

# ИЗПОЛЗВАНИ ИЗТОЧНИЦИ

- ❑ Лекции на д-р Фогелман, Университет – Карлсруе
- ❑ Лекции на д-р Клос, Университет – Карлсруе
- ❑ Лекции на д-р Крокол, Университет – Карлсруе
- ❑ <http://www.elektronik-kompendium.de/sites>
- ❑ <http://www.swarthmore.edu/NatSci/echeeve1/Ref/LPSA/Bode/BodeHow.html>
- ❑ <http://sound.westhost.com/project22.htm>

# Използвани означения

- Тема, която се среща за първи път
- Тема, която вече е позната

# Усилватели и Компаратори

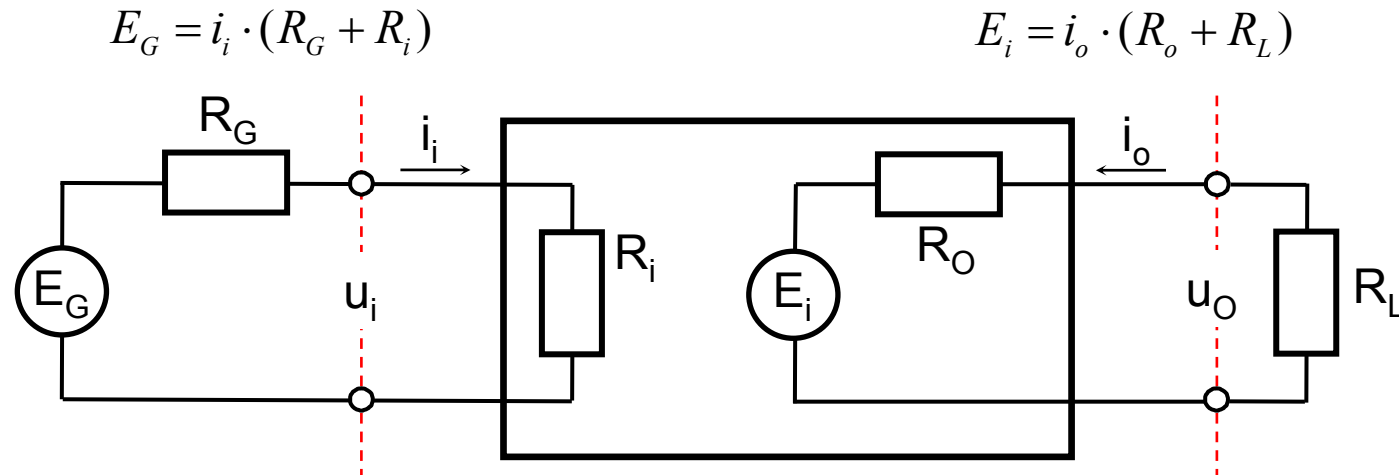
Цел разглеждането:

- да може да отговаряте на тези или подобни въпроси:
  - Кой са основните параметри на усилвателите;
  - Какви видове обратни връзки има;
  - Как влияят обратните връзки върху параметрите;
  - Какви са принципите на работа на операционните у-ли;
  - Как работят основните схеми с ОУ;
  - Каква е разликата между ОУ и компаратор?

# Усилватели и Компаратори

- ❑ **Основни параметри на усилватели**
- ❑ Обратни връзки
- ❑ Операционни усилватели с ООВ
  - Инвертиращ
  - Неинвертиращ
  - Филтри
- ❑ Операционни усилватели без ОВ (Компаратори)
- ❑ Операционни усилватели с ПОВ

# Аналогови устройства (усилвател)



$$R_G \gg R_i$$

(генератор на ток)

$$R_o \gg R_L$$

$$R_G \ll R_i$$

(генератор на напрежение)

$$R_o \ll R_L$$

$$R_G \sim R_i$$

(генератор на мощност)

$$R_o \sim R_L$$

# Основни параметри

- Входно съпротивление

$$R_i(R_{\text{ex}}) = \frac{u_i}{i_i}$$

- Изходно съпротивление

$$R_o(R_{\text{usz}}) = \frac{u_o}{i_o}$$

- Коефициент на усилване по напрежение

$$K_u = \frac{u_o}{u_i}$$

$$R_L = \infty \Rightarrow i_o = 0 \Rightarrow u_o = E_i \Rightarrow E_i = K_{u0} \cdot u_i$$

$$R_L \neq 0 \Rightarrow K_u = K_{u0} \frac{R_L}{R_o + R_L}$$

$$K_{u(NORM)} = \frac{K_u}{K_{u(1000Hz)}}$$

- Коефициент на усилване по ток

$$K_i = \frac{i_o}{i_i}$$

- Коефициент на усилване по мощност

$$K_p = \frac{p_o}{p_i}$$

# Логаритмично представяне

- Като безразмерна величина е по удобно да се изразяват в dB

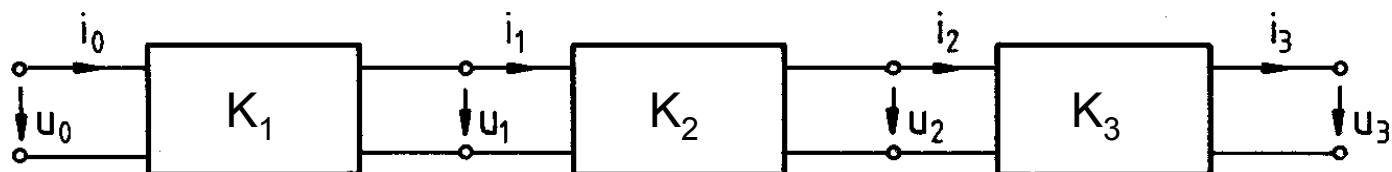
$$K_p, dB = 10 \lg \frac{P_o}{P_i} \Rightarrow \text{по дефиниция}$$

$$K_u, dB = 20 \lg \frac{U_o}{U_i} \quad \text{при } R_o = R_i$$

$$K_i, dB = 20 \lg \frac{i_o}{i_i} \quad \text{при } R_o = R_i$$

- На практика удобството е толкова голямо, че всяка безразмерна величина се представя както напрежението ( $20 \lg$ )

# Логаритмично представяне



$$K_{u1} = \frac{u_1}{u_0}; K_{u2} = \frac{u_2}{u_1}; K_{u3} = \frac{u_3}{u_2}; \quad K_u = \frac{u_3}{u_0} = K_{u1} \cdot K_{u2} \cdot K_{u3}$$

$$\lg K_u = \lg(K_{u1} \cdot K_{u2} \cdot K_{u3}) = \lg K_{u1} + \lg K_{u2} + \lg K_{u3}$$

$$K_{i1} = \dots$$

$$K_{p1} = \dots$$



# Основни параметри

- Коефициент на полезно действие КПД%;  $\eta\%$

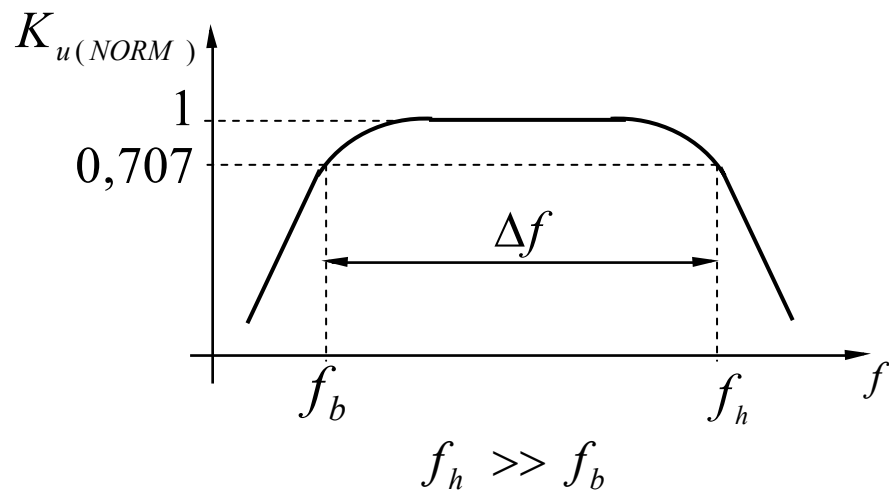
$$\eta = \frac{P_o}{\cancel{P_i} + P_{BAT}} \cdot 100, \text{ тъй като } P_i \ll P_{BAT}$$

- Коефициент на нелинейни изкривявания КНИ%;  $k\%$

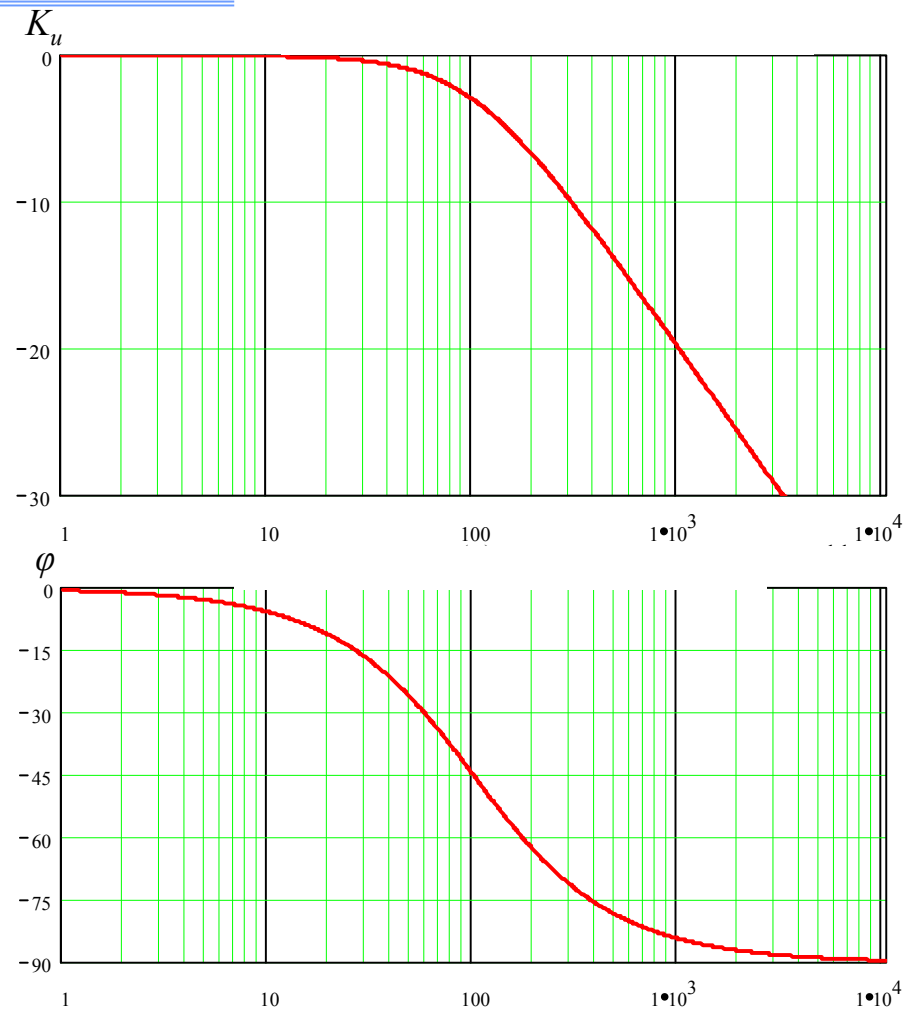
$$k = \frac{\sqrt{u_2^2 + u_3^2 + u_4^2 + \dots + u_n^2}}{\sqrt{u_1^2}} \cdot 100$$

- Линејни изкривявания
  - Амплитудно-честотна характеристика (АЧХ)
  - Фазово-честотна характеристика (ФЧХ)

