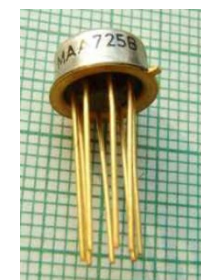
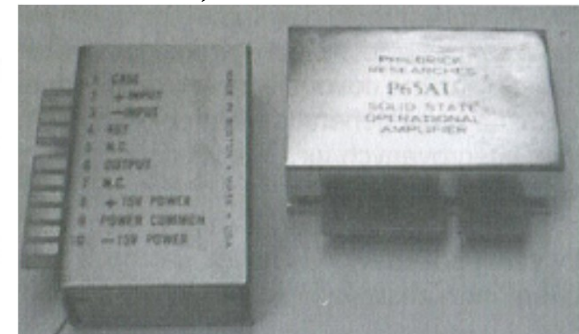
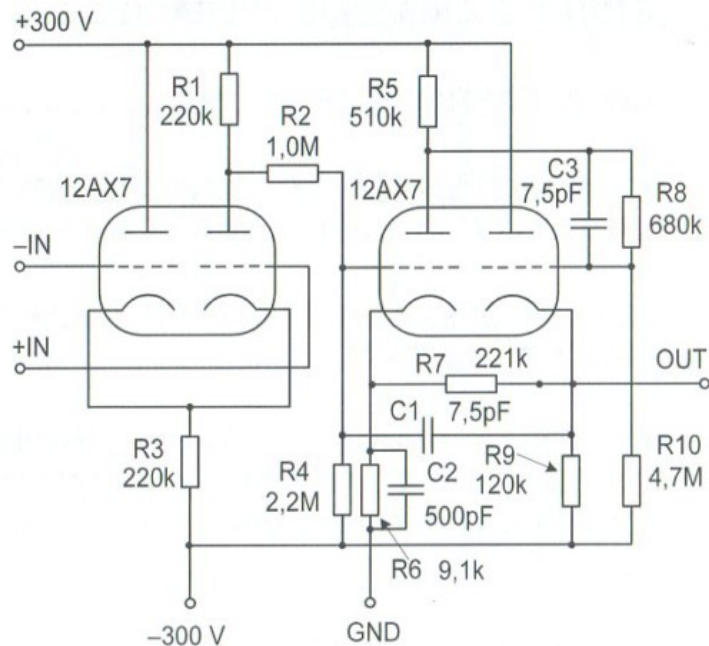


Operační zesilovače

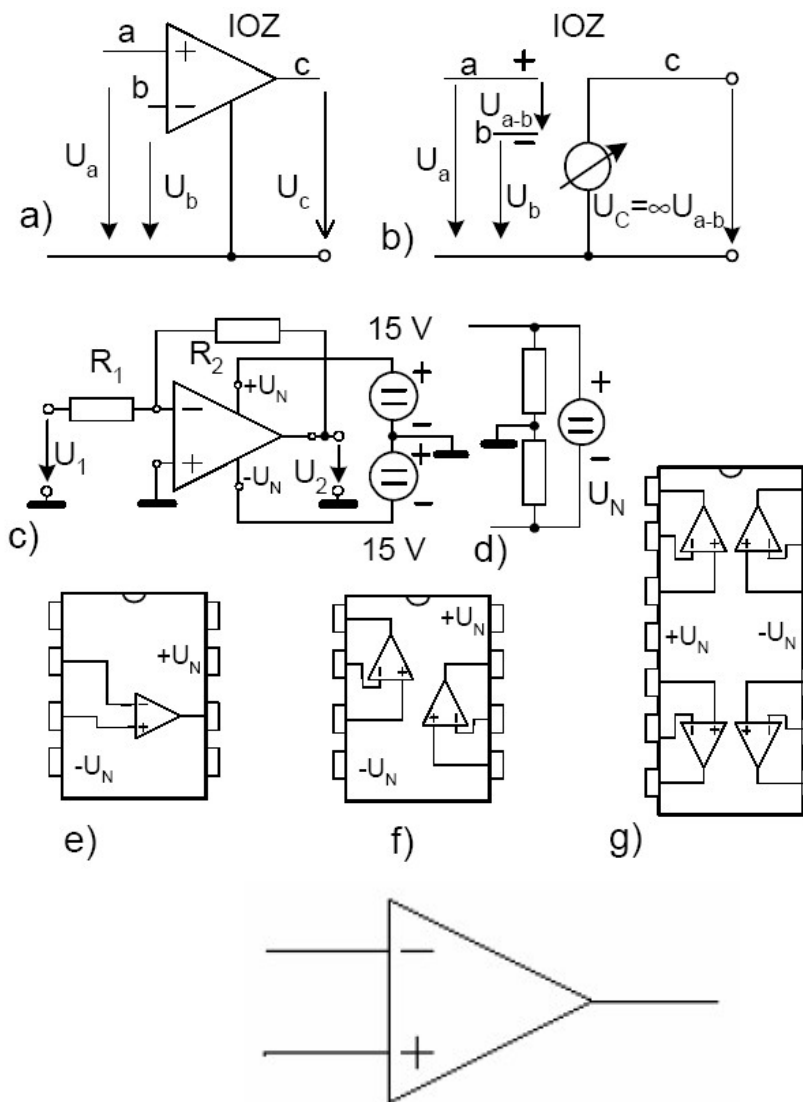
- Jednoduché celky pro modelování základních analog. funkcí (sumace, difference, integrál, derivace apod.).
- Historie jejich vzniku se obvykle datuje od roku 1947 a je spjatá s vývojem analogových počítačů (elektronky, tranzistory)
- OZ nejpoužívanější skupinou zesilovačů (kolem 95%).



OZ

- analog. počítače –konec
- OZ (rel.předimenzované)
ekonomičtější použít než jedno či
vícestupňové diskrétně realizované
tranzistorové zesilovače v běžných
aplikacích
- Pro praxi je výhodná i zvyšující se
kvalita, univerzálnost a jednoduché
použití.

- invertující vstup
- + neinvertující vstup
- OUT výstup OZ
- + U_N kladné napájecí napětí
- U_N záporné napájecí napětí

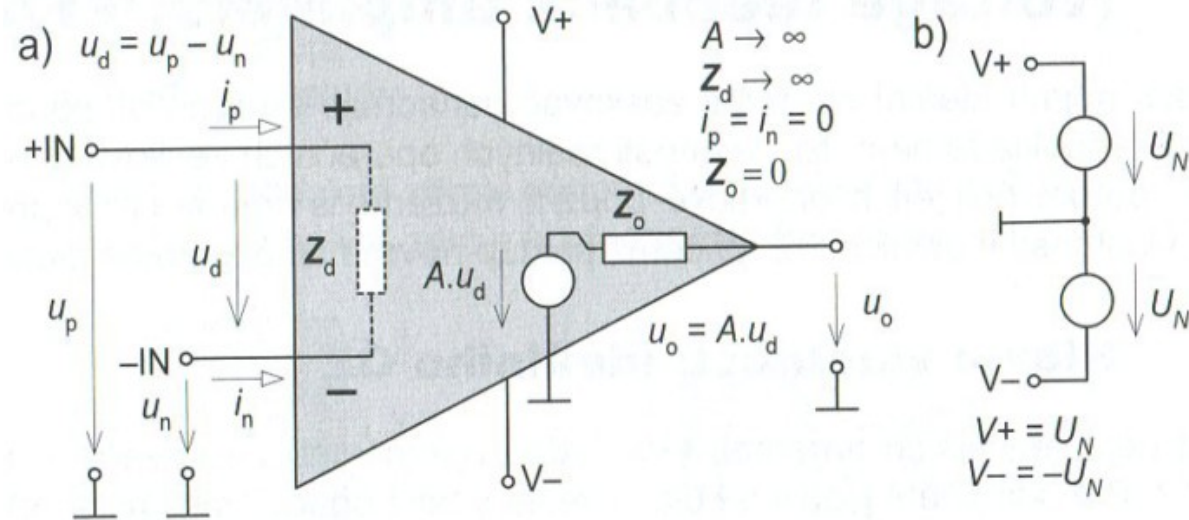


Ideální OZ

Ideální operační zesilovač		Reálný operační zesilovač	
$A_u \rightarrow \infty$	napětové zesílení je nekonečně velké	A_u	napětové zesílení má konečnou hodnot, např. 10^5
$R_d \rightarrow \infty$	vstupní diferenční odpor je nekonečně velký	R_d	vstupní diferenční odpor má konečnou velikost
$R_o = 0$	výstupní odpor je nulový	R_o	výstupní odpor $R_o > 0$
$B \rightarrow \infty$	šířka kmitočtového pásma je neomezená	B	šířka pásma je omezená, je nutné s omezením počítat
$CMRR \rightarrow \infty$	potlačení souhlasného signálu je nekonečně velké	$CMRR \rightarrow \infty$	potlačení souhlasného signálu má konečnou velikost, např. 100 dB
$i_n = i_p = 0$	vstupní proudy jsou stejně velké a mají nulovou hodnotu	$i_n \neq i_p \neq 0$	vstupní proudy nejsou stejné a mají určitou velikost

Není-li OZ provozován na vysokých kmitočtech a nemá-li nastaveno velké zesílení → použití jednoduchého modelu. (Model je díky poskytování přesných výsledků v praxi hojně využíván.)

