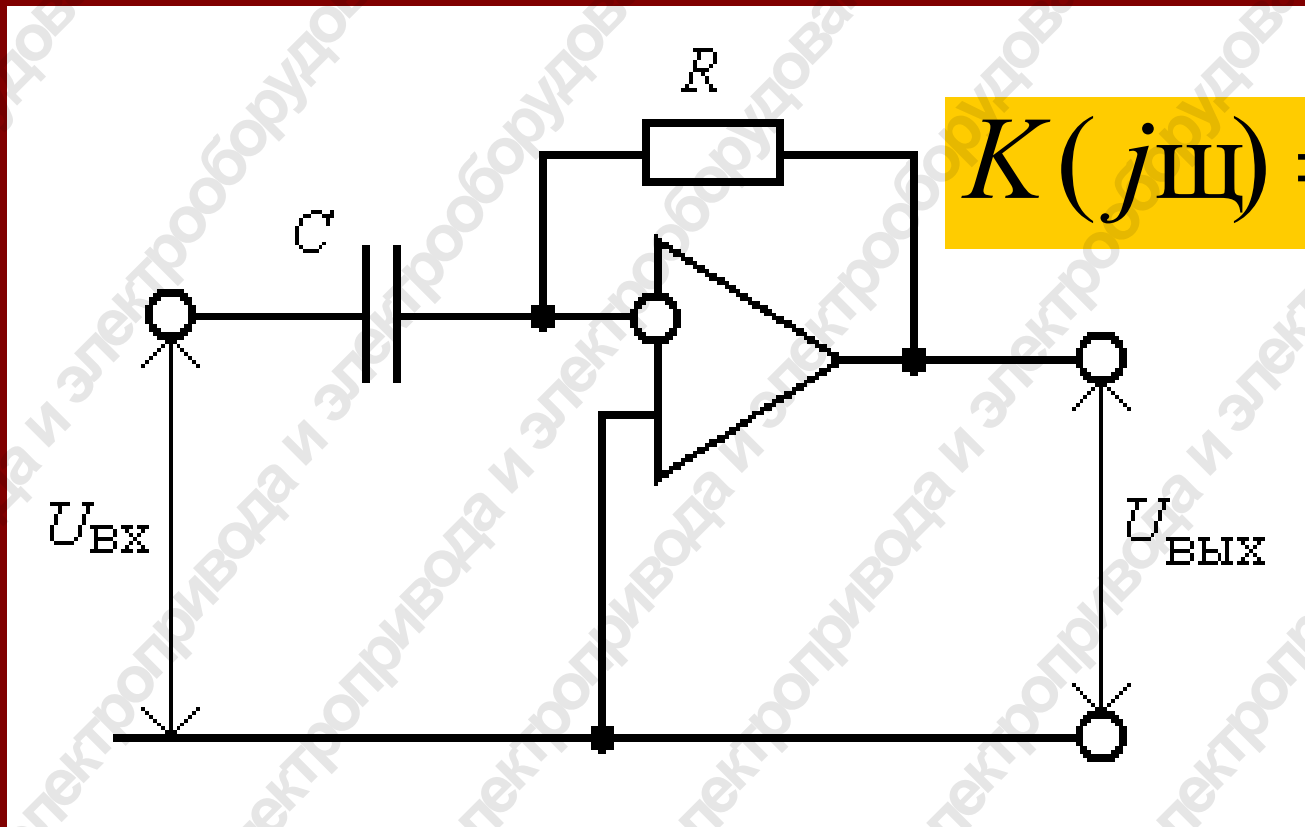


$$U_{\text{вых}} = -(R_3 / R_2)U_2$$

Дифференциатор

$$C(dU_{\text{ВХ}} / dt) + U_{\text{ВЫХ}} / R = 0$$

$$U_{\text{ВЫХ}} = -RC(dU_{\text{ВХ}} / dt)$$



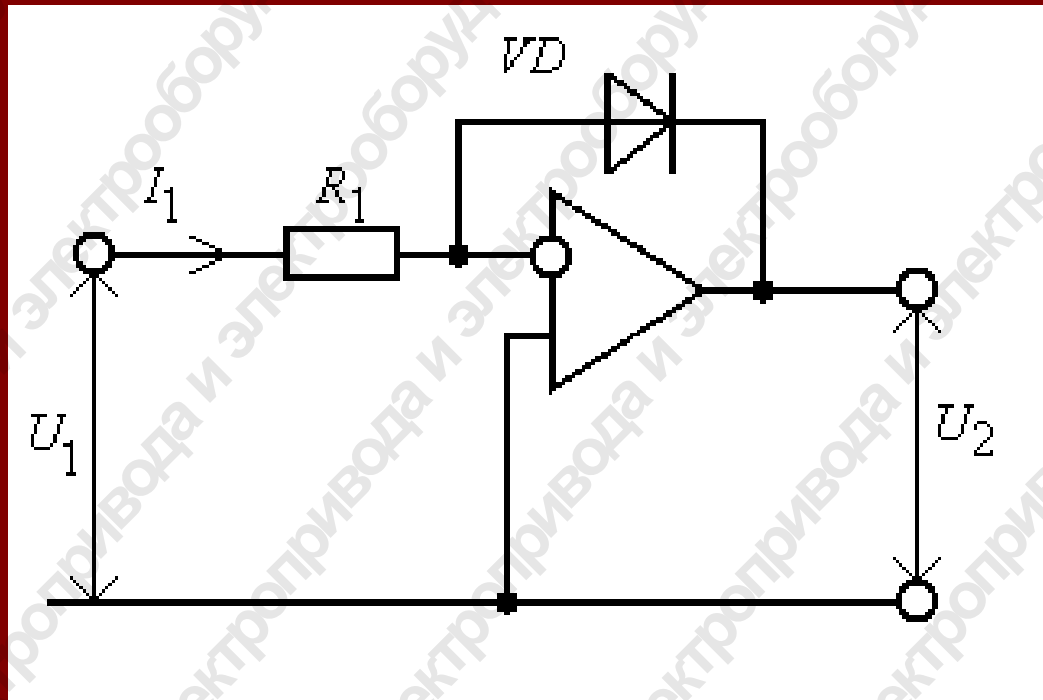
$$K(j\omega) = -j\omega RC$$

- схема имеет чисто емкостное входное сопротивление, которое в случае, если источником входного сигнала является другой операционный усилитель, может вызвать его неустойчивость;
- дифференцирование в области высоких частот приводит к значительному усилению составляющих высоких частот, что ухудшает соотношение сигнал/шум;
- в этой схеме в петле обратной связи ОУ оказывается включенным инерционное звено первого порядка, создающее в области высоких частот запаздывание по фазе до 90°