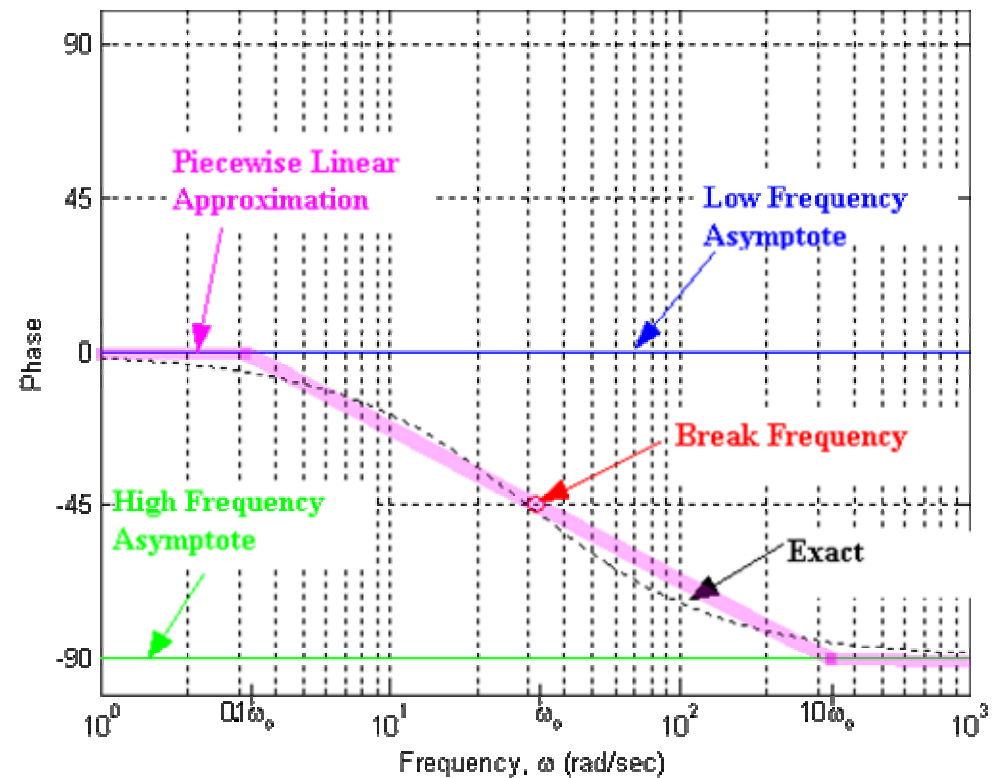
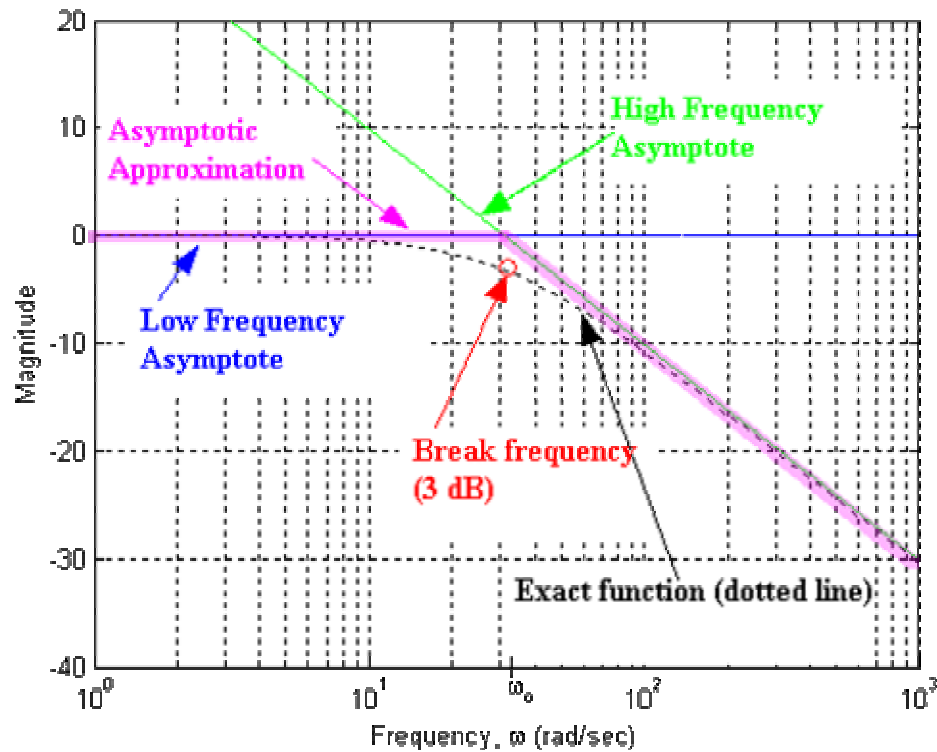
# АЧХ, ФЧХ



Диаграми на Бодe



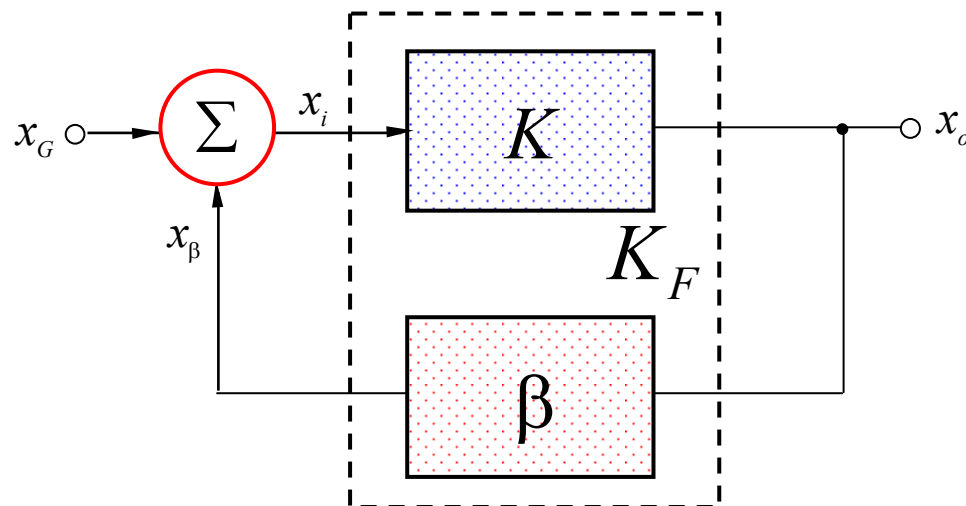
# AЧХ, ФЧХ



# Усилватели и Компаратори

- *Основни параметри на усилватели*
- **Обратни връзки**
- **Операционни усилватели с ООВ**
  - Инвертиращ
  - Неинвертиращ
  - Филтри
- **Операционни усилватели без ОВ (Компаратори)**
- **Операционни усилватели с ПОВ**

# Обратна връзка



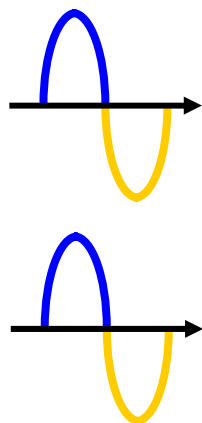
$$K = \frac{x_o}{x_i} \quad \text{Предавателна функция на правата верига}$$

$$\beta = \frac{x_\beta}{x_o} \quad \text{Предавателна функция на обратната връзка}$$

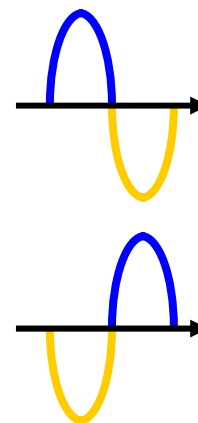
# Видове обратни връзки

- В зависимост от фазите на  $x_G$  и  $x_B$

Положителна обратна връзка



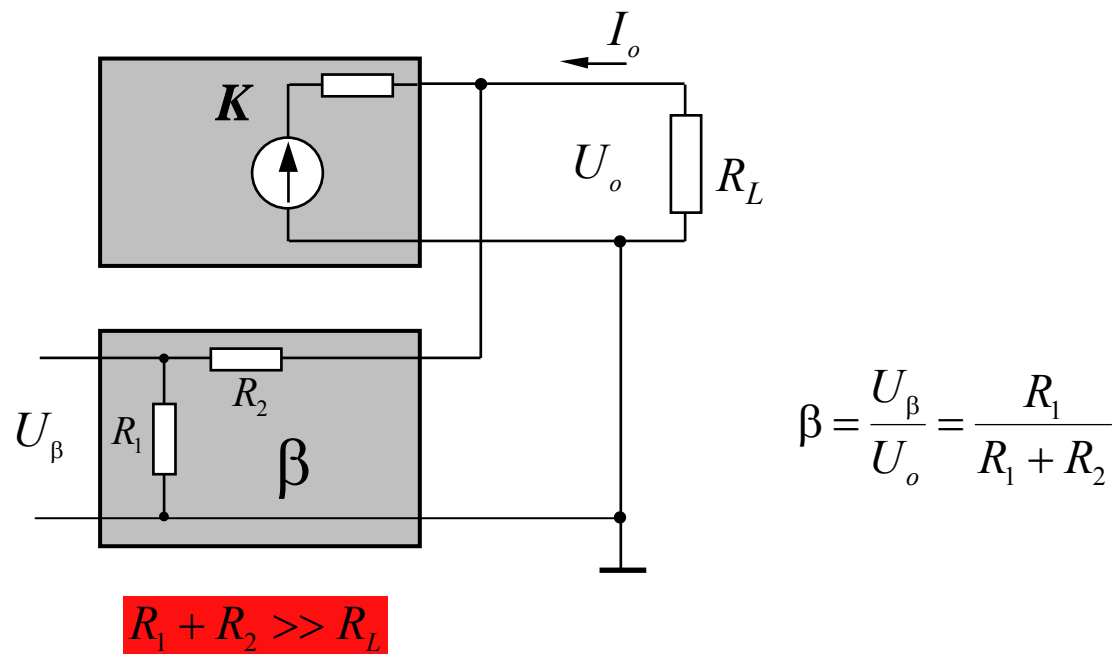
Отрицателна обратна връзка



# Видове обратни връзки

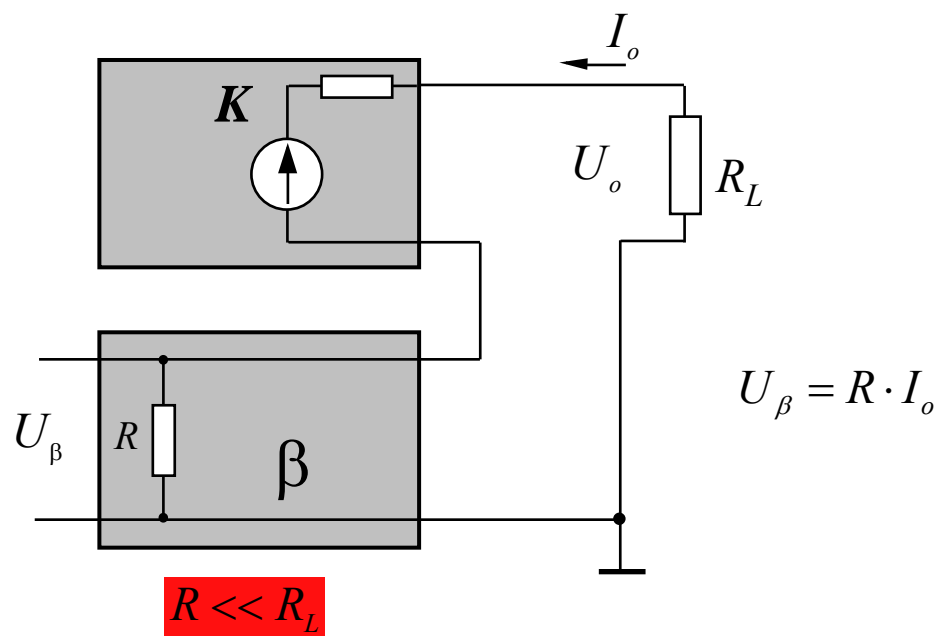
- ❑ В зависимост от начина на взимане на сигнала от изхода
  - Обратна връзка по напрежение
  - Обратна връзка по ток
- ❑ В зависимост от начина на връщане на сигнала на входа
  - Последователна обратна връзка
  - Паралелна обратна връзка

# Обратна връзка по напрежение





# Обратна връзка по ток



# Отрицателна обратна връзка (ООВ)

$$x_i = x_G - x_\beta; \quad K_{F(-)} = \frac{x_o}{x_G} = \frac{x_o}{x_i + x_\beta} = \frac{x_o}{x_i \left( 1 + \frac{x_\beta \cdot x_o}{x_i \cdot x_o} \right)} = \frac{K}{1 + \beta K} = \frac{K}{F}$$

$F = 1 + \beta K$  – дълбочина на отрицателна обратна връзка

$$F > 1 \rightarrow K_{F(-)} < K;$$

В случаите, когато  $\beta K \gg 1$  за коефициента на усилване следва:

$$K_{F(-)} \approx \frac{1}{\beta}.$$

# Положителна обратна връзка (ПОВ)

$$x_i = x_G + x_\beta; \quad K_{F(+)} = \frac{x_o}{x_G} = \frac{K}{1 - \beta K} = \frac{K}{F}$$