OZ



u_p napětí signálu na neinvertujícím vstupu

u_n napětí signálu na invertujícím vstupu

u_d rozdílový (diferenční) vstupní signál

u_o výstupní signál $u_o = A \cdot u_d$

A napěťové zesílení OZ

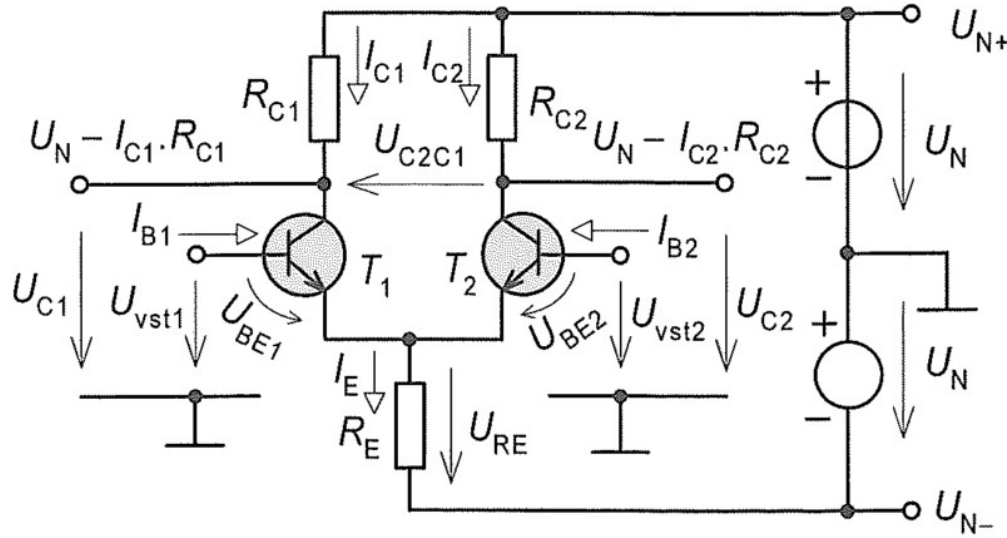
Z_d vstupní impedance

Z_o výstupní impedance

R_o výstupní odpor

R_d vstupní diferenční odpor

Diferenční zesilovač



V pracovní bodě, při $U_{vst1} = U_{vst2}$

$$U_{C2C1} = U_{C2} - U_{C1} = 0$$

$$T_1 = T_2 \quad U_{RC1} = U_{CE1}$$

$$U_{BE1} = U_{BE2} \quad U_{RC2} = U_{CE2}$$

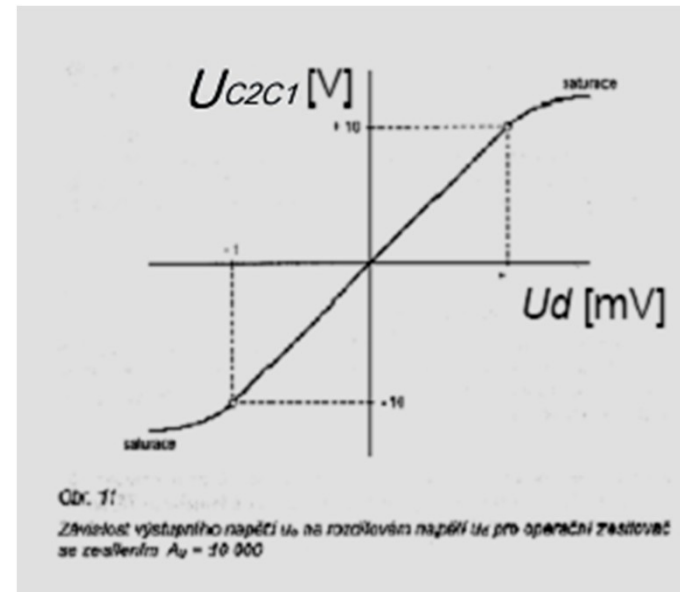
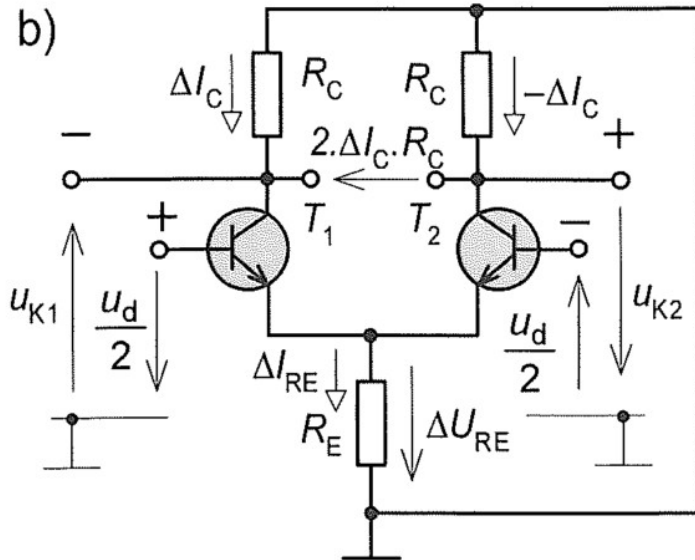
$$I_{B1} = I_{B2} \quad U_{CE1} = U_{CE2}$$

$$I_{C1} = I_{C2} = I_C \quad U_{C1} = U_{C2}$$

$$I_E \approx I_{C1} + I_{C2} = 2I_C$$

$$U_{RE} = R_E \cdot I_E = R_E \cdot 2 \cdot I_C$$

Převodní charakteristika

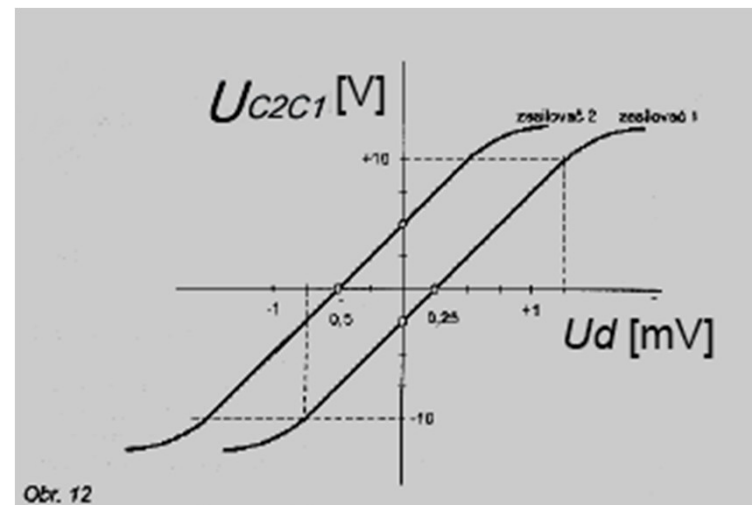


Činitel potlačení souhlasného signálu

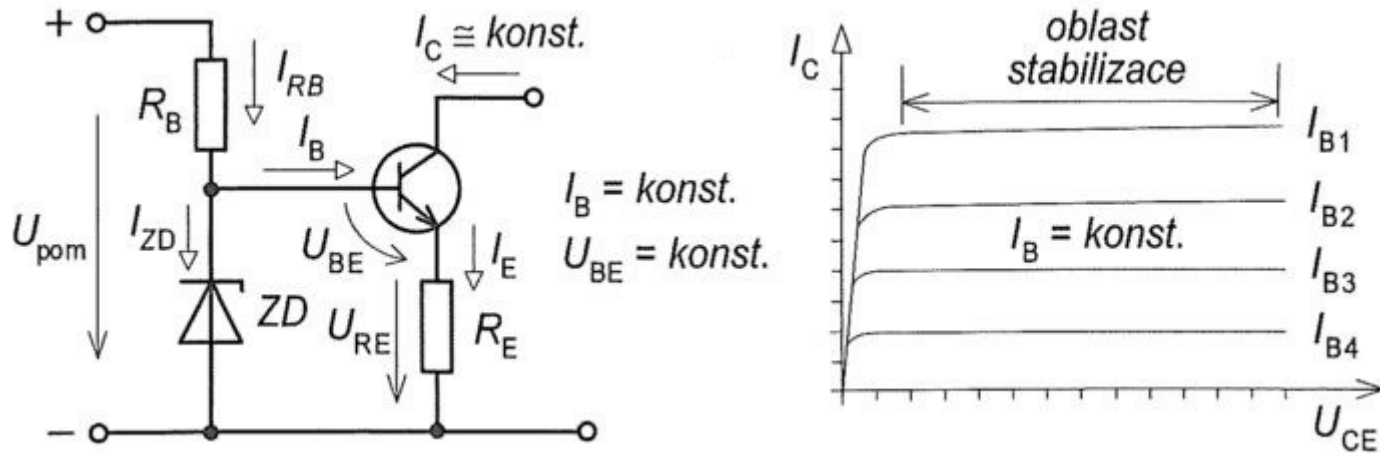
$$CMMR = \left| \frac{A_d}{A_s} \right| \quad \begin{array}{l} A_d \text{ zesílení diferenčního signálu} \\ A_s \text{ zesílení souhlasného signálu} \end{array}$$

$$CMR = 20 \cdot \log \left| \frac{A_d}{A_s} \right| \quad \text{častější vyjádření v dB}$$

- ***Vst. napěťová nesymetrie - vst. offsetové napětí***
nepřesné spárování tranzistorů, odchylky hodnota odporů atp.
velikost napětí přivedeného na vstup DZ k dosažení 0V na výstupu
- ***Vst. proudová nesymetrie - vst. offsetový proud***
rozdílnost proudu do vstupních svorek zesilovače při $U_d = 0V$



Zdroj konstantního proudu



$$I_{RB} = I_{ZD} + I_B = \frac{U_{pom} - U_{ZD}}{R_B}$$

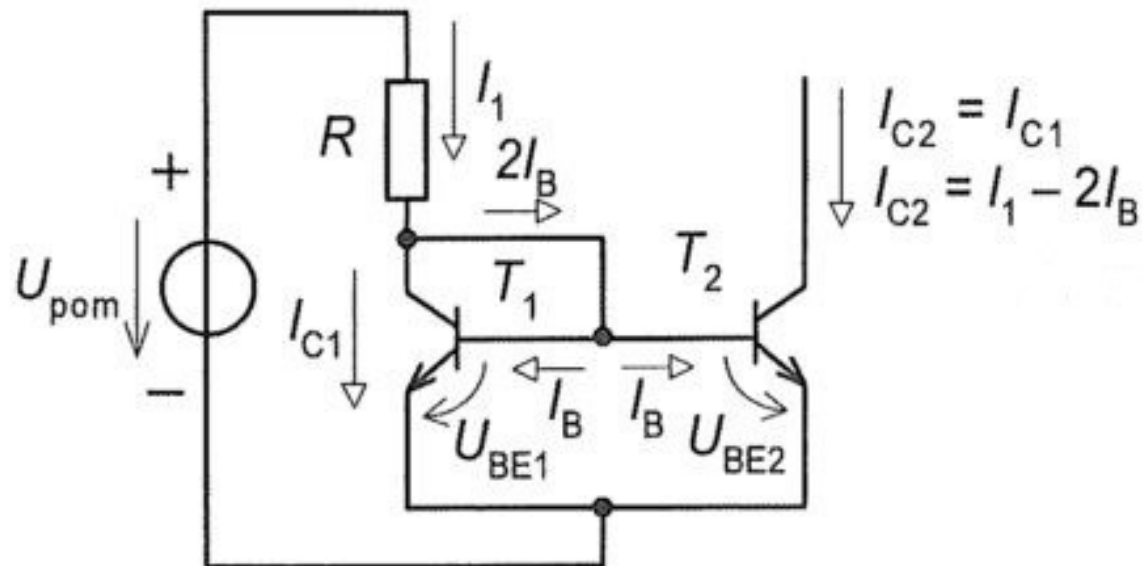
za předpokladu, že U_{ZD} a U_{BE} jsou konstantní \rightarrow

$$U_{ZD} = U_{BE} + U_{RE} \Rightarrow I_C \cong I_E = \frac{U_{ZD} - U_{BE}}{R_E}$$

Nevýhody:

