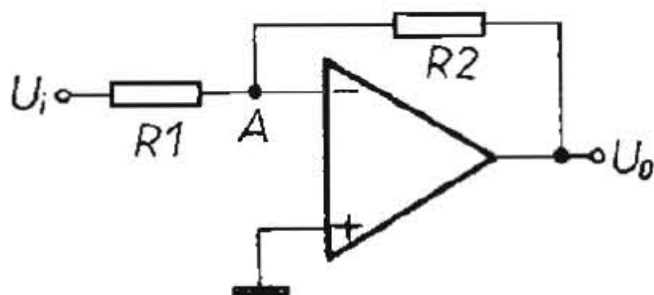


Základy operačních zesilovačů a obvody s operačními zesilovači II.

Invertující zesilovač



- invertující zesilovač obrací fázi vstupního signálu o 180°
- bod A je virtuální zem tedy je přibližně na nulovém potenciálu (ideální OZ)

Napětí U_i určuje proud rezistorem R_1 podle vztahu $i_{R1} = \frac{U_i}{R_1}$

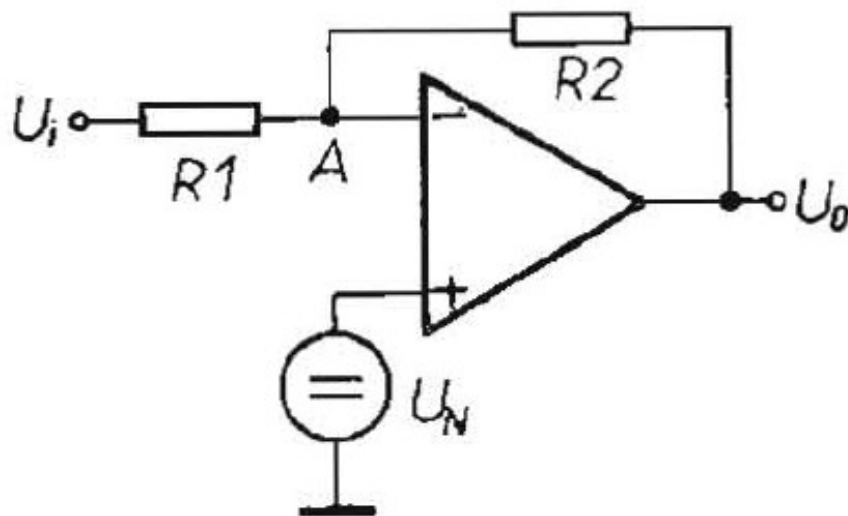
Proud i_{R1} neteče do vstupu OZ, protože má velký vstupní odpor a teče přes R_2 do výstupu. Platí vztahy:

$$\frac{U_i}{R_1} = -\frac{U_o}{R_2} \longrightarrow U_o = -U_i \frac{R_2}{R_1}.$$