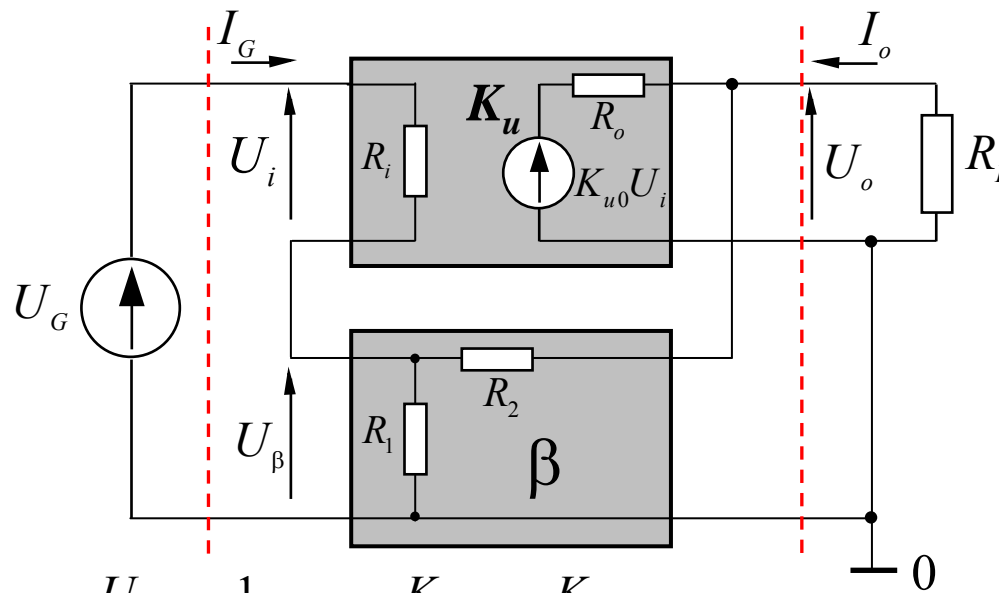
$F = 1 - \beta K$  – дълбочина на положителна обратна връзка

$$F < 1 \rightarrow K_{F(+)} > K;$$

$$\text{При } \beta K \sim 1 \Rightarrow K_{F(+)} \rightarrow \infty$$

# Пример

Последователна отрицателна обратна връзка по напрежение



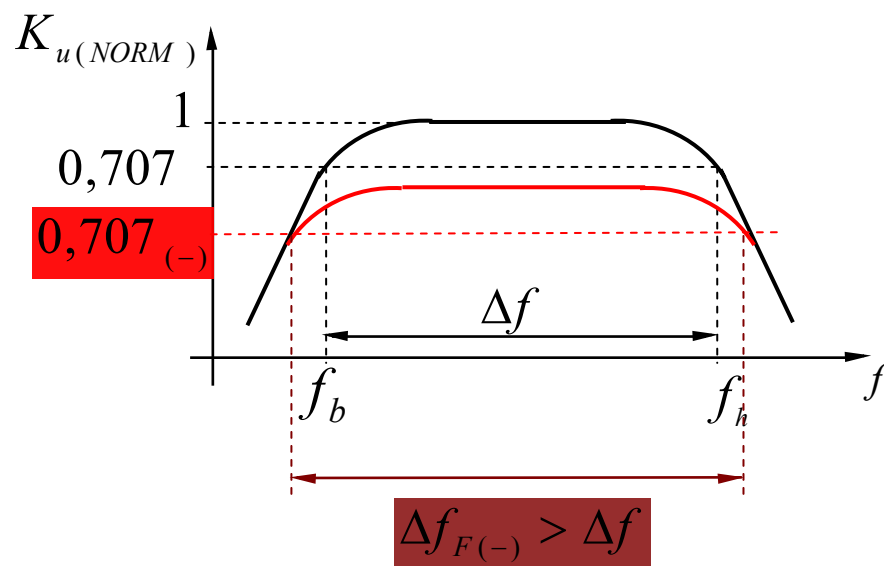
$$U_i = U_G - U_\beta$$

$$\beta = \frac{U_\beta}{U_o} = \frac{R_1}{R_1 + R_2}$$

$$K_{uF} = \frac{U_o}{U_G} = \frac{U_o}{U_i + U_\beta} = \frac{U_o}{U_i} \cdot \frac{1}{1 + \frac{U_\beta}{U_i}} = \frac{K_u}{1 + \beta K_u} = \frac{K_u}{F}$$

$$R_{iF} = \frac{U_G}{I_G} = \frac{U_i + U_\beta}{I_G} = R_i + \frac{\beta K_u \cdot U_i}{I_G} = R_i(1 + \beta K_u) = R_i \cdot F$$

# Влияние на ООВ върху АЧХ



Произведение усилване-честота:  $GBP = K_u \Delta f \approx K_u f_h = const.$

# Усилватели и Компаратори

- *Основни параметри на усилватели*
- *Обратни връзки*
- **Операционни усилватели с ООВ**
  - Инвертиращ
  - Неинвертиращ
  - Филтри
- Операционни усилватели без ОВ (Компаратори)
- Операционни усилватели с ПОВ

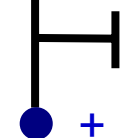
# Операционен усилвател (ОУ)

Симетрично захранване

● +

E1

● -

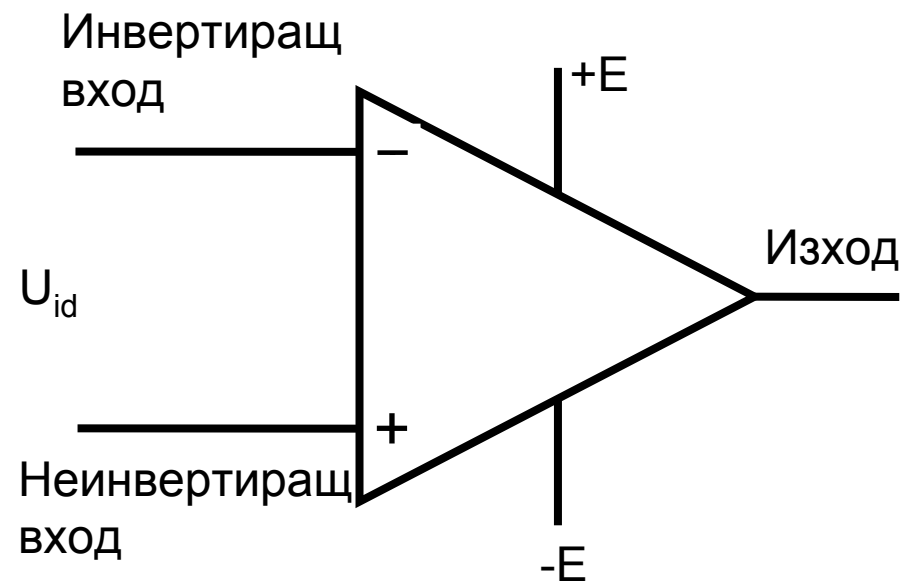


$$|E1| = |E2|$$

E2

● -

Символно означение



Операционните усилватели са интегрални електронни схеми с голям коефициент на усилване по напрежение ( $K_{ud} = 10.000 \dots 500.000$ ), които са честотно зависими. Чрез включване на допълнителни външни елементи усилването може да се нагласи съгласно дадена математическа операция.

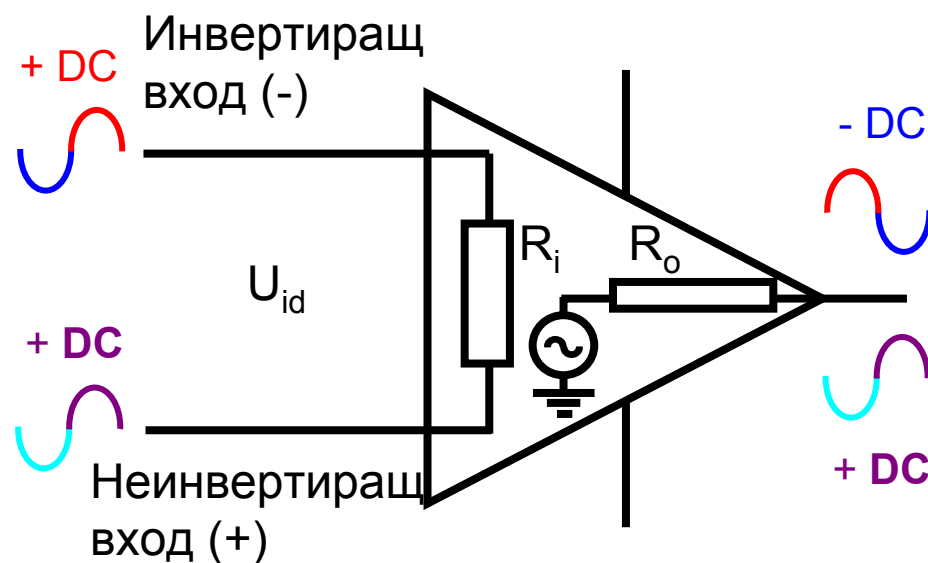
# Идеален операционен усилвател

- $R_i \rightarrow \infty$  ( $I_{iOY} = 0!!!$ )
- $K_{ud} \rightarrow \infty$  ( $U_{id} = 0!!!$ )
- $R_o \rightarrow 0$
- $\Delta f \rightarrow \infty$

## Реален ОУ

- $R_i \rightarrow 10^{12} \Omega$
- $K_{ud} \rightarrow 10^7$
- $R_o \rightarrow m\Omega$
- $\Delta f \rightarrow ?$

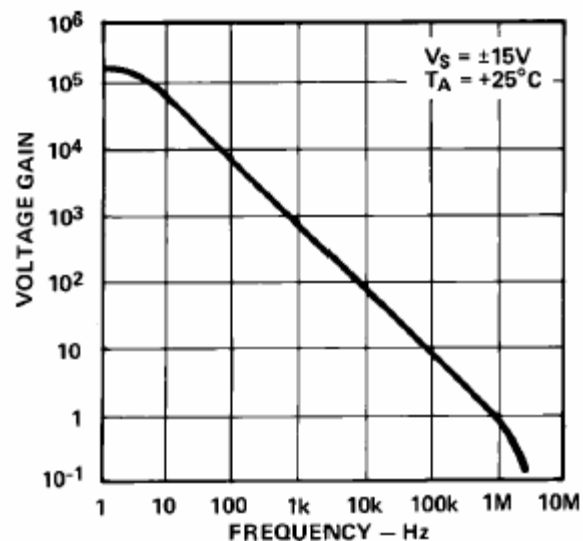
## Еквивалентна схема



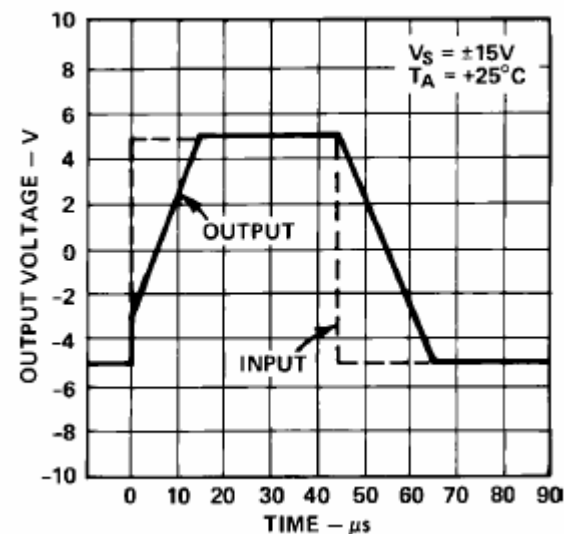
Големината на изходното напрежение се ограничава от захранващите напрежения. Усилвателят вече не работи в линейната област, коефициентът на усилване е нула.