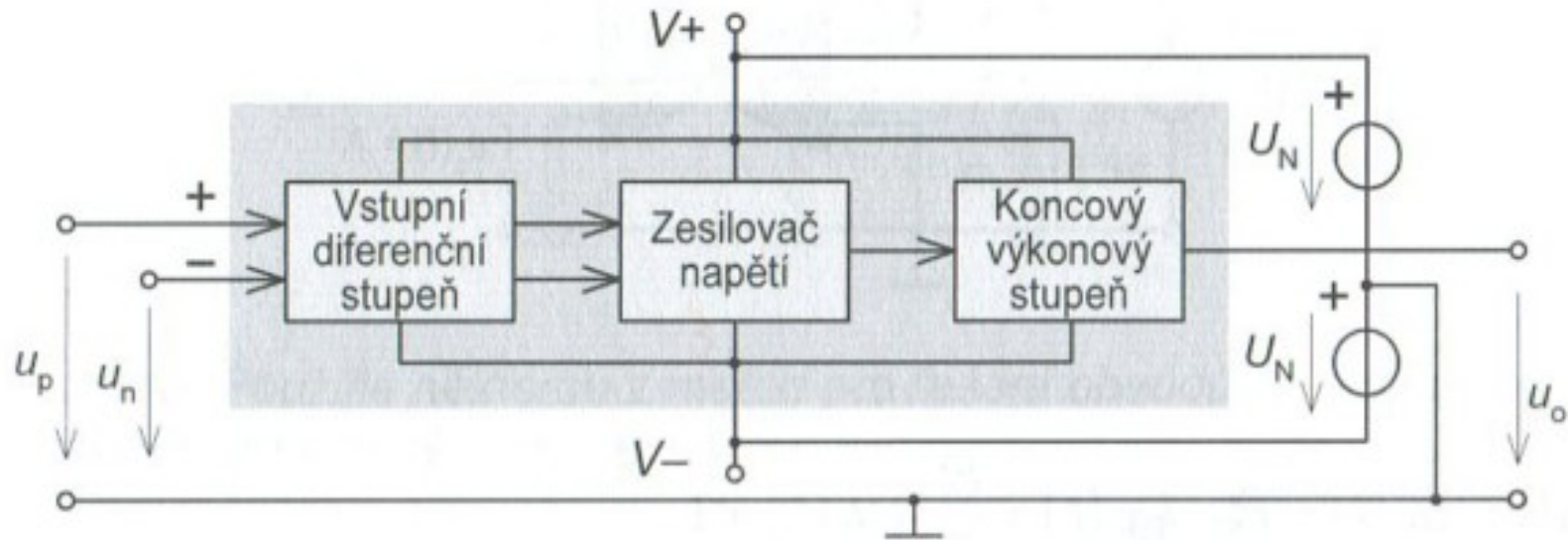
- kolísání U_{ZD} vlivem teploty a změny U_{pom}
- kolísání U_{BE} zejména vlivem teploty tranzistoru

Proudové zrcadlo



Proud protékající tranzistorem je zrcadlen do dalších připojených tranzistorů. Mají-li tranzistory velkou hodnotu zesilovacího činitele β , je zrcadlení téměř přesné.

Blokové zapojení OZ

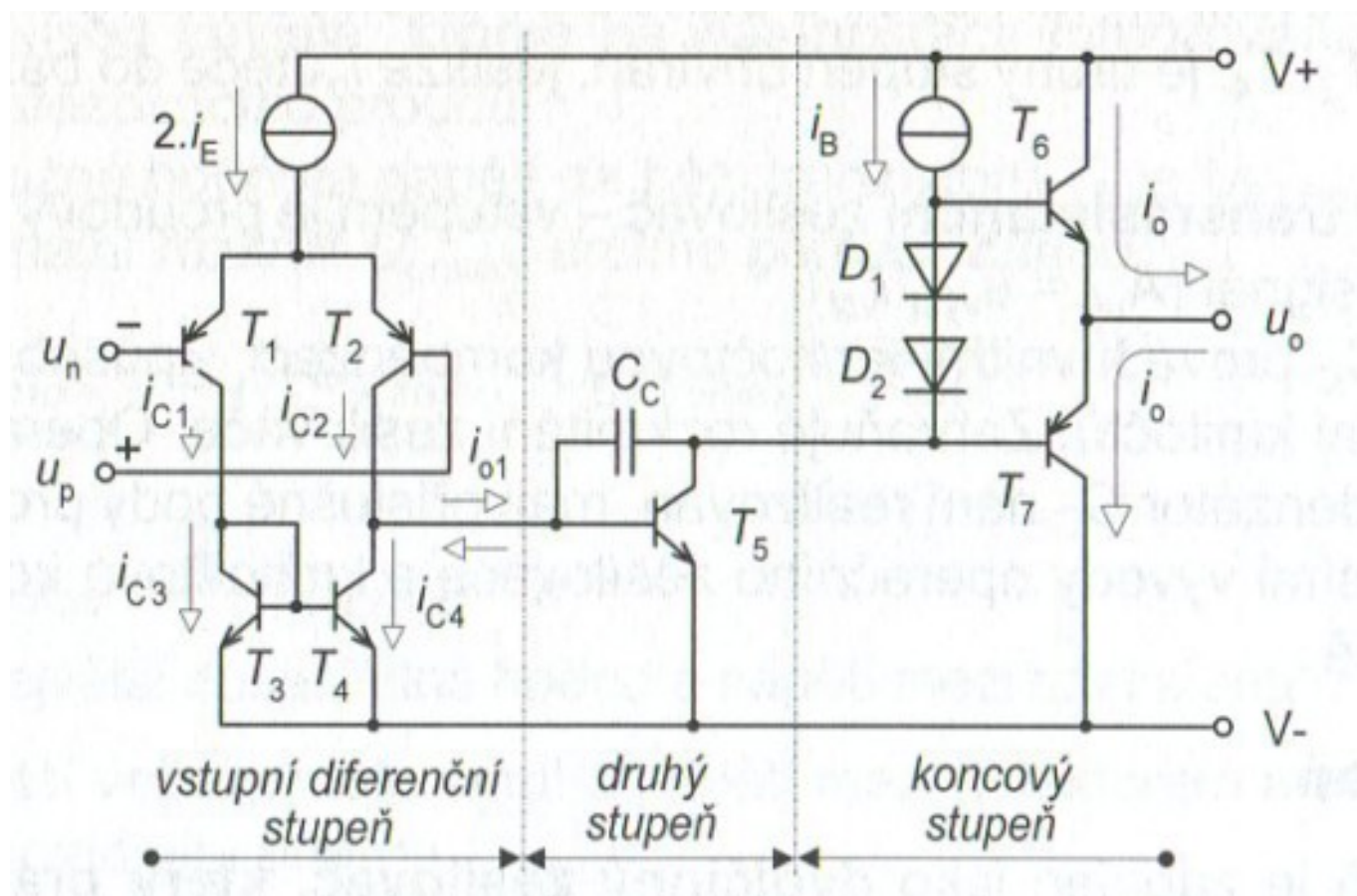


- Diferenční stupeň

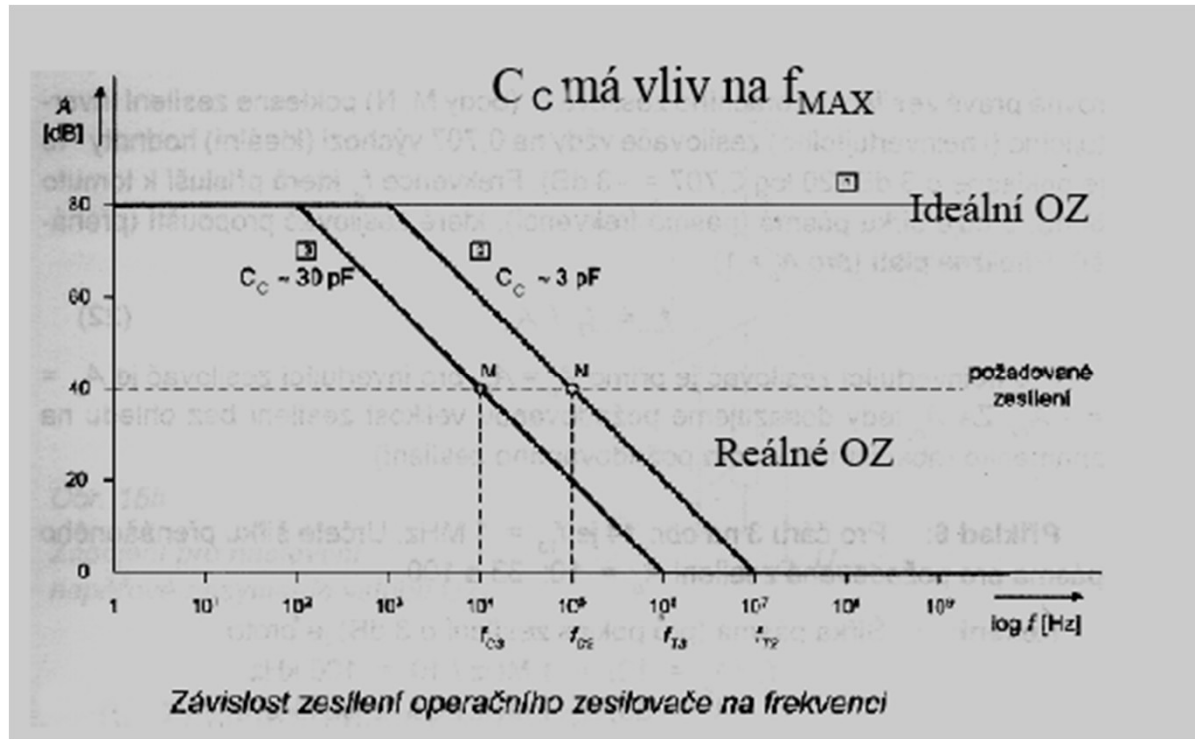
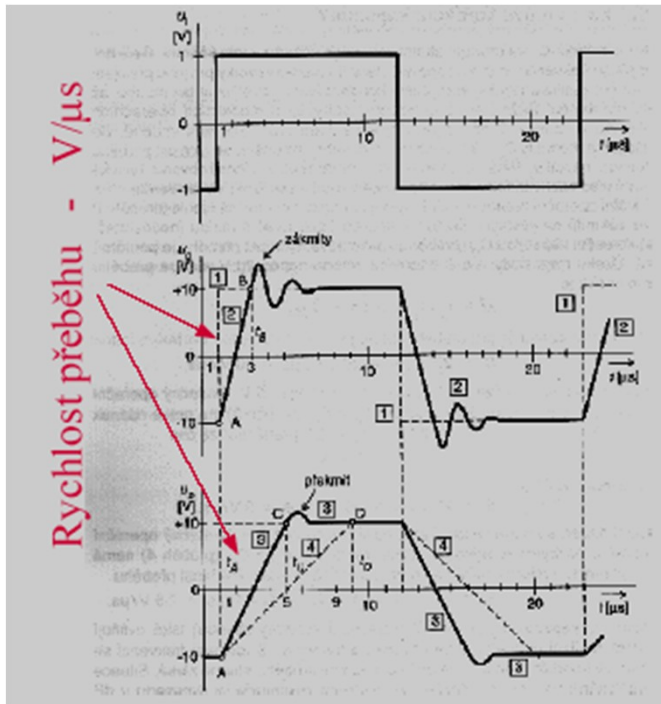
$$u_d = u_p - u_n$$