Логарифмический и экспоненциальный преобразователь

$$U_2 = U_a \log(U_1 / U_b)$$

$$U_2 = |U_1|$$

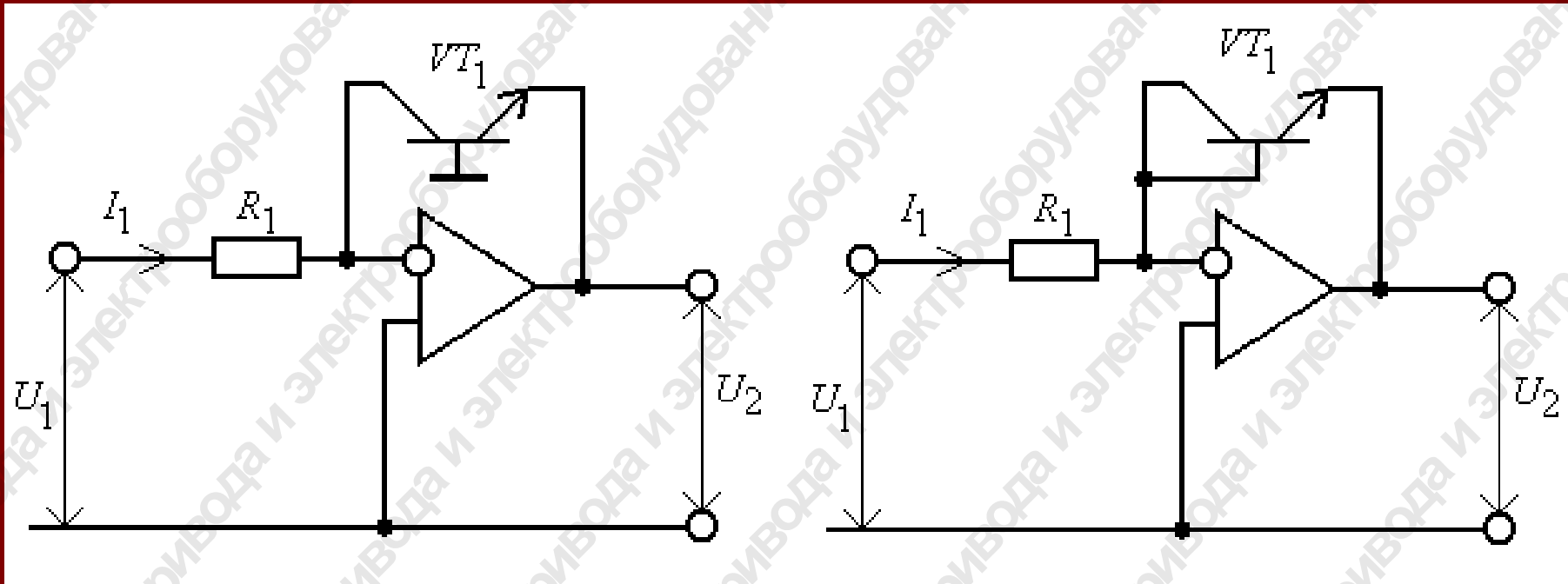


$$I = I_0 \left(e^{\frac{qU}{kT}} - 1 \right)$$

$$I_1 = \frac{U_1}{R_1} = -I_0 \left(e^{\frac{qU}{kT}} - 1 \right)$$

$$U_{\text{ВЫХ}} = -\frac{kT}{q} \ln \left(\frac{U_1}{R_1 I_0} - 1 \right)$$

Логарифмический и экспоненциальный преобразователь