# Параметри на реален ОУ

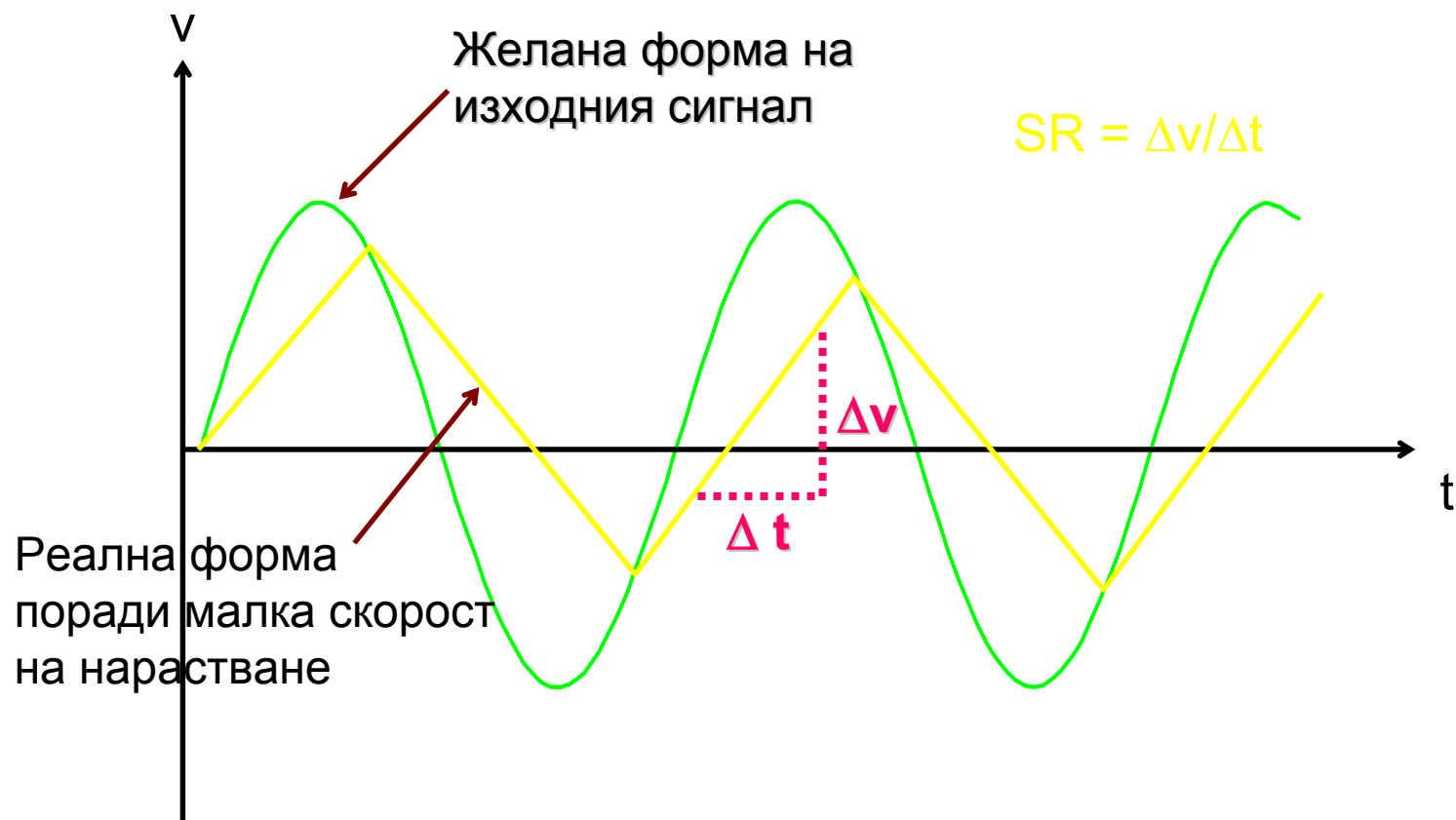


Коефициент на усилване по напрежение

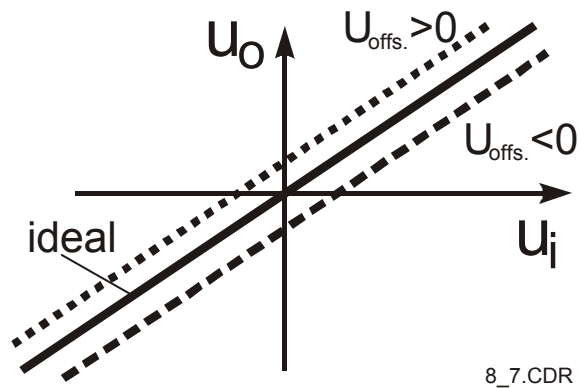


Скорост на нарастване на изходния сигнал (Slew-Rate)

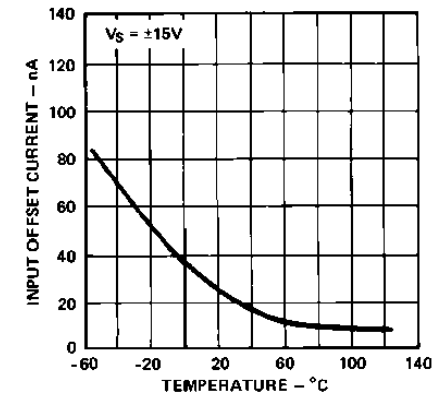
# Параметри на реален ОУ



# Параметри на реален ОУ

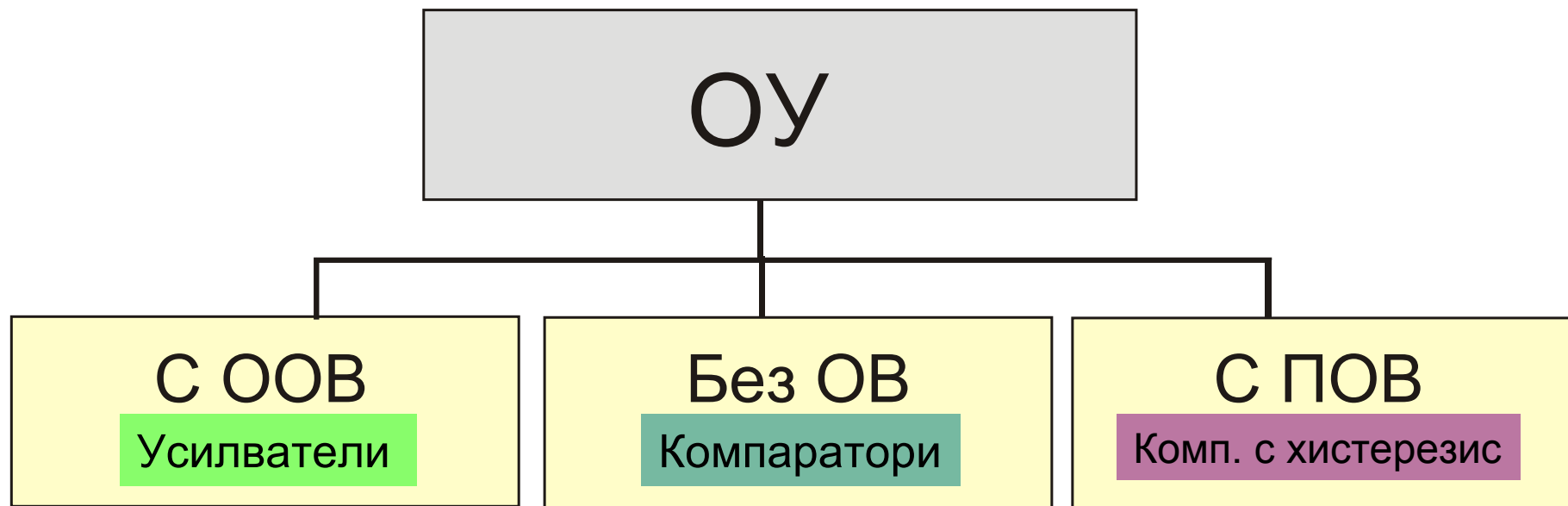


Offset-напряжение



Offset-ток

# Използване на ОУ



+ ПОВ  $\Rightarrow$  sin генератори

+ ООВ  $\Rightarrow$   $\square$  генератори

# Усилватели и Компаратори

- *Основни параметри на усилватели*
- *Обратни връзки*
- *Операционни усилватели с ООВ*
  - **Инвертиращ**
  - Неинвертиращ
  - Филтри
- Операционни усилватели без ОВ (Компаратори)
- Операционни усилватели с ПОВ

# Инвертиращ усилвател (OOB)

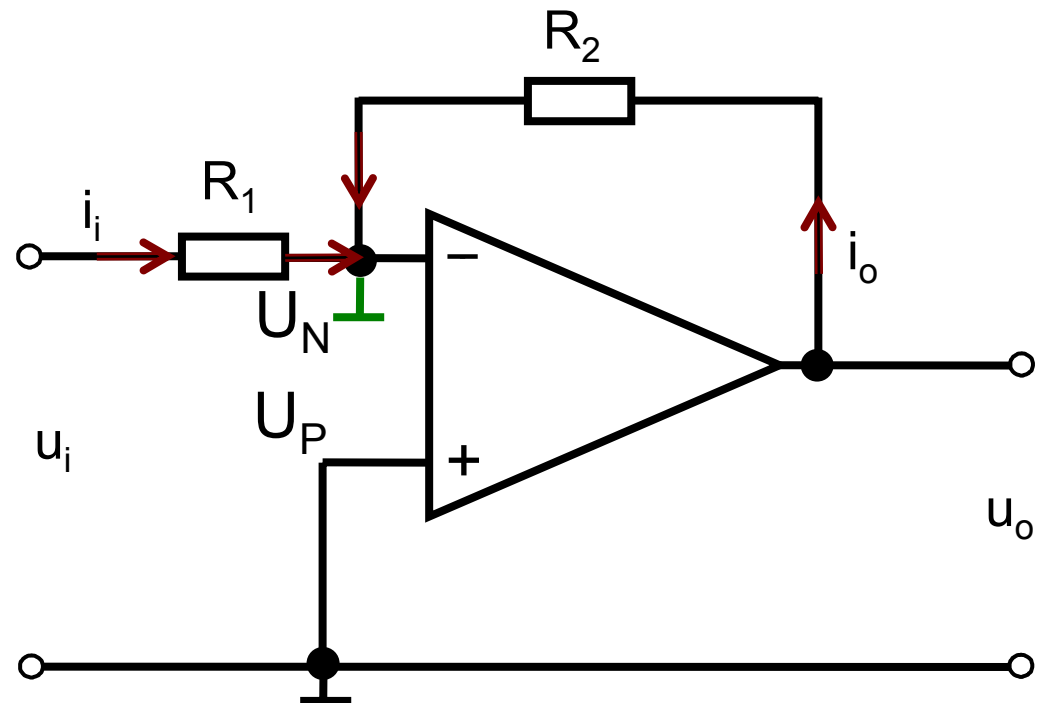
От  $U_{id} = 0$  следва  $U_N = U_P = 0 \text{ V}$

От  $I_{ioy} = 0$  следва  $I_i = -I_o$

$$u_i = i_i \cdot R_1; u_o = i_o \cdot R_2$$

$$K_u = u_o / u_i = i_o \cdot R_2 / i_i \cdot R_1$$

$$K_u = -R_2 / R_1$$



# Инвертиращ усилвател (пример 1)

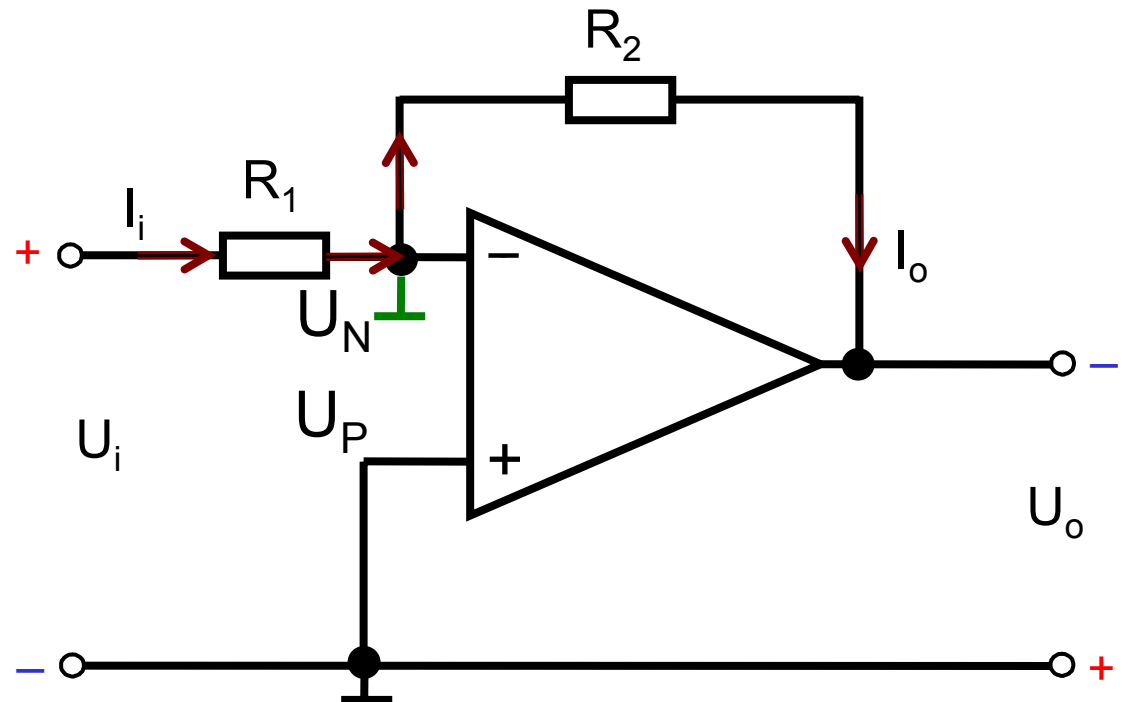
$$U_i = +2 \text{ V}; R_1 = R_2 = 10 \text{ k}\Omega; U_o = ?; I_i = ?; I_o = ?; K_u = ?$$