- Zesilovač napětí
provádí kmitočtovou kompenzaci, převádí proudový vstupní signál na napěťový výstup $A_{u/i} = u_{\text{výst}} / i_{\text{vst}}$
- Koncový stupeň
ve třídě AB, zapojení SC, tj. proudový zesilovač

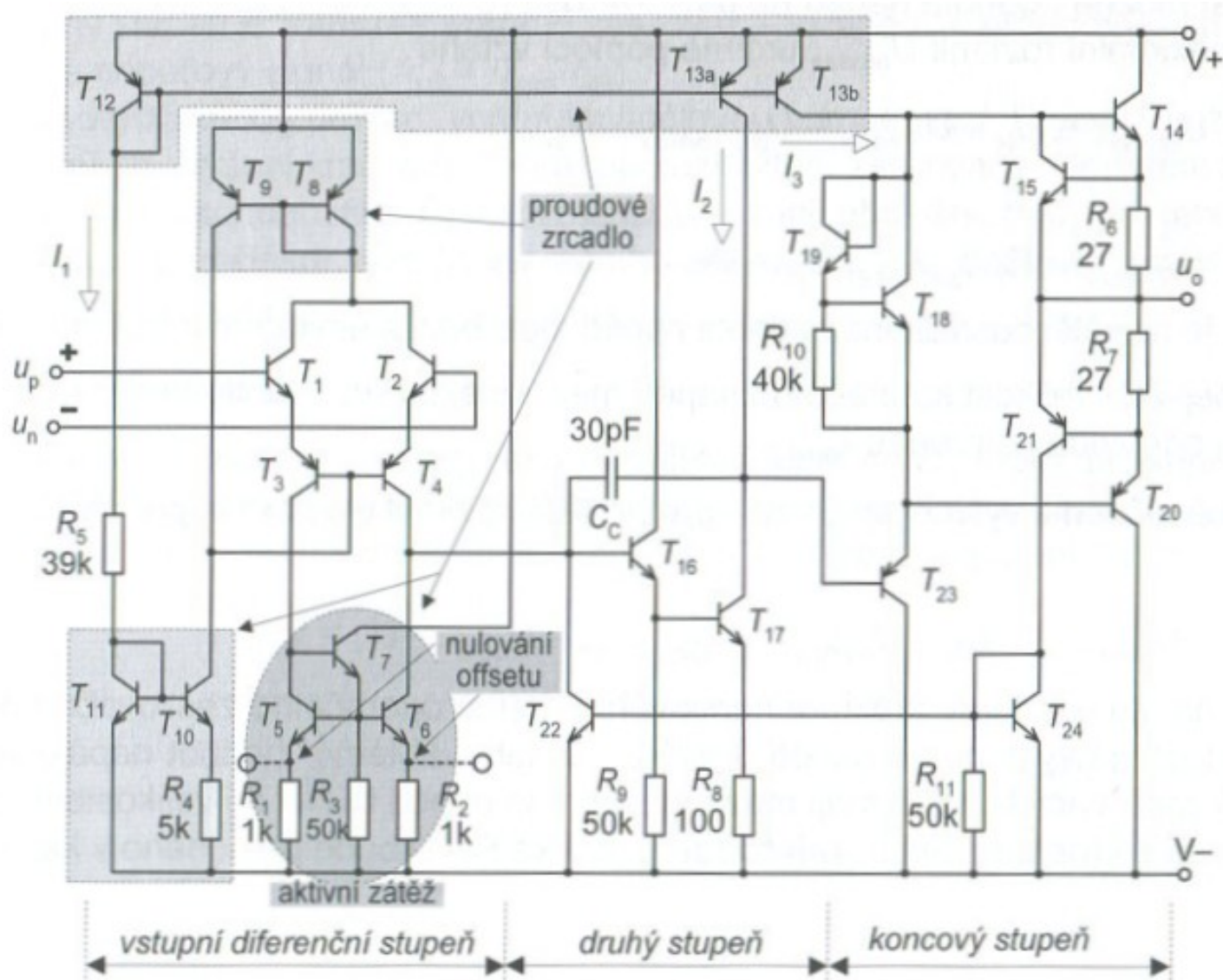
Zjednodušené zapojení OZ



OZ vliv frekvence

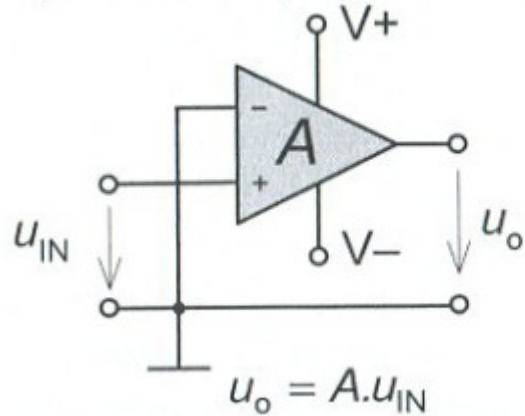


Reálný OZ (LM741)

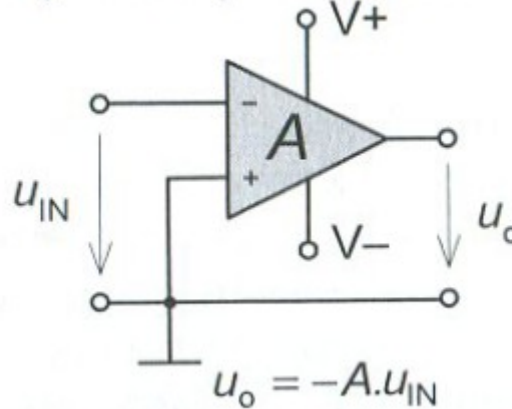


Základní zapojení OZ

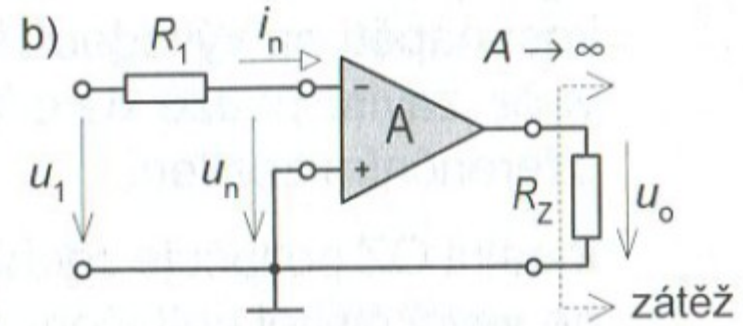
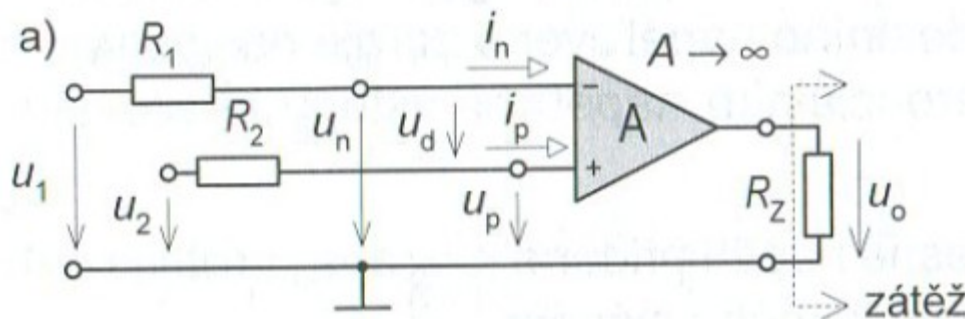
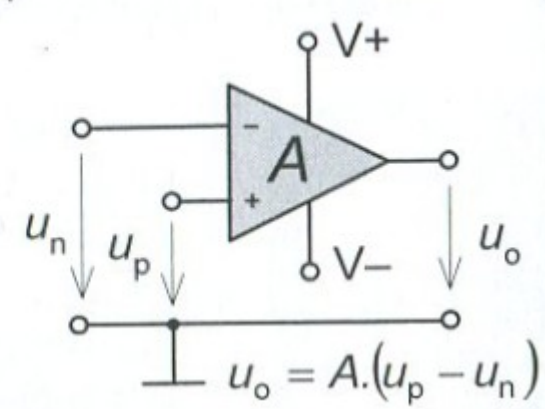
a) Neinvertující zesilovač



b) Invertující zesilovač



c) Diferenční zesilovač



$$i_n = i_p = 0 \Rightarrow u_{R1} = R_1 \cdot i_n = u_{R2} = R_2 \cdot i_n = 0$$

$$i_n = 0 \Rightarrow u_{R1} = R_1 \cdot i_n = 0$$

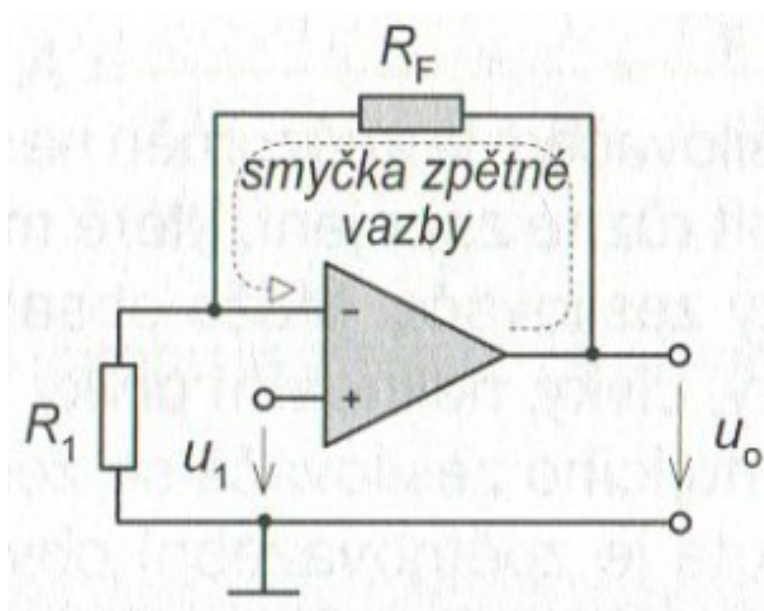
$$u_2 - u_1 = u_p - u_n = u_d = \frac{u_o}{A} \quad u_o = u_d \cdot A \quad u_n = u_1 = \frac{u_o}{A} \quad u_o = u_n \cdot A = u_1 \cdot A$$