vstupní odpor invertujícího zesilovače: $R_{vst} = \frac{U_i}{i_{vst}} = R_1$

Invertující zesilovač

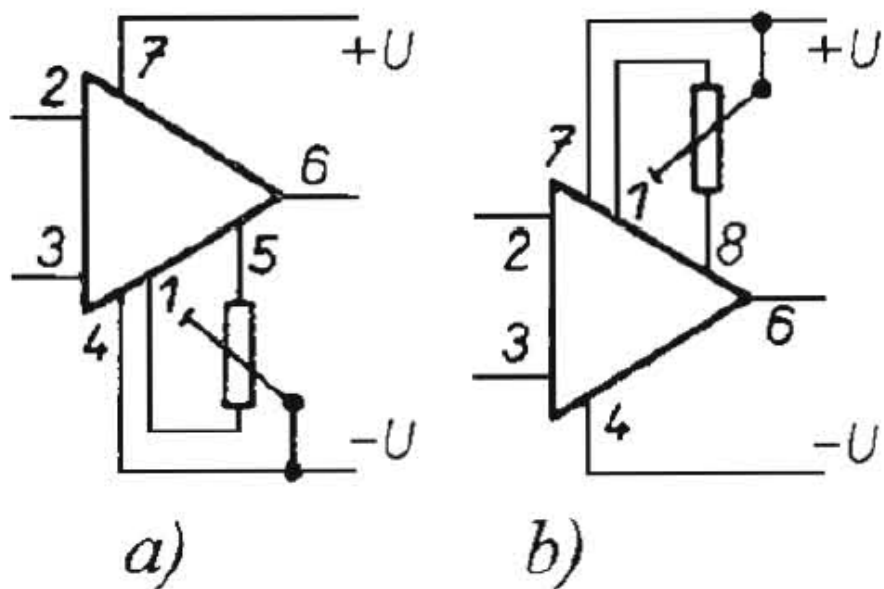
- pro ideální OZ by při nulovém U_i mělo být nulové U_o
- reálně bude i při nulovém vstupu na výstupu nějaké nenulové výstupní napětí (**vstupní napěťová nesymetrie**) a je způsobena faktem, že vstupní tranzistory diferenčního stupně OZ nejsou identické. Situaci lze namodelovat přidáním dalšího napětí U_N do obvodu.



Vstupní napěťová nesymetrie je běžně u OZ v rozsahu od 3 mV do 10 mV.

Kompenzace vstupní napěťové nesymetrie

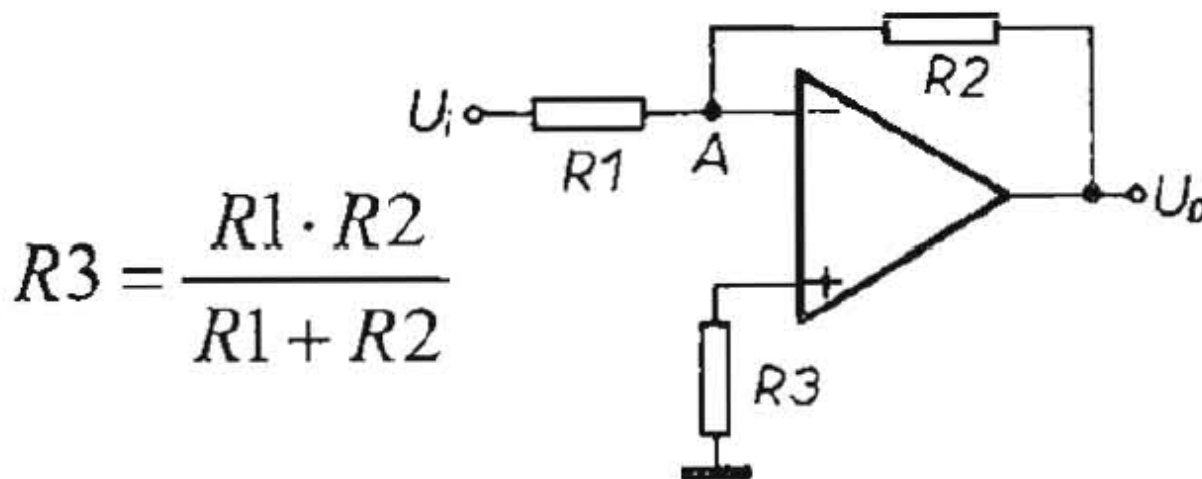
Některé jednoduší OZ mají zvláštní vývody pro možnost přidání vnějších prvků pro kompenzaci vstupní napěťové nesymetrie. K OZ lze připojit proměnný nastavitelný odpor, kterým lze vstupní napěťovou nesymetrii kompenzovat.



Kompenzace vstupní napěťové nesymetrie pomocí trimru.