$$I_i = U_i / R_1 = 0,2 \text{ mA}$$

$$I_o = U_o / R_2 = I_i$$

$$U_o = -2 \text{ V}$$

$$K_u = -1$$



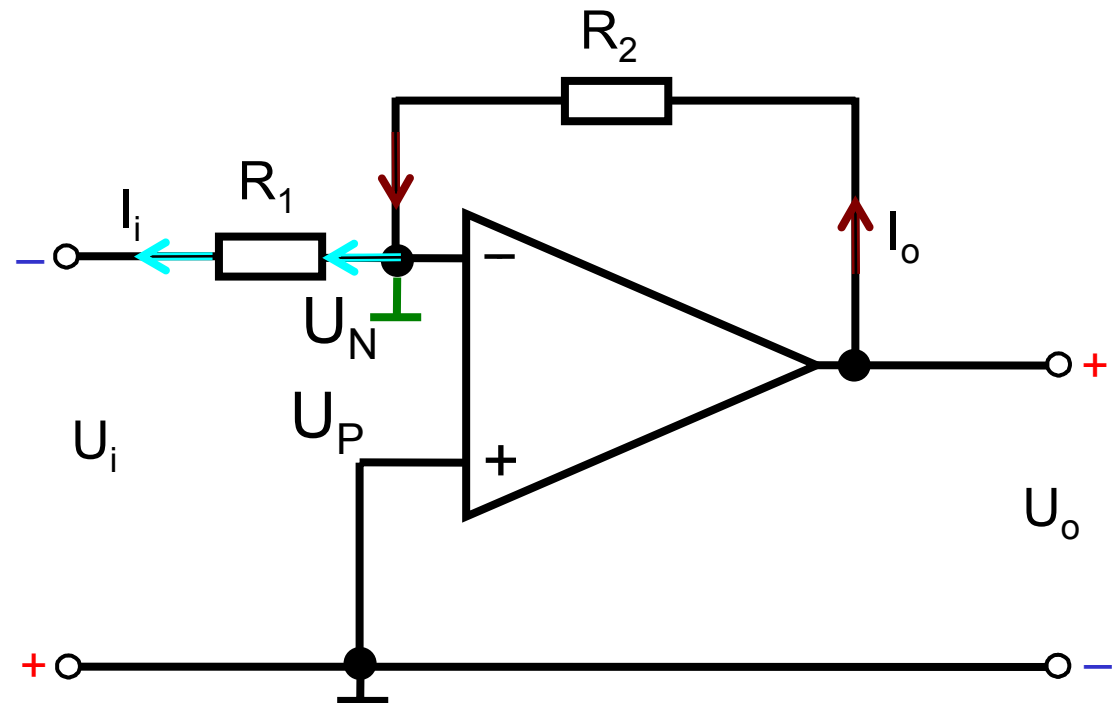
# Инвертиращ усилвател (пример 2)

$$U_i = -2 \text{ V}; R_1 = 10 \text{ k}\Omega; R_2 = 20 \text{ k}\Omega; U_o = ?; I_i = ?; I_o = ?$$

$$I_i = U_i / R_1 = 0,2 \text{ mA}$$

$$I_o = U_o / R_2 = I_i$$

$$U_o = +4 \text{ V}$$





# Инвертиращ усилвател (пример 3)

$U_i = +2 \text{ V}$ ;  $R_1 = 10 \text{ k}\Omega$ ;  $R_2 = 20 \text{ k}\Omega$ ;  $R_T = 2 \text{ k}\Omega$ ;  
 $U_o = ?$ ;  $I_i = ?$ ;  $I_o = ?$ ;  $I_{Oy} = ?$

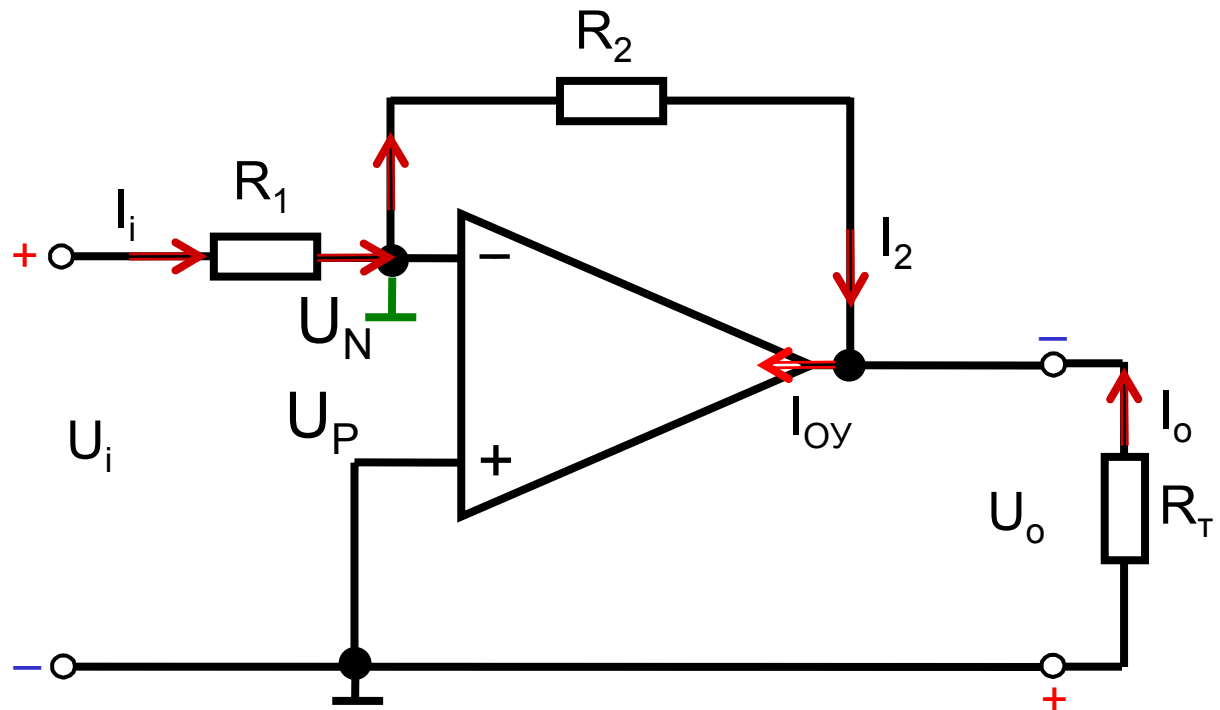
$$I_i = U_i / R_1 = 0,2 \text{ mA}$$

$$I_2 = U_o / R_2 = I_i$$

$$U_o = -4 \text{ V}$$

$$I_o = U_o / R_T = 2 \text{ mA}$$

$$I_{Oy} = I_2 + I_o = 2,2 \text{ mA}$$



# Инвертиращ усилвател (пример 4)

$U_i = -2 \text{ V}$ ;  $R_1 = 10 \text{ k}\Omega$ ;  $R_2 = 20 \text{ k}\Omega$ ;  $R_T = 2 \text{ k}\Omega$ ;  
 $U_o = ?$ ;  $I_i = ?$ ;  $I_o = ?$ ;  $I_{Oy} = ?$

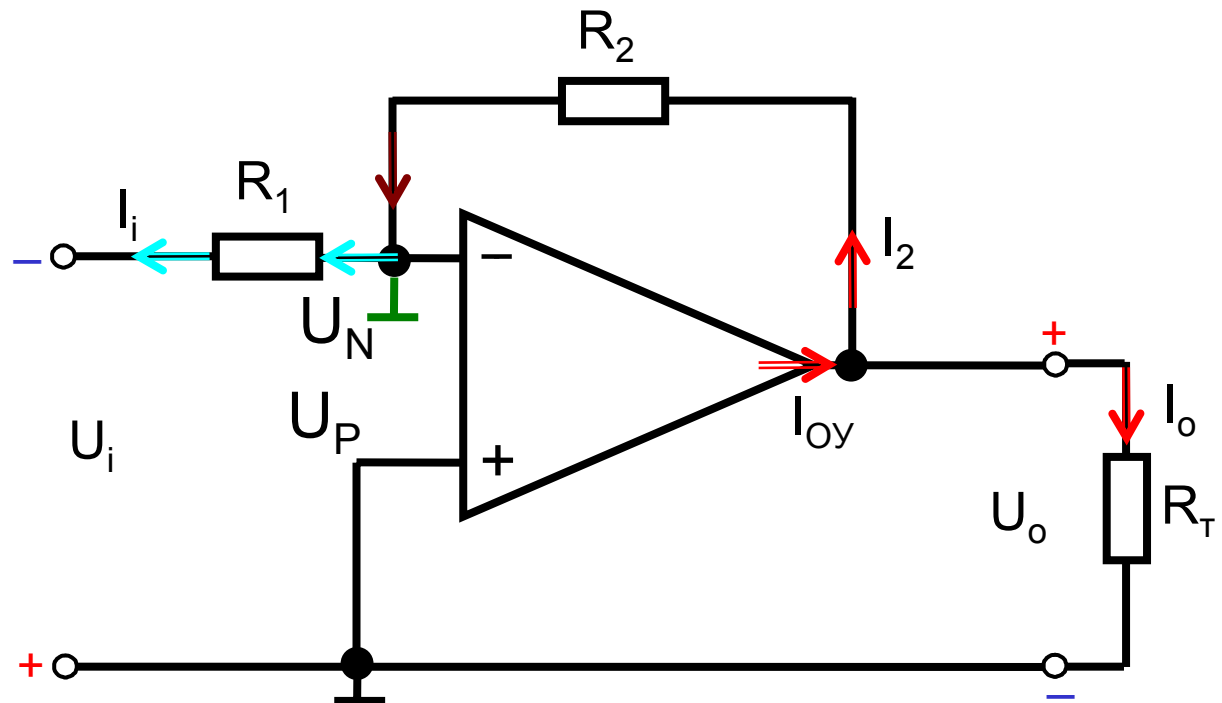
$$I_i = U_i / R_1 = 0,2 \text{ mA}$$

$$I_2 = U_o / R_2 = I_i$$

$$U_o = +4 \text{ V}$$

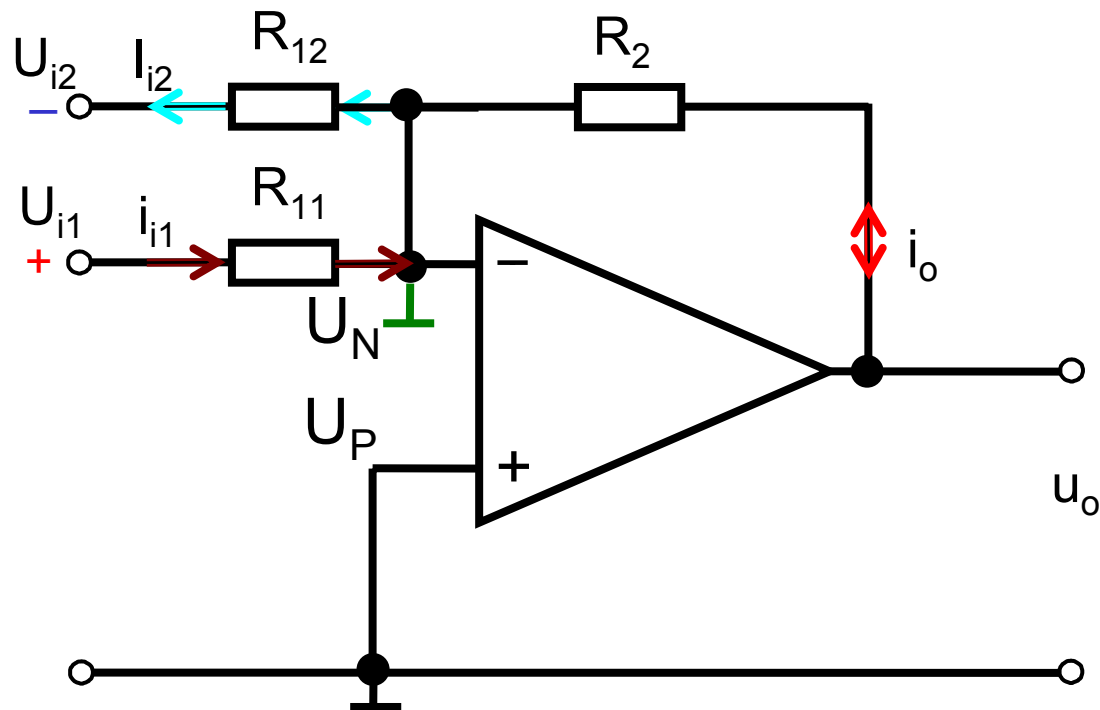
$$I_o = U_o / R_T = 2 \text{ mA}$$

$$I_{Oy} = I_2 + I_o = 2,2 \text{ mA}$$



# Сумиращ инвертиращ усилвател

$$\frac{U_o}{R_2} = - \left( \frac{+U_{i1}}{R_{11}} + \frac{-U_{i2}}{R_{12}} \right)$$