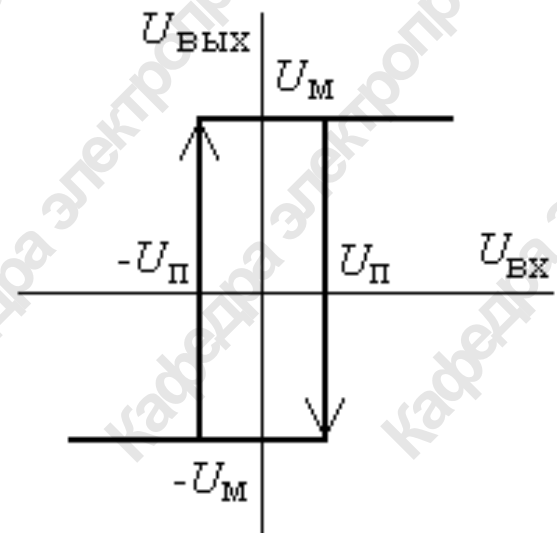
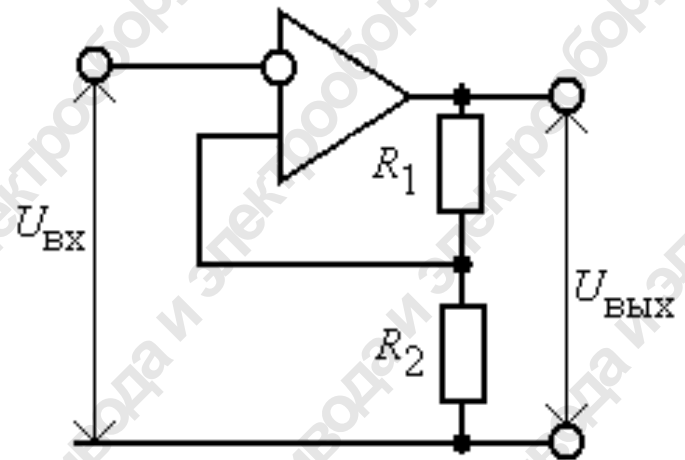
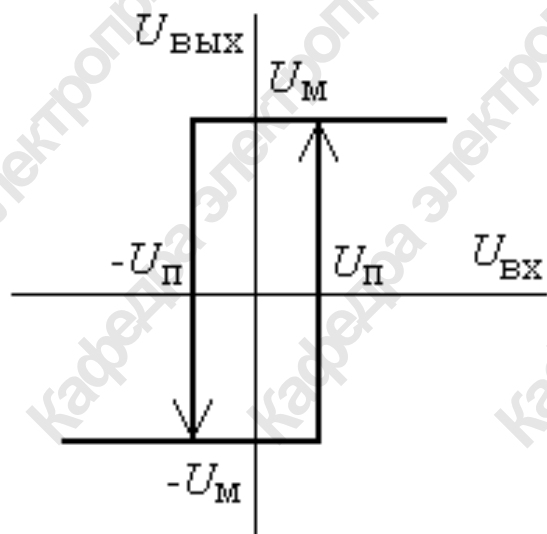
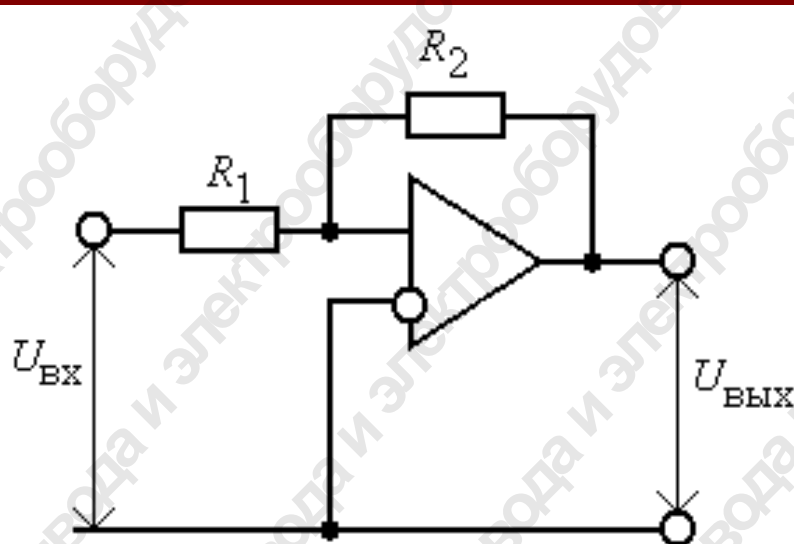
$$I_{\kappa} = I_{\kappa 0} \left(e^{\frac{qU_{\text{бэ}}}{kT}} - 1 \right)$$

$$U_2 = -\frac{kT}{q} \ln \left(\frac{U_1}{R_1 I_{\kappa 0}} - 1 \right) \approx -\frac{kT}{q} \ln \left(\frac{U_1}{R_1 I_{\kappa 0}} \right)$$