Kompenzace vstupní proudové nesymetrie

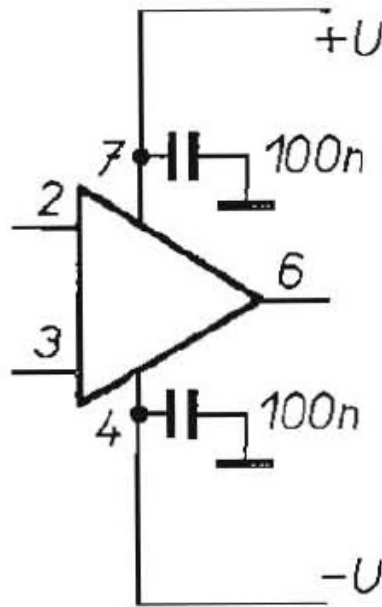
U operačních zesilovačů s bipolárními tranzistory ve vstupních obvodech musíme vzít úvahu proud tekoucí do vstupu OZ, což může způsobit **vstupní proudovou nesymetrii**. Často stačí k potlačení této nesymetrie zapojit zpětnovazební obvod tak, aby ke každému vstupu OZ byl připojen stejný odpor. Pokud uvažujeme zdroj signálu a výstup OZ s malým vnitřním odporem, je k invertujícímu vstupu připojen odpor rovnající se paralelní kombinaci $R1$ a $R2$. Proud tekoucí ze (nebo do) invertujícího vstupu OZ vytváří na této impedanci úbytek napětí, který se projevuje podobně jako vstupní napěťová nesymetrie tedy nenulovým výstupním napětím při vstupu bez signálu. Zařazený odpor $R3$ tak vykompenzuje tuto nesymetrii, ale za cenu zvýšení šumu.



Napájení operačních zesilovačů

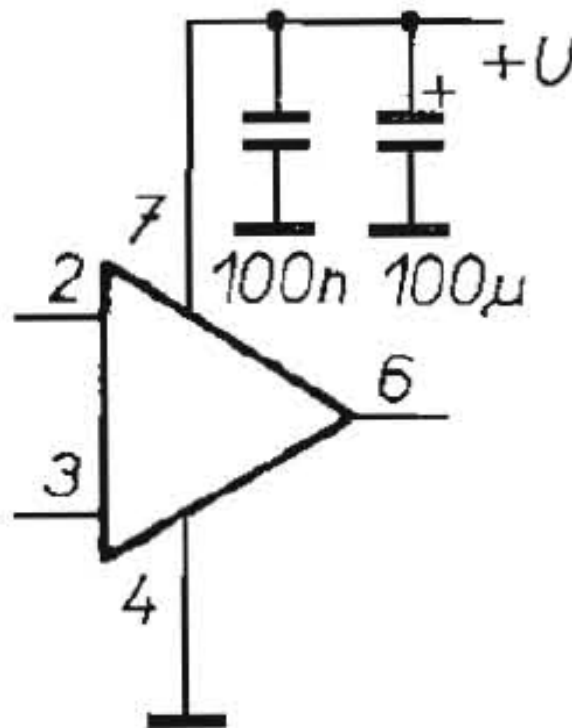
Standartně jsou operační zesilovače napájeny symetrickým napětím $\pm 12\text{ V}$ nebo $\pm 15\text{ V}$. Pak jsou zpracovávané signály vztaženy většinou ke středu napájecího napětí (0 V), který definujeme jako zem.

Přívody napájecích napětí je nutné zablokovat kondenzátory ($C_b = 100\text{ nF}$)