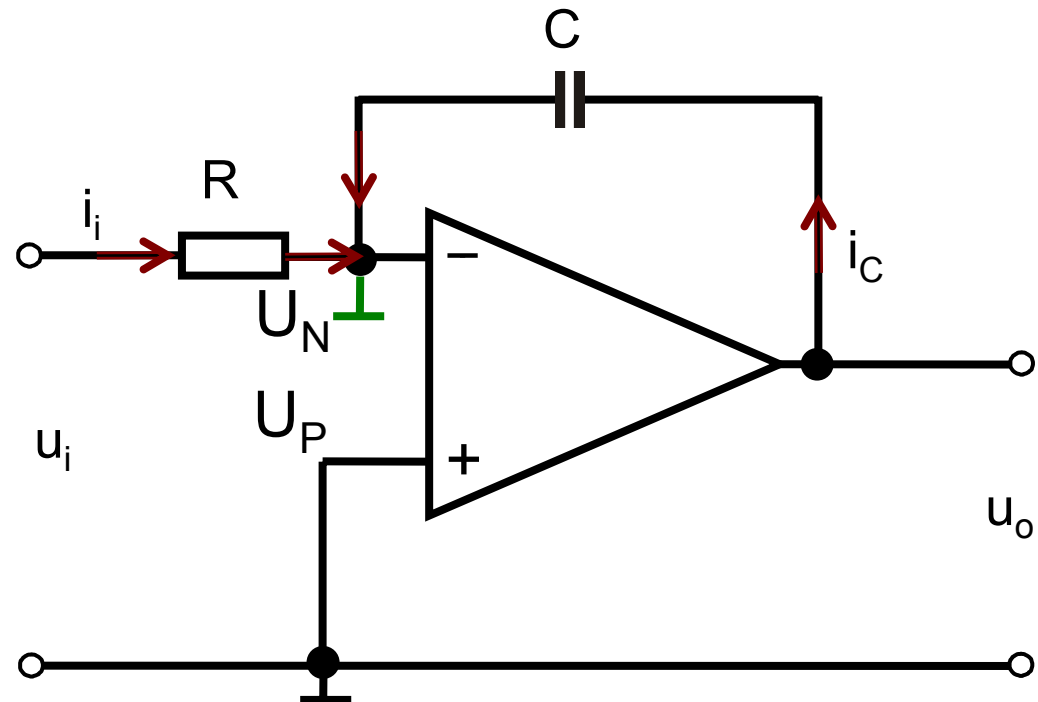
Посоката на  $i_o$  и полярността на  $u_o$  зависят от големината на двете входни напрежения

# Интегратор

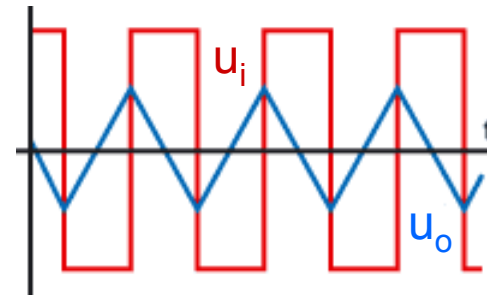
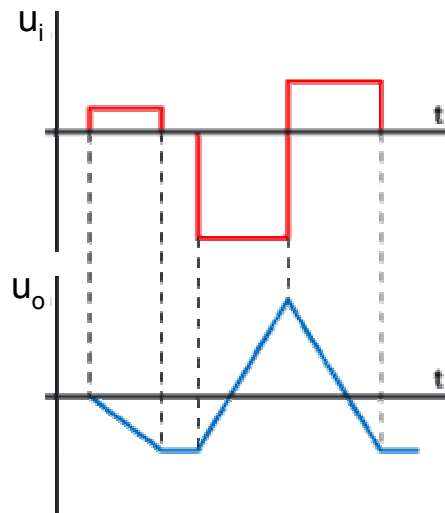
$$0 = \frac{u_i}{R} + i_C = \frac{u_i}{R} + C \frac{dU_o}{dt} \Rightarrow \frac{dU_o}{dt} = -\frac{u_i}{RC}$$

$$u_o = -\frac{1}{RC} \int u_i dt$$

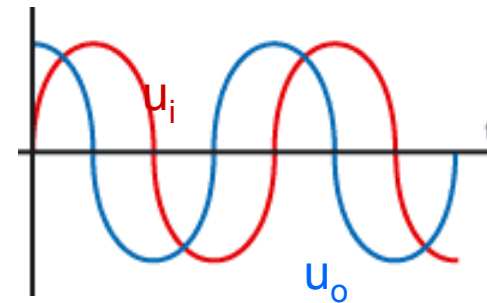
$$u_o = -\frac{u_i t}{RC}$$



# Интегратор



Правоъгълно  $\Rightarrow$  триъгълно



Синусоидално  $\Rightarrow$  косинусоидално

# Усилватели и Компаратори

- Основни параметри на усилватели
- Обратни връзки
- Операционни усилватели с ООВ
  - Инвертиращ
  - Неинвертиращ
  - Филтри
- Операционни усилватели без ОВ (Компаратори)
- Операционни усилватели с ПОВ

# Неинвертиращ усилвател

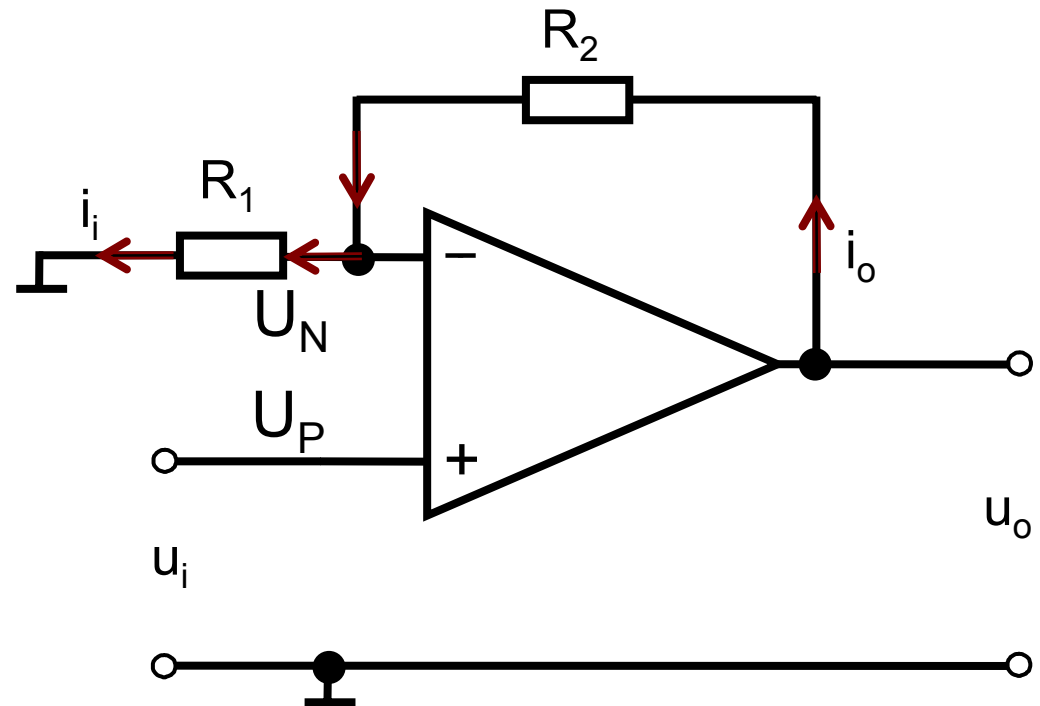
От  $U_{id} = 0$  следва  $U_N = U_P = u_i$

От  $I_{io} = 0$  следва  $I_i = I_o$

$$U_N = u_o \cdot R_1 / (R_1 + R_2) = u_i$$

$$K_u = u_o / u_i = (R_1 + R_2) / R_1$$

$$K_u = 1 + R_2 / R_1$$



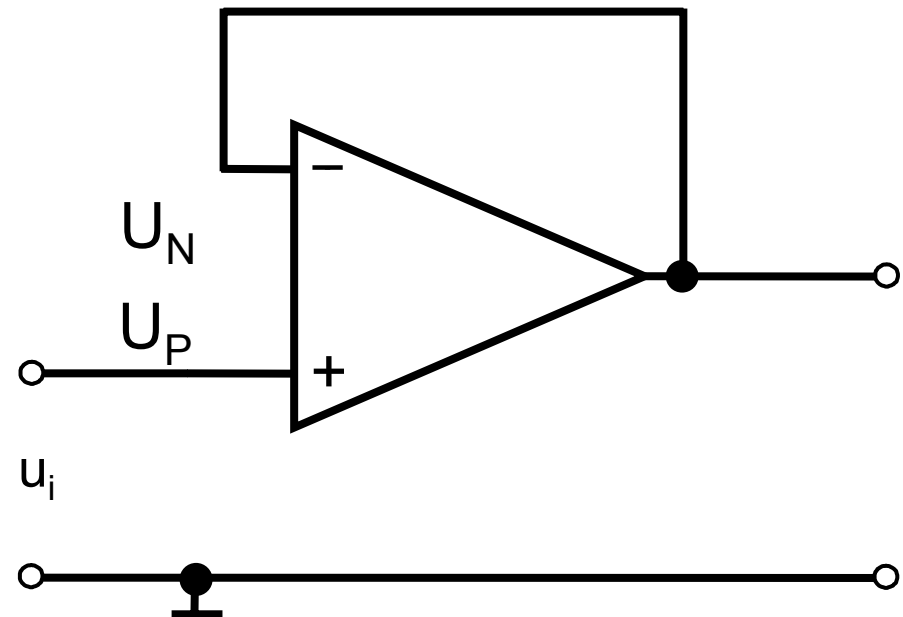
# Неинвертиращ усилвател

Този усилвател има извънредно високо входно съпротивление и ниско изходно съпротивление.