R_1, R_2 – vnitřní odpory zdroje signálu

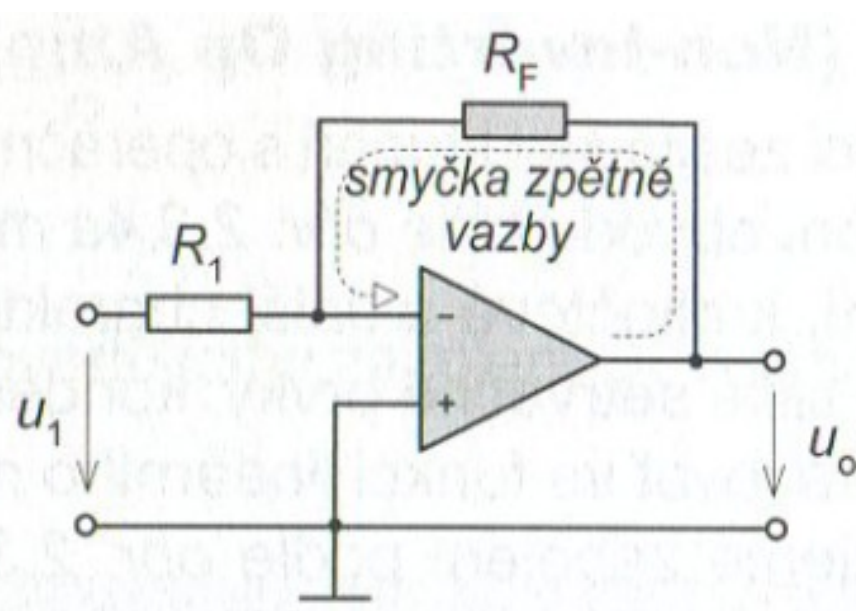
$$u_o = (u_p - u_n) \cdot A = (u_2 - u_1) \cdot A$$

Základní typy zapojení OZ

Zavedení záporné zpětné vazby (ZZV) – změna zesílení

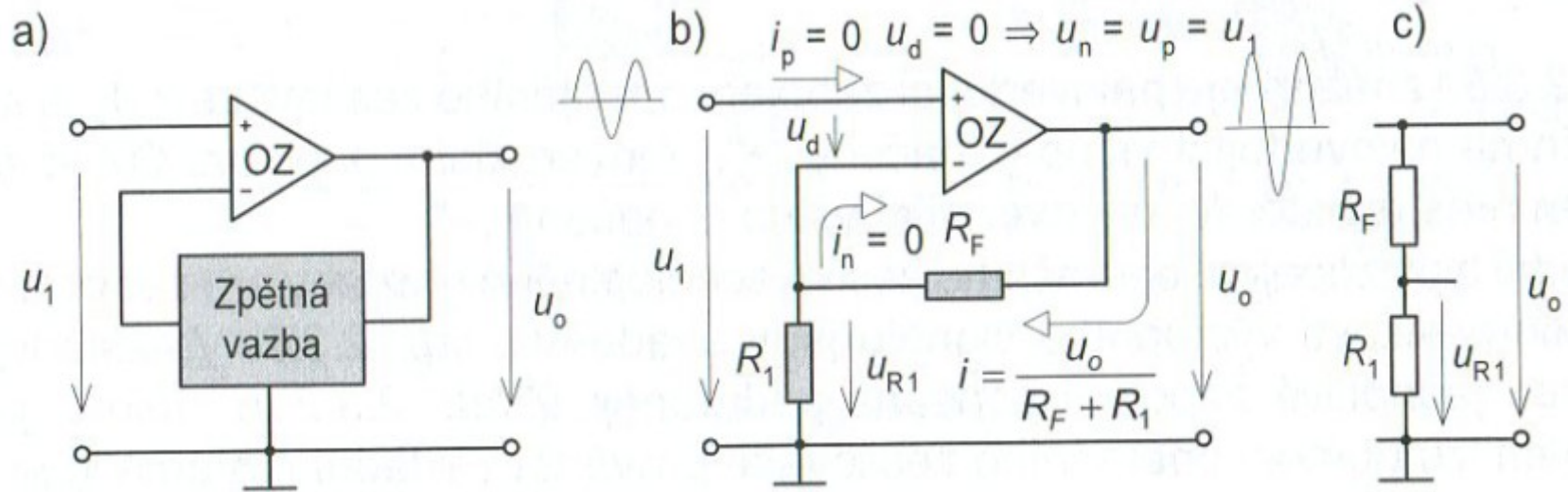


neinvertující zapojení



invertující zapojení

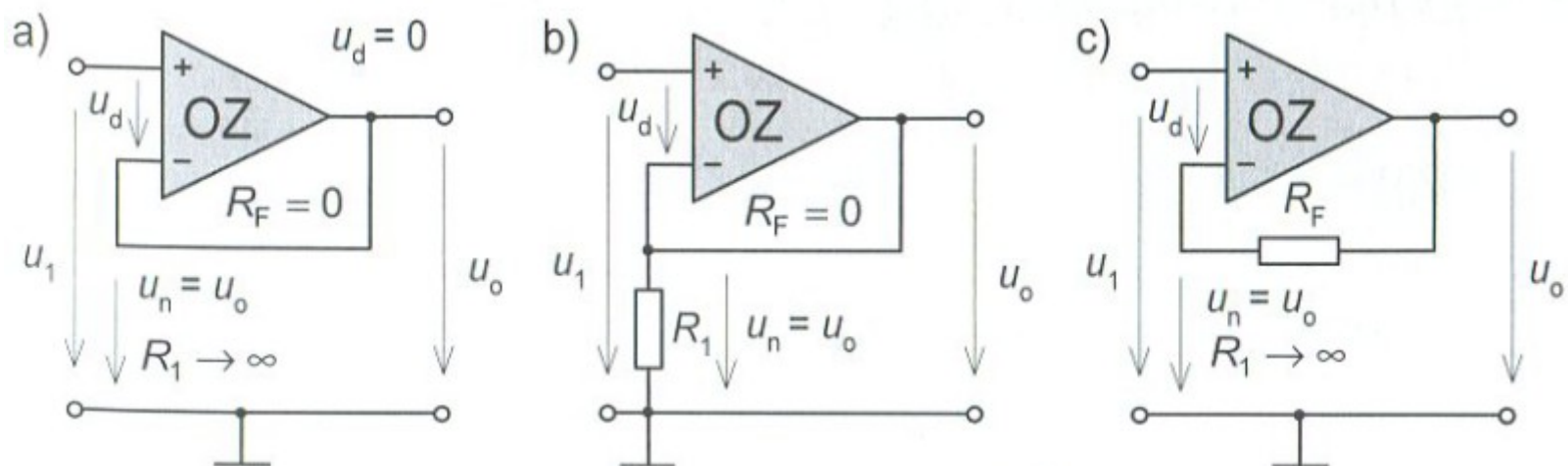
Neinvertující zapojení OZ



$$u_{R1} = u_n = \frac{u_o}{R_F + R_1} \cdot R_1 = u_1$$

$$A = \frac{u_o}{u_1} = \frac{R_F}{R_1} + 1$$

Sledovač signálu

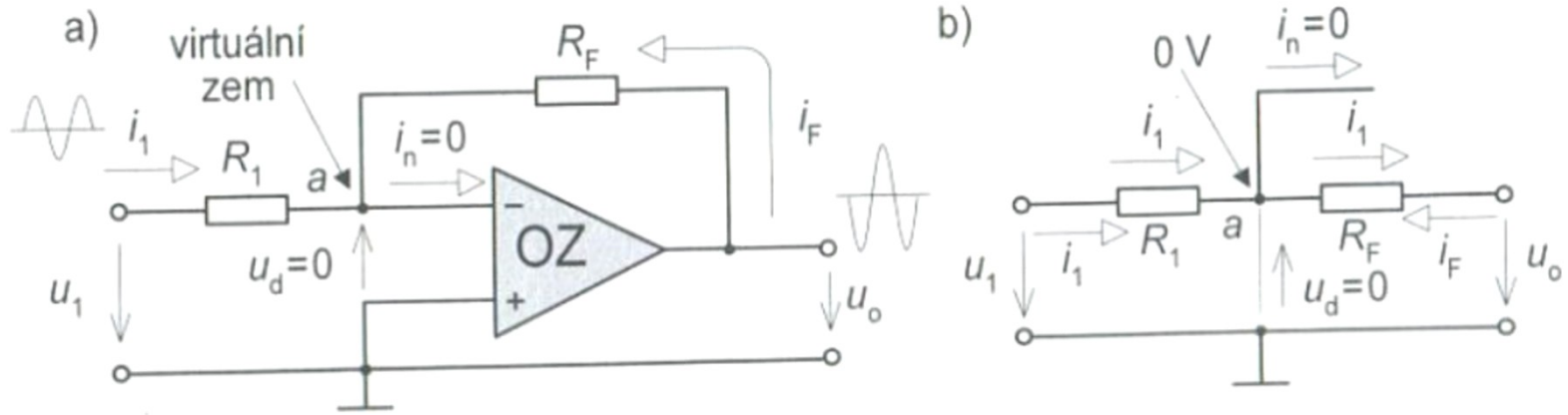


$$\beta = \frac{u_n}{u_o} = 1$$

$$u_1 = u_d + u_n = 0 + u_o \quad u_o = u_1$$

$$A = \frac{R_F}{R_1} + 1 = 0 + 1 = 1$$

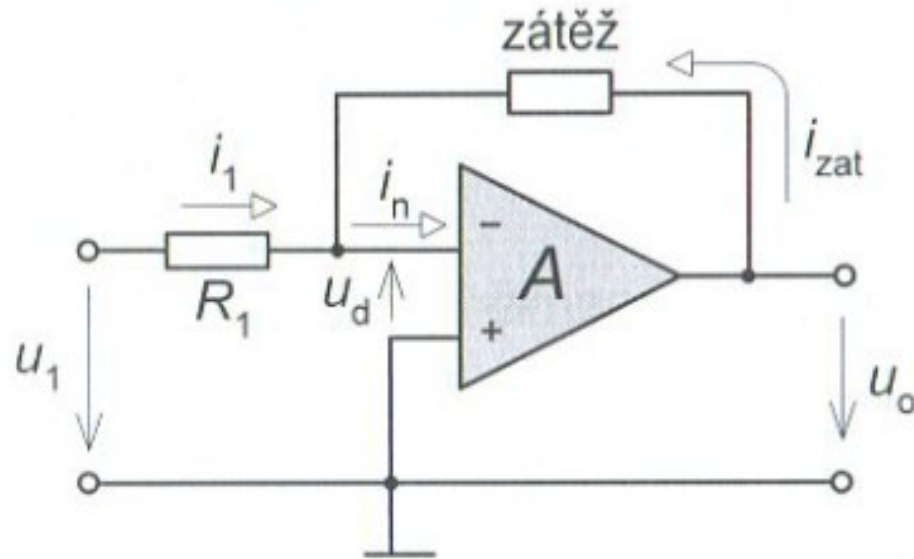
Invertující zapojení OZ



$$A = -\frac{R_F}{R_1} \quad i_1 = \frac{u_1 + u_d}{R_1} = \frac{u_1}{R_1} \quad i_F = \frac{u_o + u_d}{R_F} = \frac{u_o}{R_F}$$