Napájení operačních zesilovačů

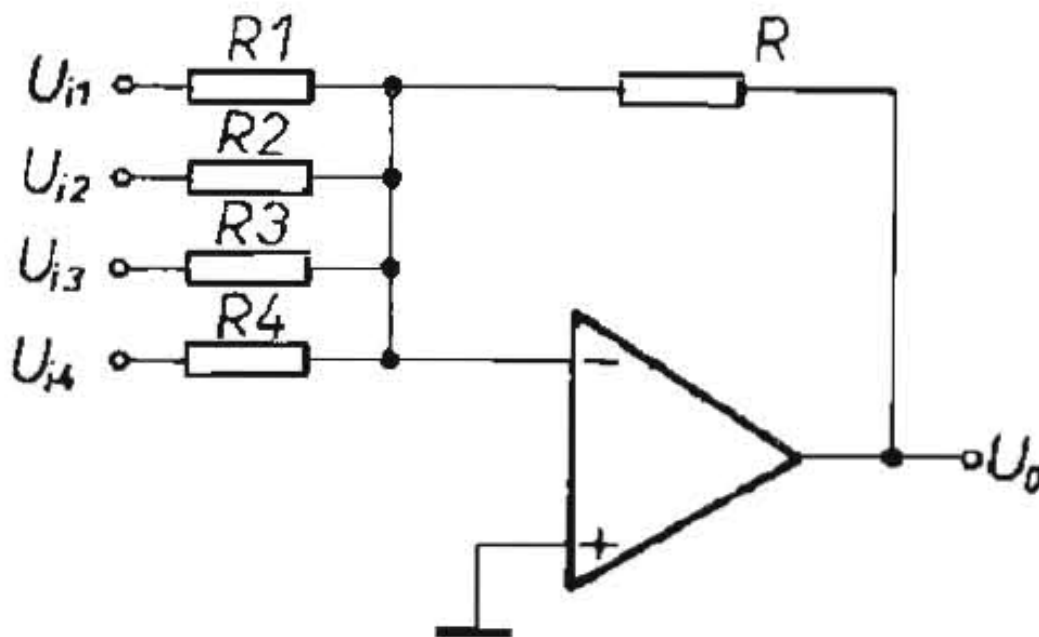
V mnoha obvodech se setkáváme s operačními zesilovači, které jsou napájeny jen jedním napětím.



Invertující součtový zesilovač

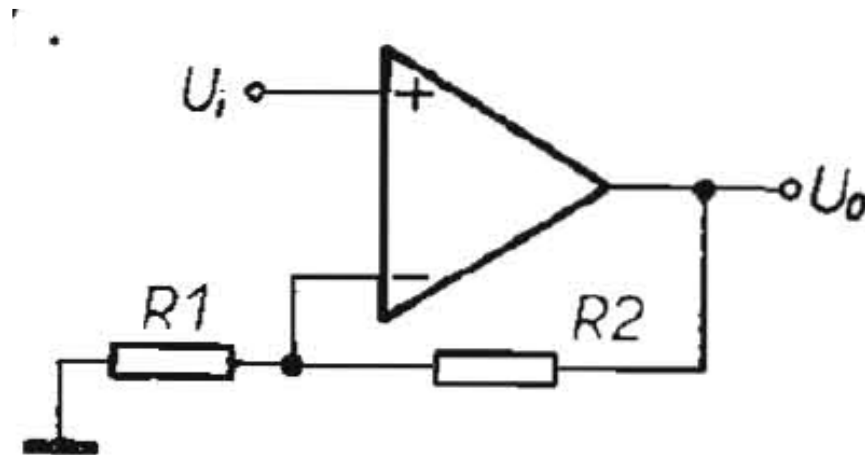
Výstupní napětí je dáno vztahem:

$$U_o = -R \cdot I_R = -R(I_{R1} + I_{R2} + I_{R3} + I_{R4}) = -(U_1 \frac{R}{R_1} + U_2 \frac{R}{R_2} + U_3 \frac{R}{R_3} + U_4 \frac{R}{R_4})$$