$$U_{\Pi} = U_{\text{М}} \frac{R_1}{R_2}$$

Релаксационный генератор

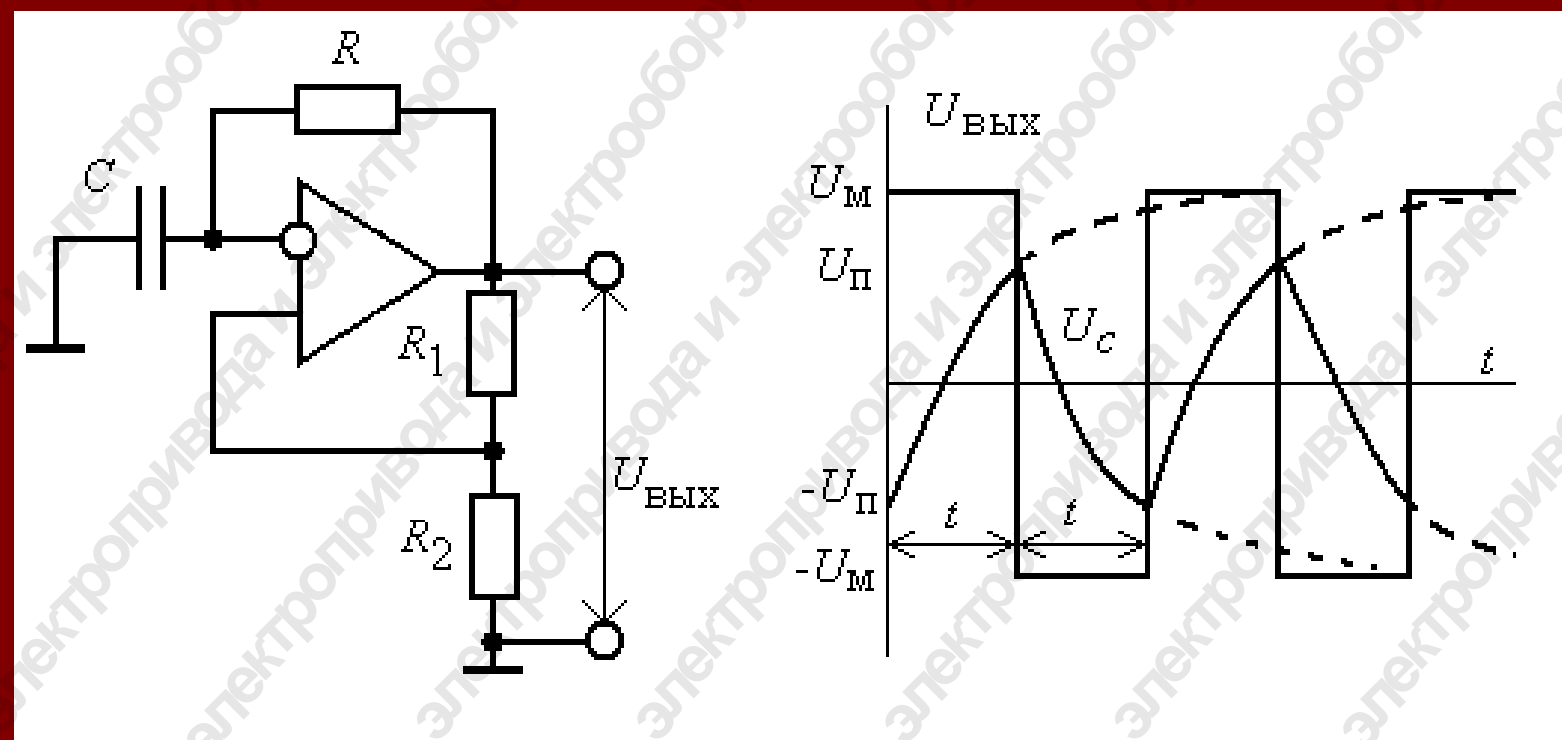
$$U_{\Pi} = U_{\text{М}} \frac{R_1}{R_1 + R_2}$$



$$I_{\text{ВЫХ, max}} = U_{\text{ВЫХ, max}} \left(\frac{1}{R_H} + \frac{1}{R_1 + R_2} + \frac{1 + \Gamma}{R} \right);$$