Използва се за съгласуване на усилватели с високо изходно съпротивление и нискоомен товар

Буферен усилвател

При  $R_1 = \infty$  и  $R_2 = 0 \Rightarrow K_u = 1$





# Диференциален усилвател

Изходното напрежение се определя на принципа на суперпозицията:

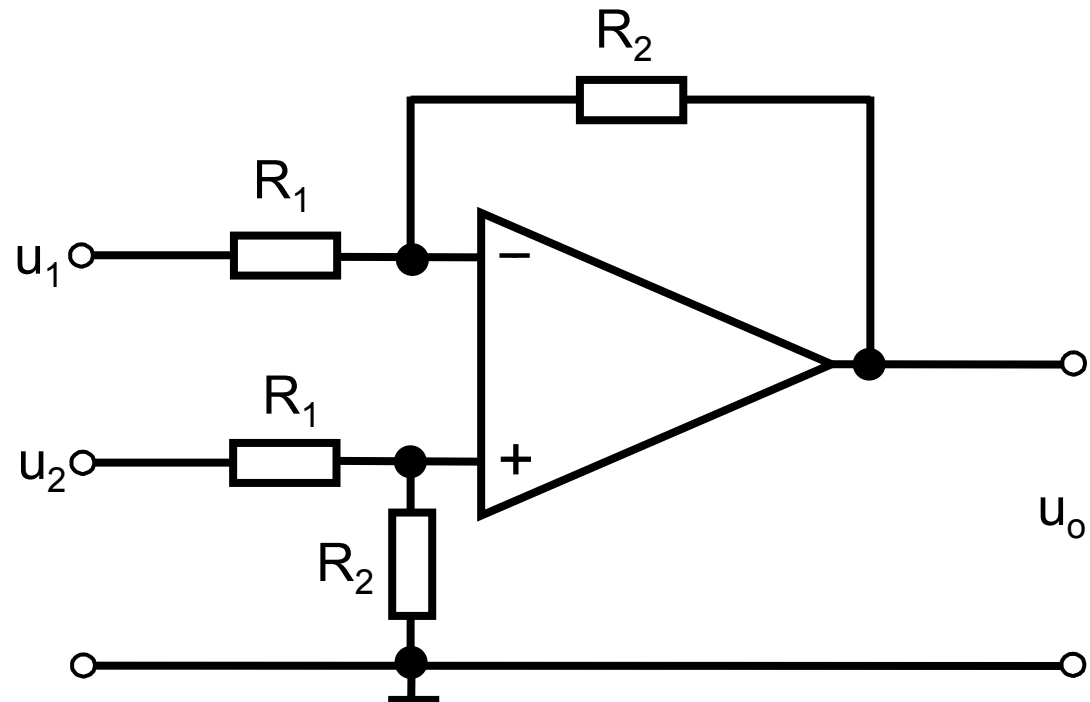
$$u_o = -\frac{R_2}{R_1} u_1$$

$$u_o = \underbrace{\frac{u_2 \cdot R_2}{R_1 + R_2}}_{\text{делител}} \cdot \underbrace{\left[1 + \frac{R_2}{R_1}\right]}_{K_u}$$

$$u_o = \frac{u_2 \cdot R_2 (R_1 + R_2)}{(R_1 + R_2) R_1} = \frac{R_2}{R_1} u_2$$

ИЛИ

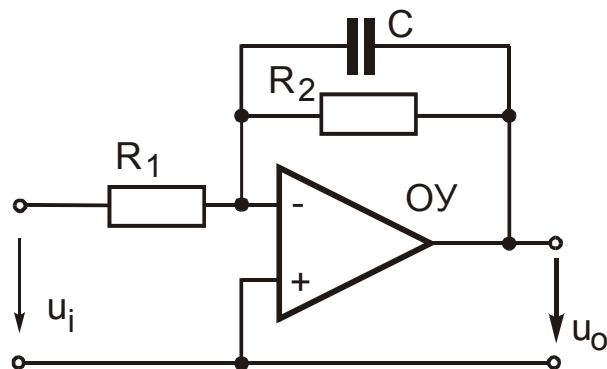
$$u_o = \frac{R_2}{R_1} (u_2 - u_1)$$



# Усилватели и Компаратори

- *Основни параметри на усилватели*
- *Обратни връзки*
- *Операционни усилватели с ООВ*
  - *Инвертиращ*
  - *Неинвертиращ*
  - **Филтри**
- Операционни усилватели без ОВ (Компаратори)
- Операционни усилватели с ПОВ

# Нискочестотен филтър



$$\begin{aligned}\dot{K}_u &= -\frac{\frac{1}{\frac{1}{R_2} + j\omega C}}{R_1} = \\ &= -\frac{R_2}{R_1} \cdot \frac{1}{(1 + j\omega CR_2)} = -\frac{R_2}{R_1} \cdot \frac{1}{\left(1 + j\frac{\omega}{\omega_g}\right)}\end{aligned}$$

При ниски честоти  $\omega \ll \omega_g$

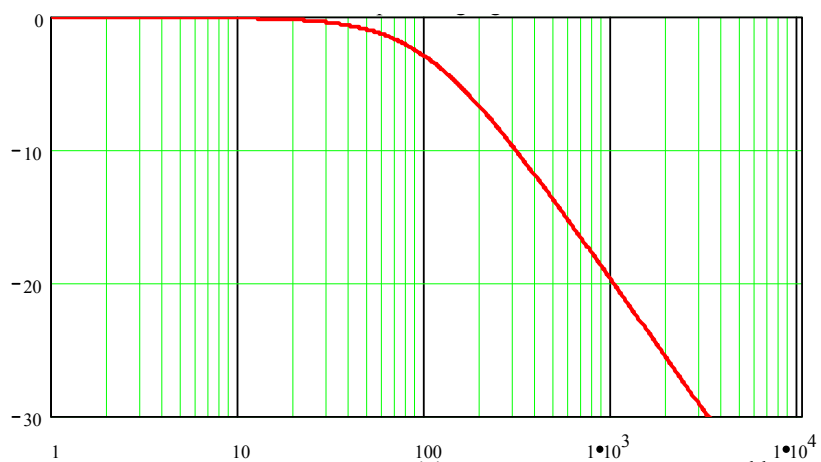
$$\dot{K}_u = -\frac{R_2}{R_1}$$

При високи честоти  $\omega \gg \omega_g$

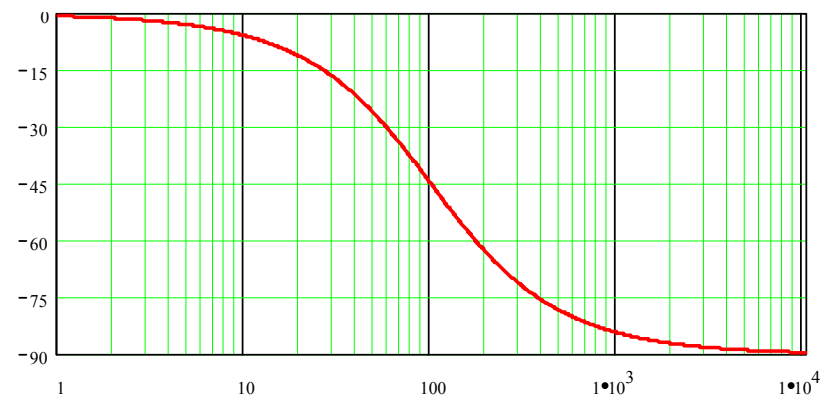
$$\dot{K}_u = -\frac{1}{j\omega CR_1}$$

# Нискочестотен филтър

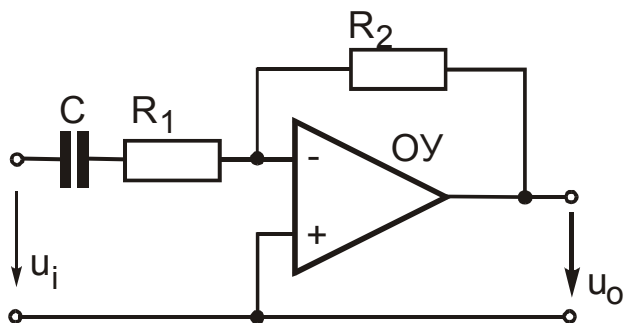
АЧХ



ФЧХ



# Високочестотен филтър



$$\begin{aligned}\dot{K}_u &= -\frac{R_2}{R_1 + \frac{1}{j\omega C}} = -\frac{R_2 \cdot j\omega C}{R_1 \cdot (1 + j\omega C \cdot R_1)} = \\ &= -\frac{R_2 \cdot j\omega / \omega_g}{R_1 \cdot (1 + j\omega / \omega_g)} \quad \omega_g = \frac{1}{C \cdot R_1}\end{aligned}$$

При ниски честоти  $\omega \ll \omega_g$

$$\dot{K}_u = -j\omega C R_2$$

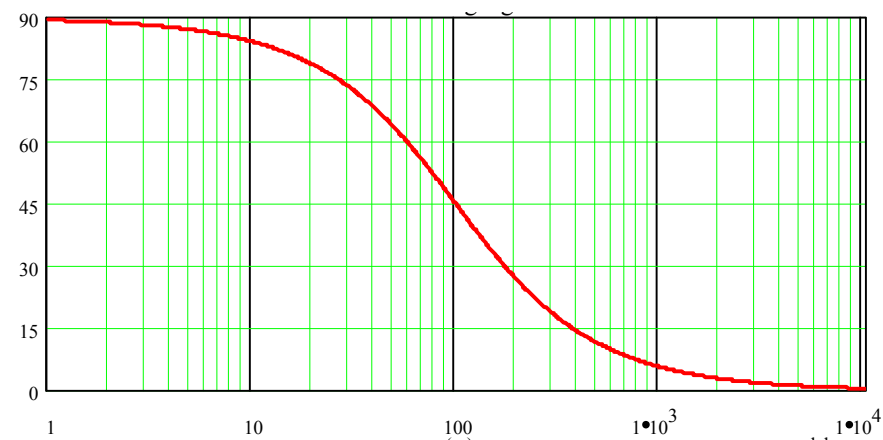
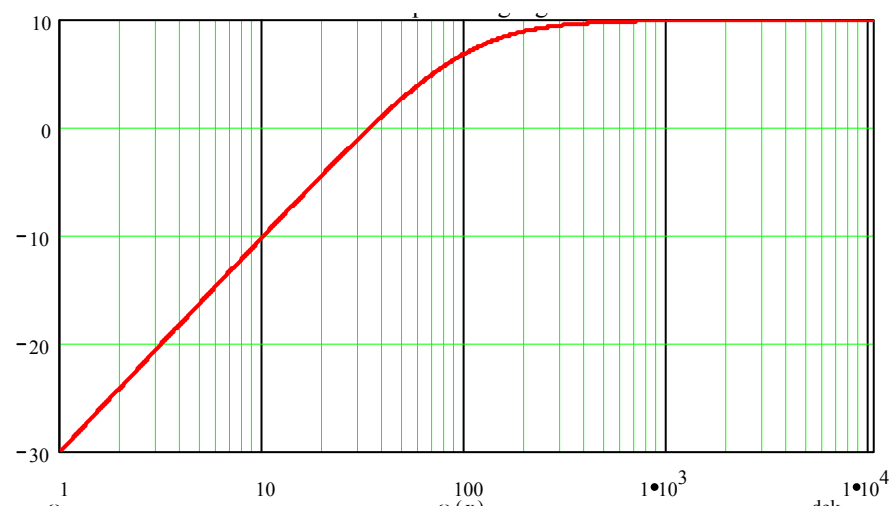
При високи честоти  $\omega \gg \omega_g$

$$\dot{K}_u = -\frac{R_2}{R_1}$$

# Високочестотен филтър

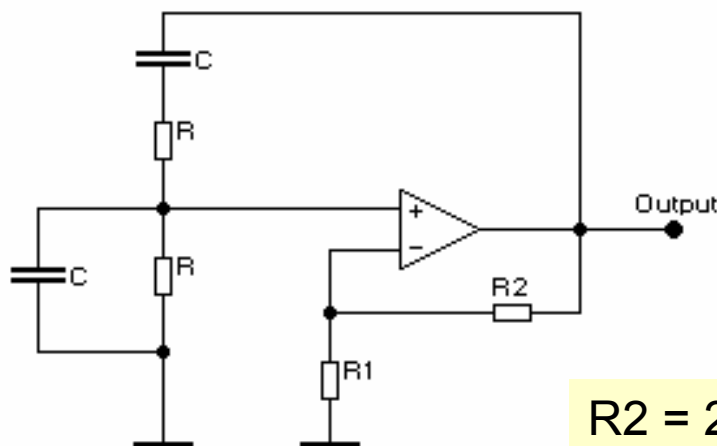
АЧХ

ФЧХ



# Синусоидален генератор

Инвертиращ усилвател + ПОВ с мост на Вин



$$f = \frac{1}{2\pi RC}$$

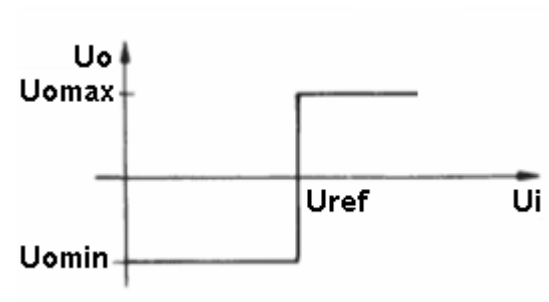
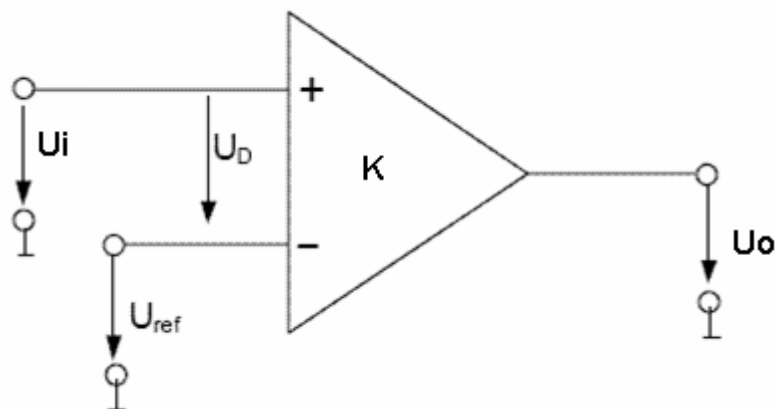
$R2 = 2R1$ , за да се получи  $Ku = 3$