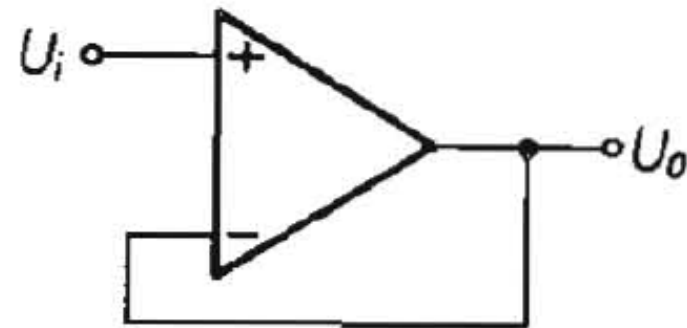


Neinvertující zesilovač

$$A = \frac{U_o}{U_i} = \left(\frac{R_2}{R_1} + 1\right) \quad \frac{U_i}{R_1} = (U_o - U_i)/R_2 \quad \frac{R_2 U_i}{R_1} = U_o - U_i$$



$$U_i \left(\frac{R_2}{R_1} + 1\right) = U_o$$



zesílení $A = 1 \rightarrow$ sledovač

$$R_2 = 0 \quad R_1 = \infty$$

Neinvertující zesilovač a sledovač mají velký vstupní odpor. Je to impedanční převodník.

Diferenční zesilovač s OZ

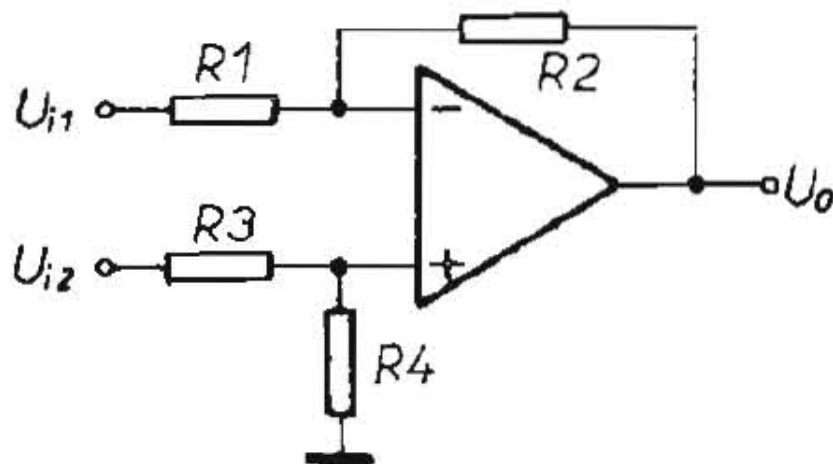
Kombinací invertujícího a neinvertujícího zesilovače získáme rozdílový (diferenční) zesilovač. Při stejném poměru zpětnovazebních rezistorů bude zesílení