$$\Gamma = U_M / 2U_{\text{ВЫХ, max}},$$

$$\frac{dU_c}{dt} = \pm \frac{U_M - U_c}{RC}$$



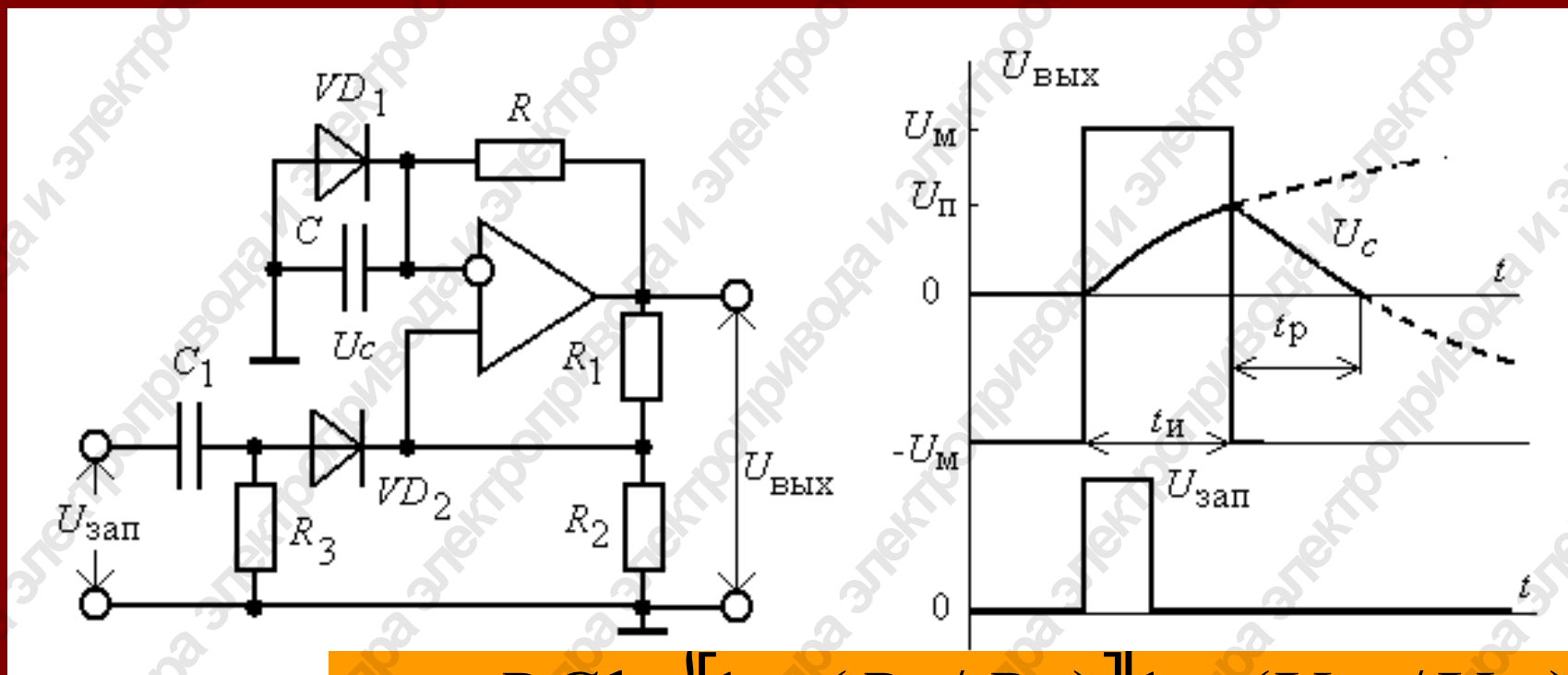
$$U_c(t) = U_M - (U_M + U_{\Pi})e^{-t/RC}$$

$$t = RC \ln \left[1 + 2R_1 / R_2 \right]$$

$$T = 2t = 2RC \ln \left[1 + 2R_1 / R_2 \right]$$

Ждущий мультивибратор (одновибратор)