Vstupní odpor: $R_{vst} = \frac{u_1 + u_d}{i_1} = \frac{u_1 + 0}{i_1} = R_1$

Invertující zapojení jako zdroj proudu řízený napětím



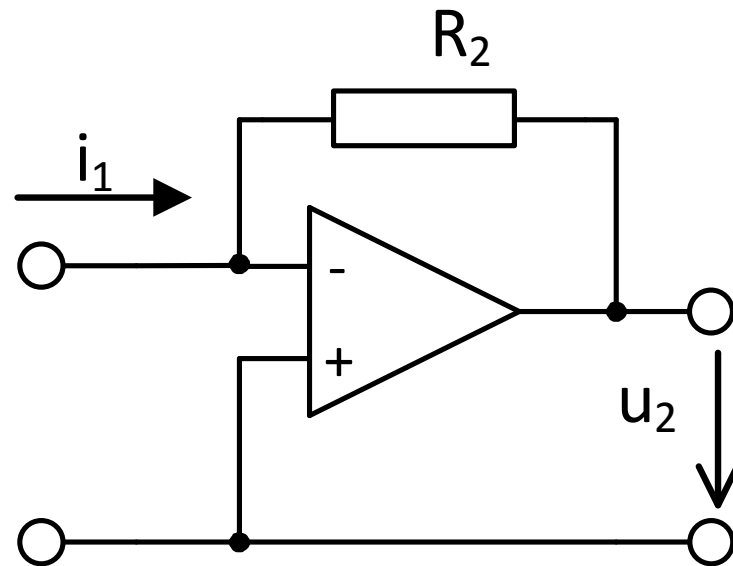
$$i_1 + i_{zat} = i_n$$

$$i_n = 0$$

$$i_1 = -i_{zat}$$

$$i_{zat} = -i_1 = -\frac{u_1}{R_1}$$

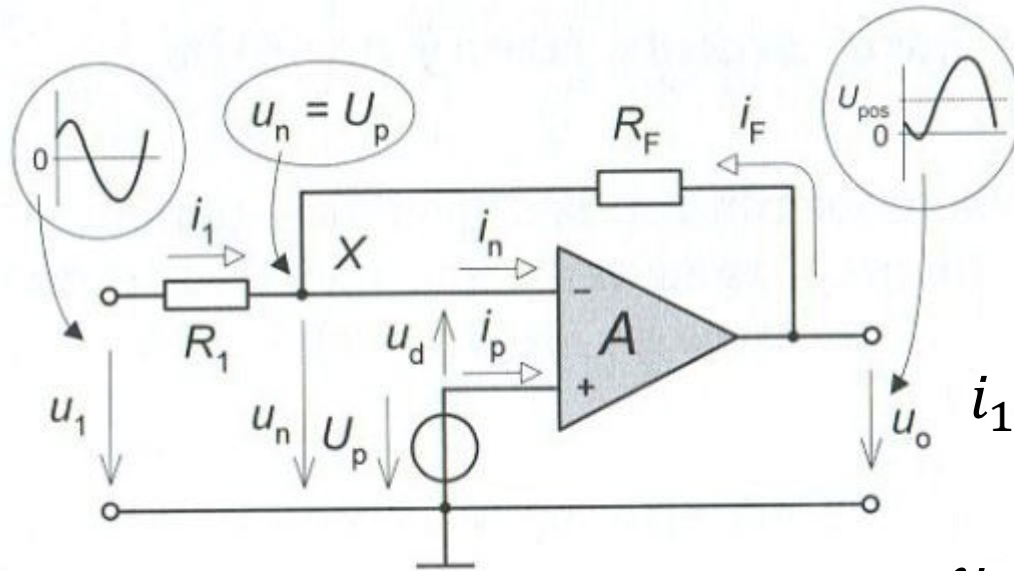
Invertující zapojení jako zdroj napětí řízený proudem



$$I_1 = -\frac{U_2}{R_2}$$

$$U_1 \approx 0$$

Invertující zapojení s neinvertujícím vstupem připojeným na zdroj napětí



$$i_n = 0 \quad u_d = 0$$

$$i_1 + i_F = i_n \quad i_1 = -i_F$$

$$i_1 = \frac{u_1 - u_n}{R_1} \quad i_F = \frac{u_o - u_n}{R_F}$$

$$u_n = u_p \quad \frac{u_1 - u_p}{R_1} = \frac{u_o - u_p}{R_F}$$

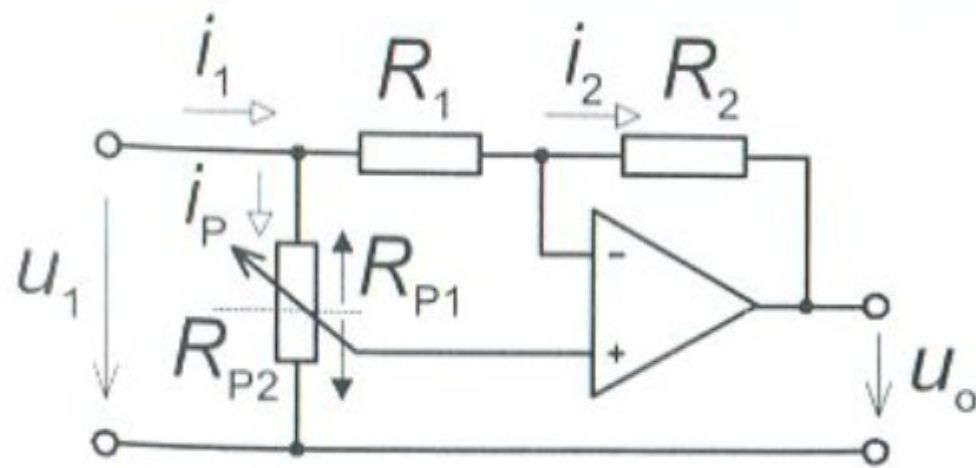
posunutí proti
úrovni „0 V“

$$U_{pos} = \left(\frac{R_F}{R_1} + 1 \right) \cdot U_p$$

výstupní signál

$$u_o = \left(\frac{R_F}{R_1} + 1 \right) \cdot U_p - \frac{R_F}{R_1} \cdot u_1$$

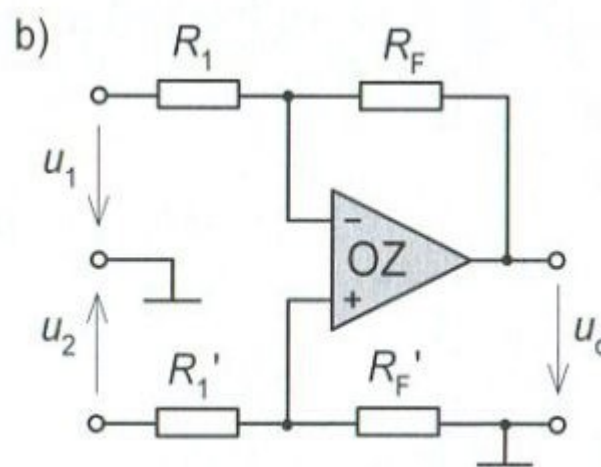
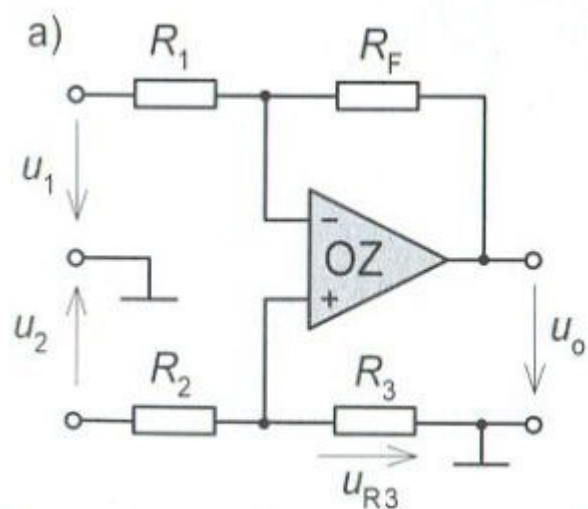
Univerzální zesilovač



Polohou jezdce lze nastavit zesílení: $A_u = \langle -1; 1 \rangle$

$$A_u = \frac{-R_2 + R_1 \cdot \left(\frac{R_{P2}}{R_{P1}}\right)}{R_1 \cdot \left(1 + \frac{R_{P2}}{R_{P1}}\right)}$$