# Усилватели и Компаратори

- Основни параметри на усилватели
- Обратни връзки
- Операционни усилватели с ООВ
  - Инвертиращ
  - Неинвертиращ
  - Филтри
- Операционни усилватели без ОВ (Компаратори)
- Операционни усилватели с ПОВ



# Компаратори



От особено значение са големината на:

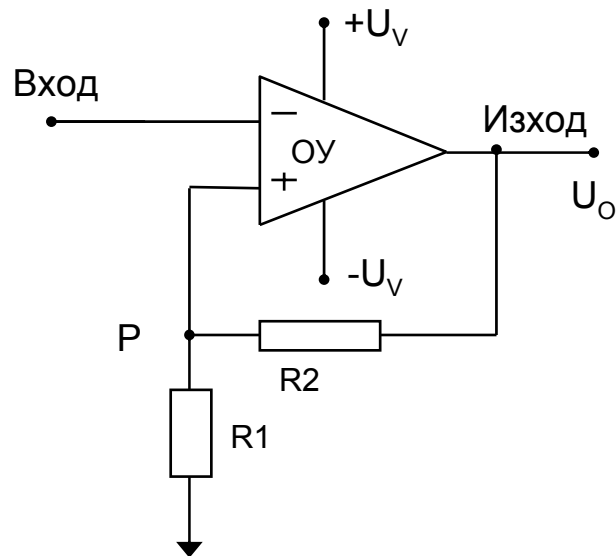
$K_{ud} \Rightarrow$  за да може да реагира на по-малки разлики между двете напрежения

$S/R \Rightarrow$  за да се намали времето за преминаване от едното в другото състояние

# Усилватели и Компаратори

- ❑ Основни параметри на усилватели
- ❑ Обратни връзки
- ❑ Операционни усилватели с ООВ
  - Инвертиращ
  - Неинвертиращ
  - Филтри
- ❑ Операционни усилватели без ОВ (Компаратори)
- ❑ **Операционни усилватели с ПОВ**

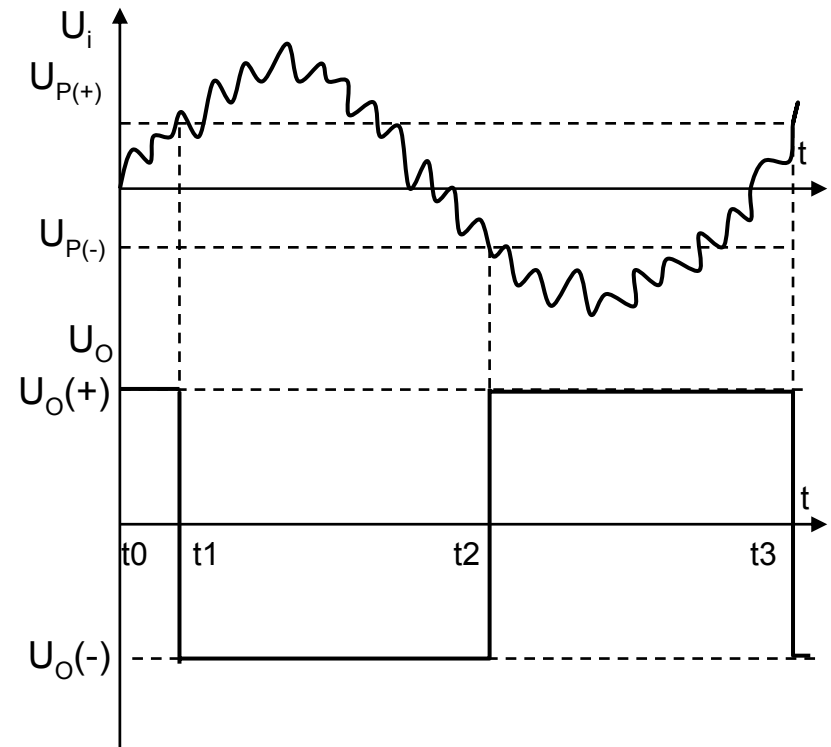
# Шмит триггер (Schmitt-Trigger)



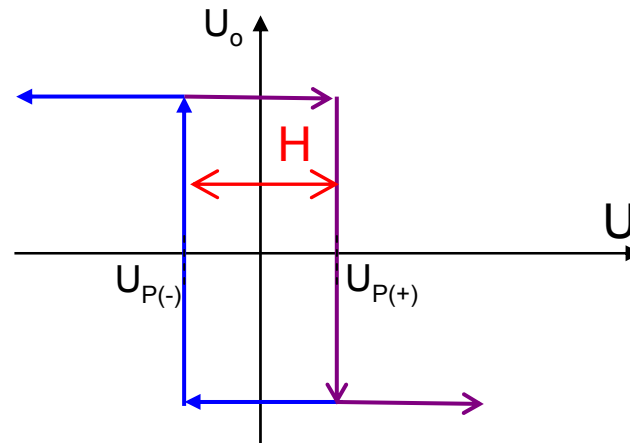
$$U_{P(+)} = U_{O(+)} \cdot R1 / (R1 + R2)$$

$$U_{P(-)} = U_{O(-)} \cdot R1 / (R1 + R2)$$

$$H = U_{P(+)} - U_{P(-)} = (U_{O(+)} - U_{O(-)}) \cdot R1 / (R1 + R2)$$

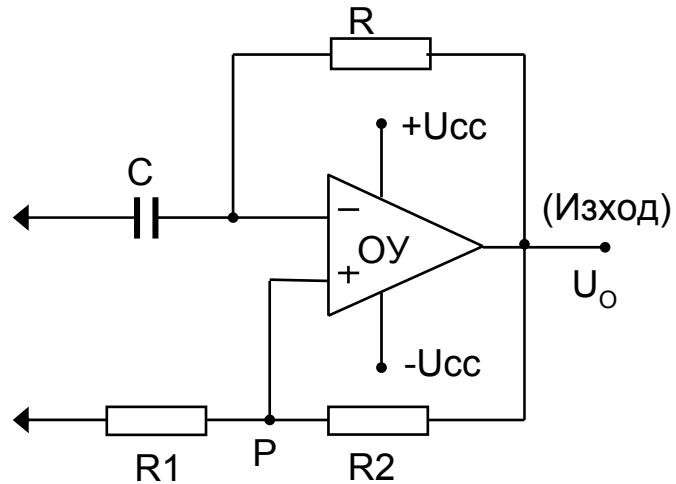


# Schmitt-Trigger

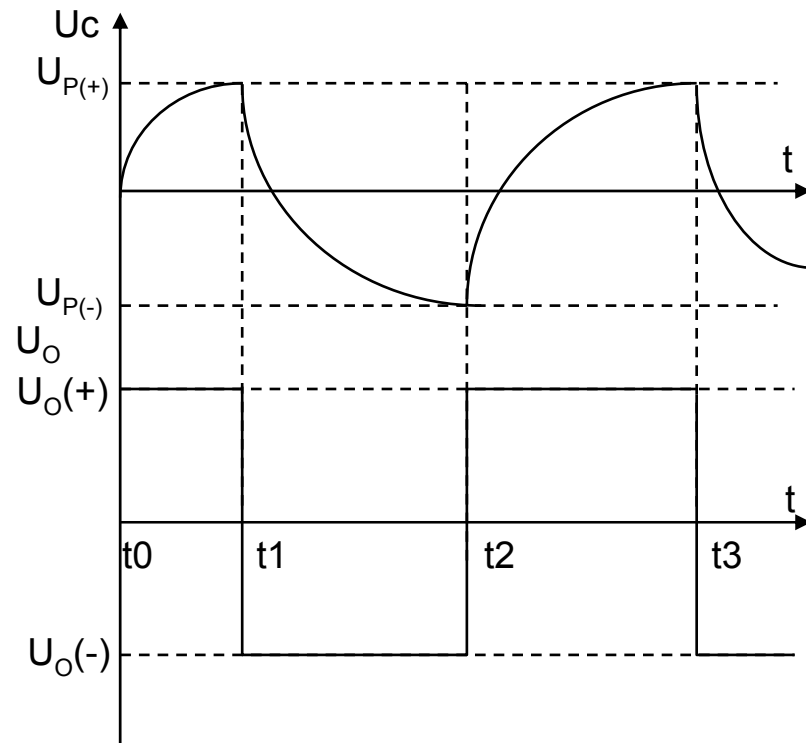


Предавателна характеристика

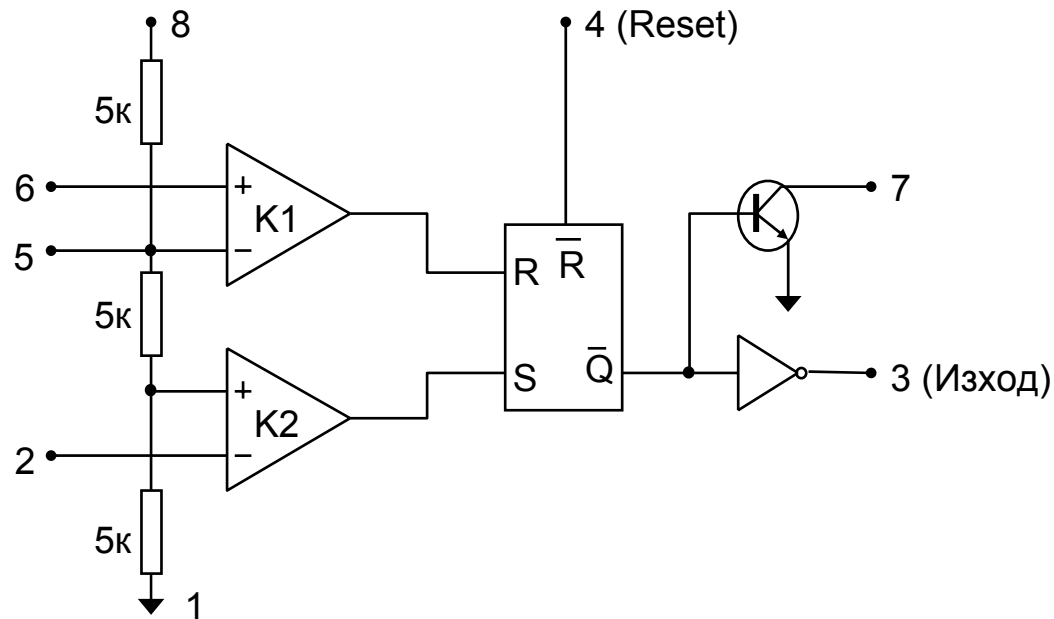
# Мултивибратор



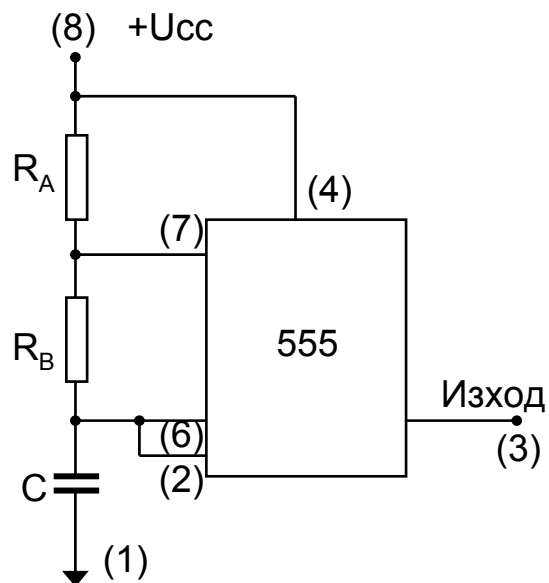
$$T = 2RC \cdot \ln(1 + 2R_1 / R_2)$$



# Прецизен Schmitt-Trigger (Timer 555)



# Мултивибратор с timer 555



$$t_2 = R_B \cdot C \cdot \ln 2$$

$$t_1 = (R_A + R_B) \cdot C \cdot \ln 2$$

$$T = (R_A + 2R_B) \cdot C \cdot \ln 2$$