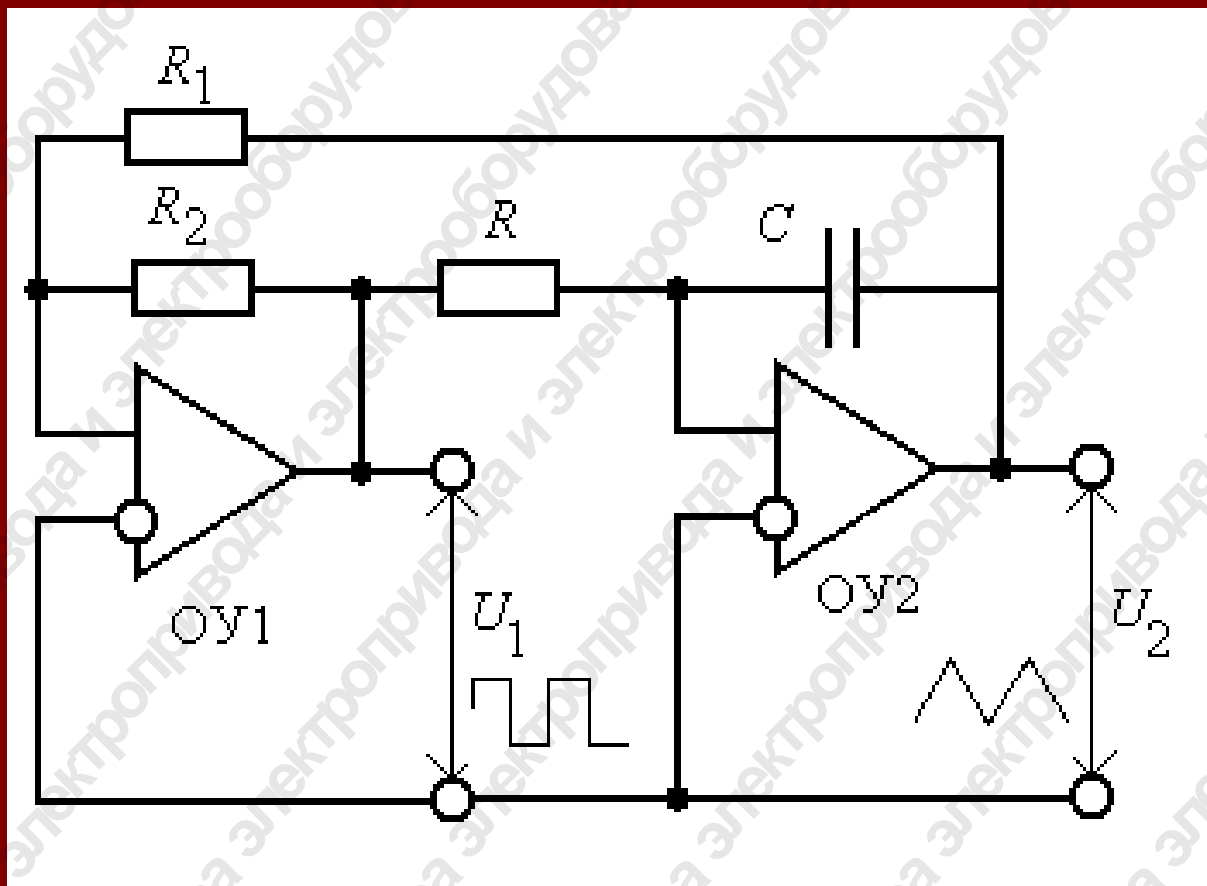
$$U_p = -U_M \frac{R_1 \parallel R_3}{R_1 \parallel R_3 + R_2} \leq U_c$$



$$t_{\text{И}} = RC \ln \left\{ \left[1 + \left(\frac{R_1}{R_2} \right) \right] \left[1 + \left(\frac{U_{\text{Д}}}{U_{\text{М}}} \right) \right] \right\}$$

$$U_c(t) = U_M - (U_M + U_{\text{Д}}) e^{-t/RC}$$

Генератор прямоугольного и треугольного напряжений



$$T = 4RCR_1 / R_2$$