Rozdílový zesilovač



$$R'_1 = k \cdot R_1$$

$$R'_F = k \cdot R_F$$

$$\text{tzn. } \frac{R'_F}{R'_1} = \frac{R_F}{R_1}$$

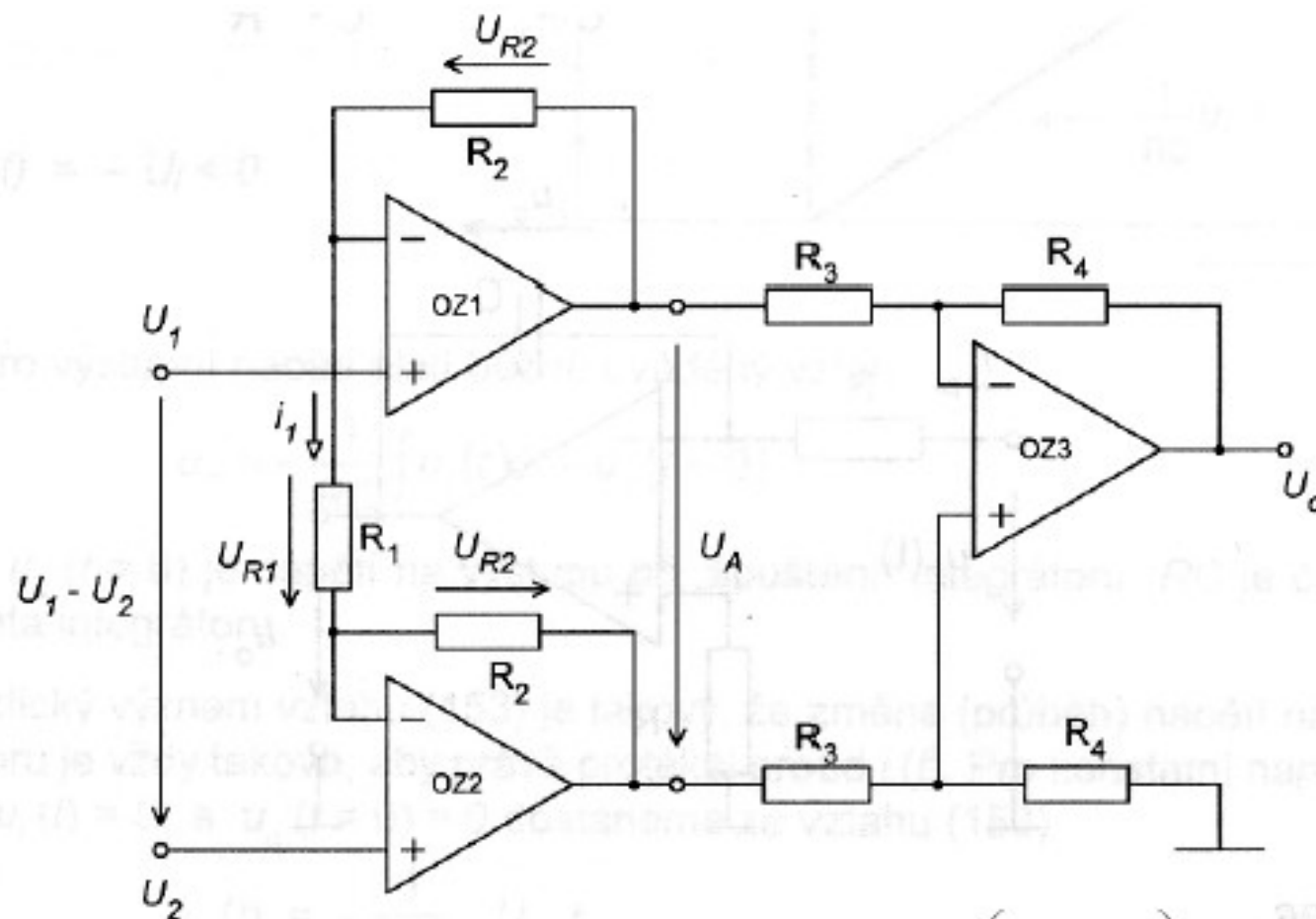
$$u_o = \left(\frac{R_F}{R_1} + 1 \right) \cdot u_{R3} - \frac{R_F}{R_1} \cdot u_1$$

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

$$u_{R3} = \frac{u_2}{R_2 + R_3} \cdot R_3$$

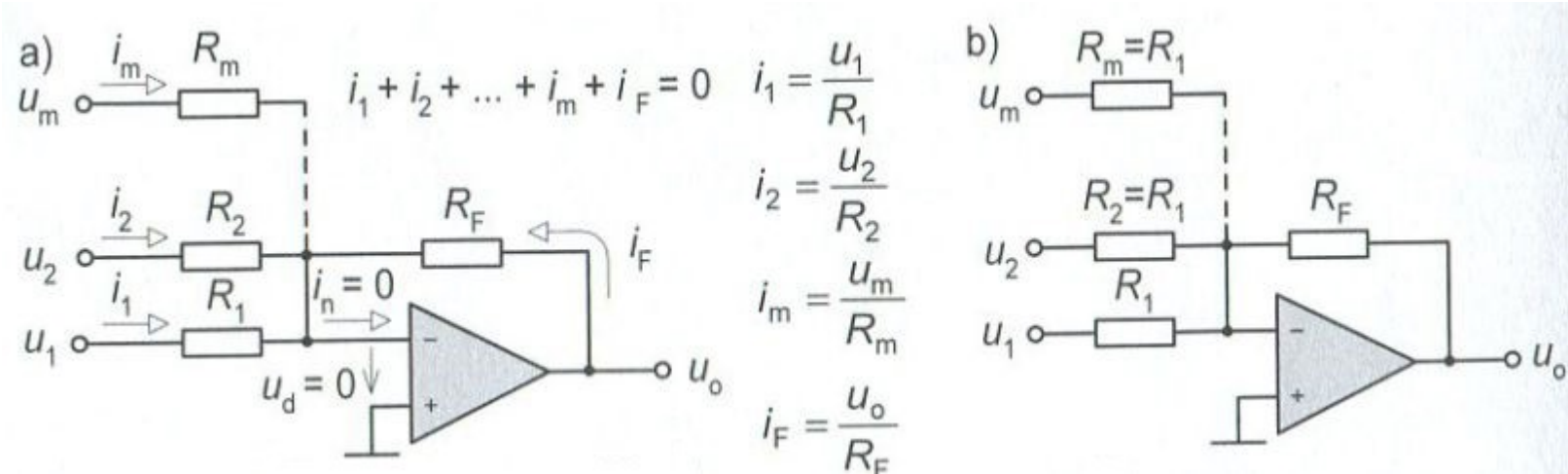
$$u_o = \left(\frac{R_F}{R_1} + 1 \right) \cdot u_2 \cdot \frac{R_3}{R_2 + R_3} - \frac{R_F}{R_1} \cdot u_1$$

Přístrojový zesilovač



$$U_o = \frac{R_4}{R_3} \left(1 + \frac{2R_2}{R_1} \right) \cdot (U_2 - U_1)$$

OZ jako invertující součtový zesilovač

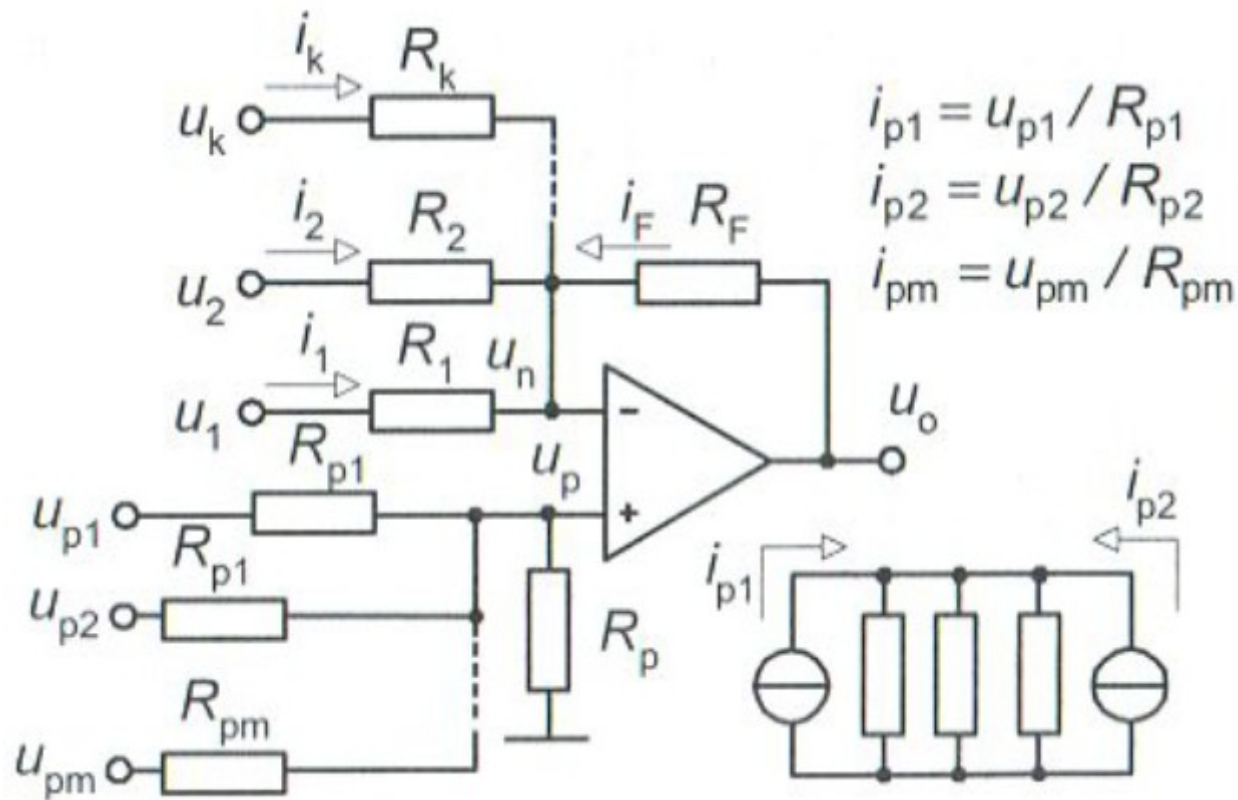


$$u_o = -R_F \cdot \left(\frac{u_1}{R_1} + \frac{u_2}{R_2} + \dots + \frac{u_m}{R_m} \right)$$

$$u_o = -\frac{R_F}{R_1} \cdot (u_1 + u_2 + \dots + u_m)$$

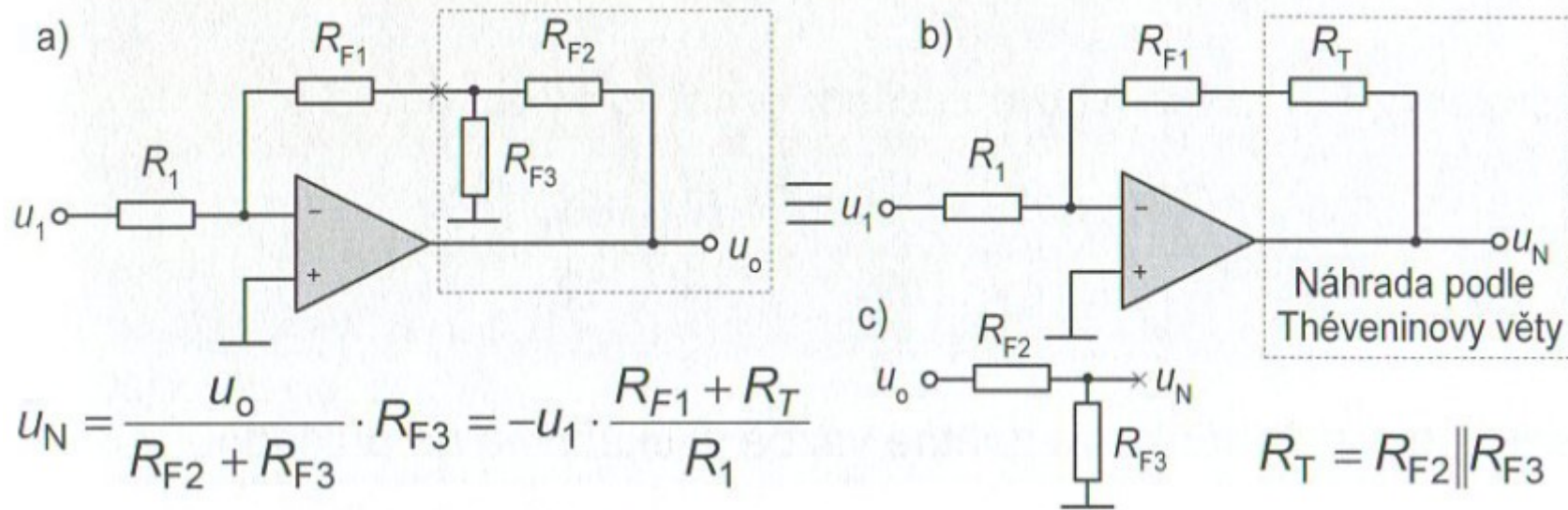
$$R_1 = R_2 = \dots = R_m$$

Algebraický člen



$$u_o = u_p \cdot \frac{R_F}{R_1 \parallel R_2 \dots \parallel R_k \parallel R_F} - \left(\frac{u_1}{R_1} + \frac{u_2}{R_2} + \dots + \frac{u_k}{R_k} \right) \cdot R_F$$

Složený zpětnovazební obvod

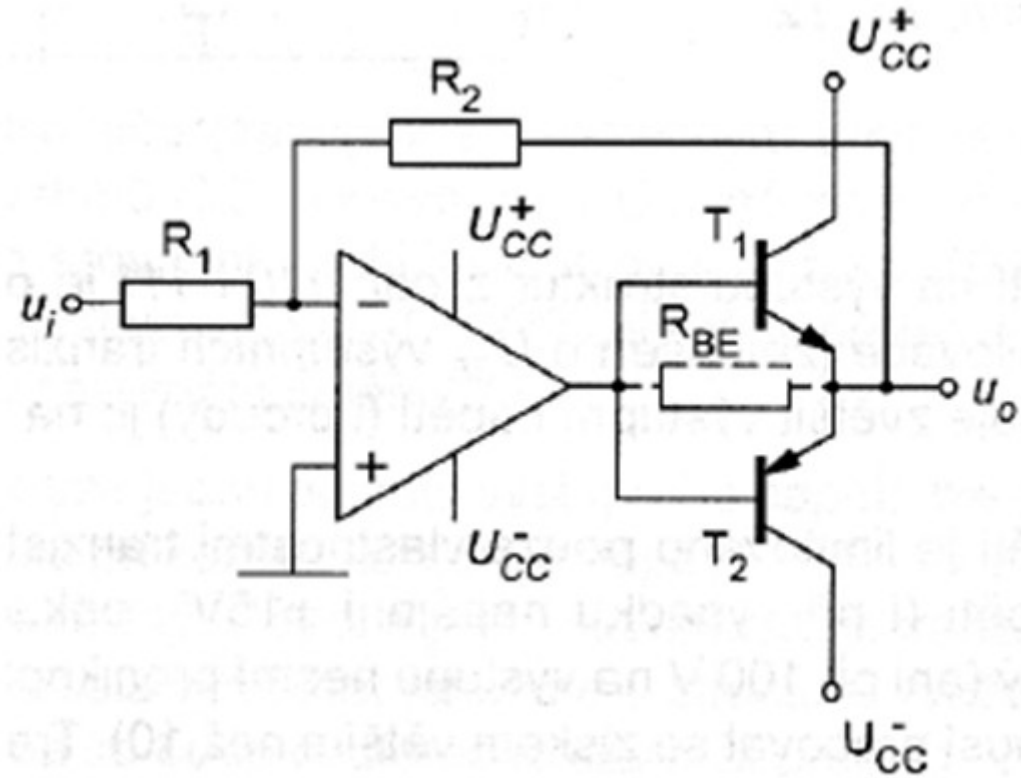


$$A_u = \frac{u_o}{u_1} = - \frac{R_{F2} + R_{F3}}{R_{F3}} \cdot \frac{R_{F1} + R_{F2} \parallel R_{F3}}{R_1}$$

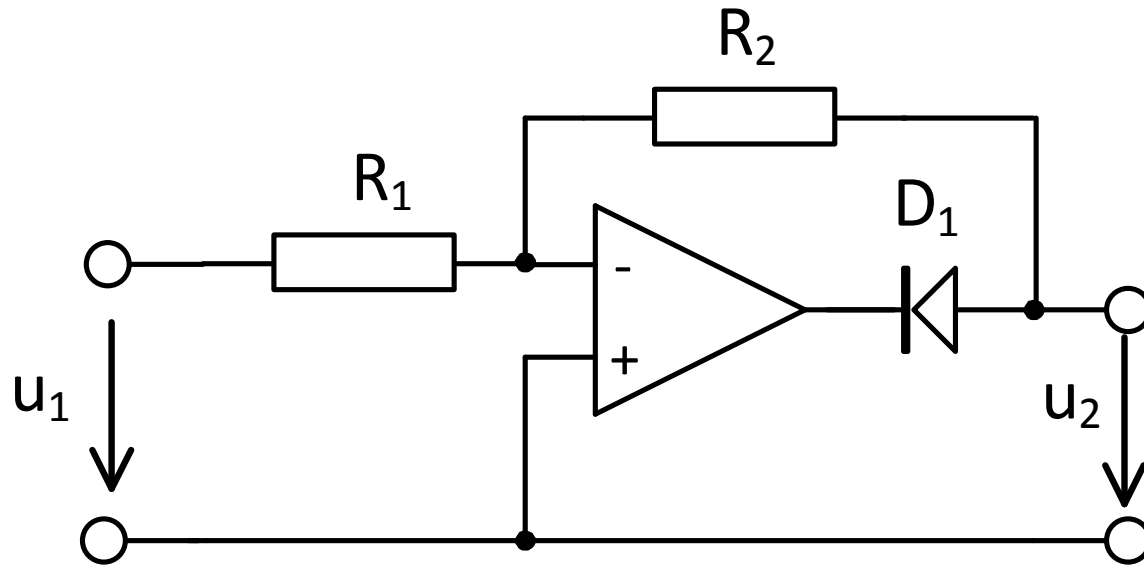
nebo po úpravě

$$A_u = - \frac{R_{F1}(R_{F2} + R_{F3}) + R_{F2} \cdot R_{F3}}{R_1 \cdot R_{F3}}$$

Posílení výstupu



Bezúbytkový usměrňovač

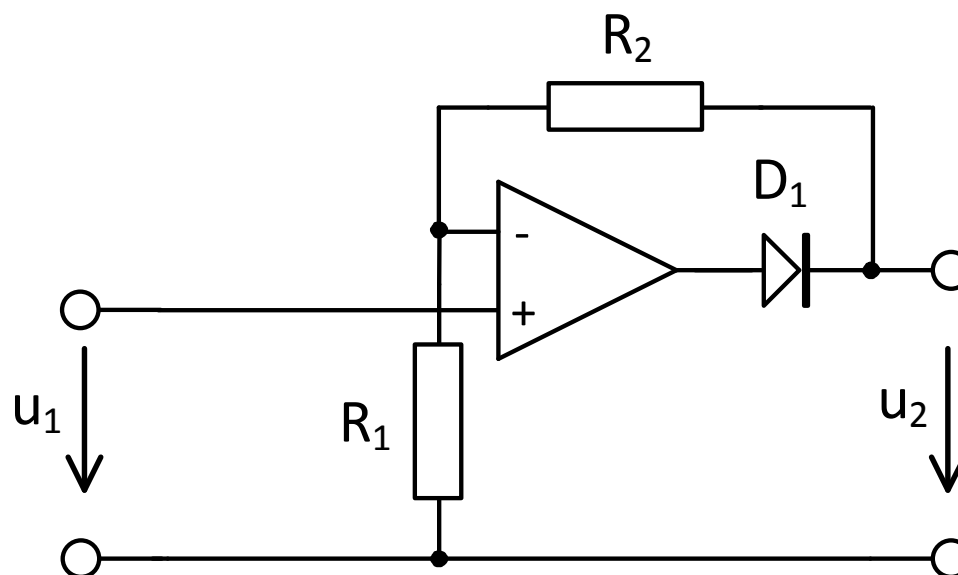


- výstupní napětí je jednocestně usměrněno
- zapojení odvozeno z invertujícího zapojení OZ

$$u_1 > 0 \quad \rightarrow \quad u_2 = -\frac{R_2 + r_{D1}}{R_1} \cdot u_1$$

$$u_1 < 0 \quad \rightarrow \quad u_2 = 0$$

Bezúbytkový usměrňovač

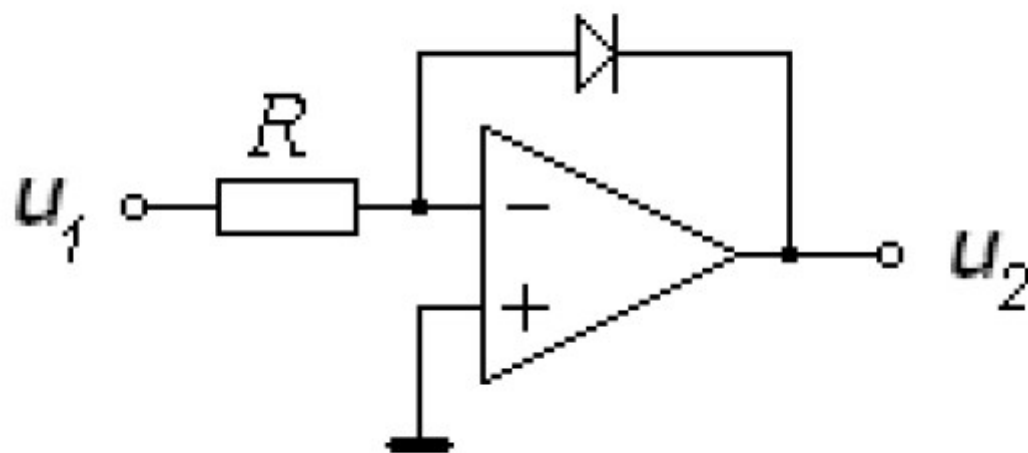


- výstupní napětí je jednocestně usměrněno
- zapojení odvozeno z neinvertujícího zapojení OZ

$$u_1 > 0 \quad \rightarrow \quad u_2 = \left(1 + \frac{R_2 + r_{D1}}{R_1} \right) \cdot u_1$$

$$u_1 < 0 \quad \rightarrow \quad u_2 = 0$$

Logaritmující obvod



$$I_D = I_S \left(\exp\left(\frac{U}{U_\theta}\right) - 1 \right)$$

$$U_2 = k \cdot \ln u_1$$