$$A = \frac{R4}{R3} = \frac{R2}{R1}$$

Výstupní napětí U_o je dáno rozdílem vstupních napětí a zesílením A

$$U_o = (U_{i2} - U_{i1})A$$

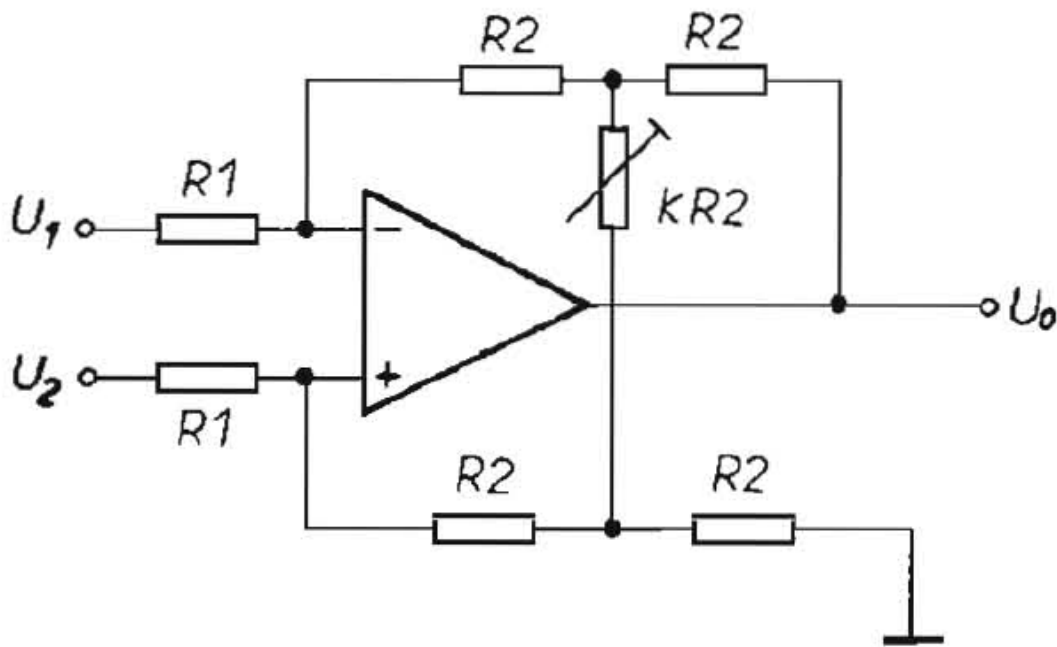
Pokud bude poměr odporů různý, bude také zesílení pro každý vstup jiné. Je-li zapojení skutečně souměrné, musí být výstupní napětí nulové, přivedeme-li na oba vstupy signál o stejném napětí a fázi (souhlasný signál).



Diferenční zesilovač

Změna zesílení se dosáhne změnou jednoho odporu kR_2

$$U_o = 2 \frac{R_2}{R_1} \left(1 + \frac{1}{k}\right) (U_2 - U_1).$$



Nevýhoda těchto dvou typů diferenčních zesilovačů je malý vstupní odpor.

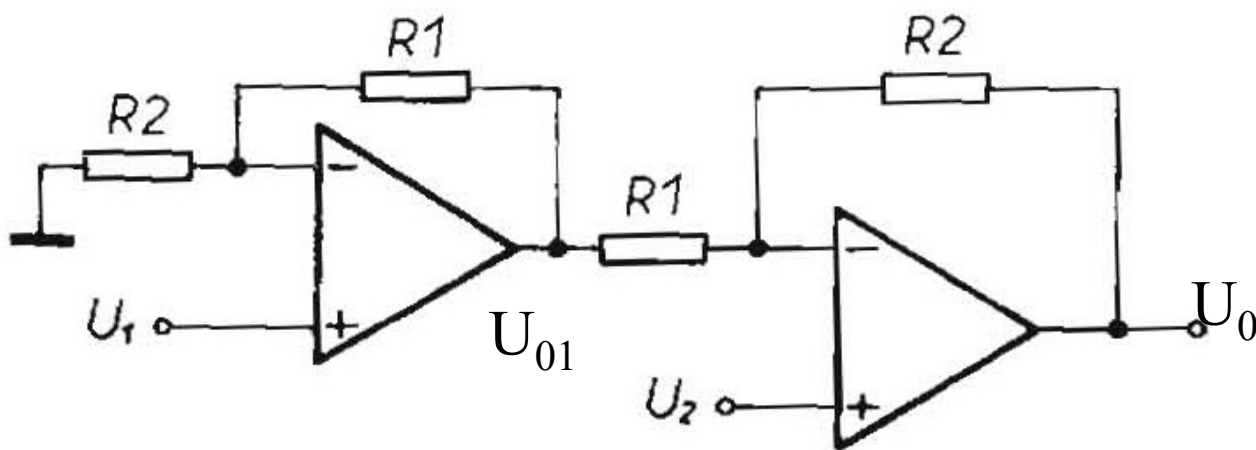
Diferenční zesilovač

diferenční zesilovač s velkým vstupním odporem

$$U_o = \frac{R_1 + R_2}{R_1} (U_2 - U_1) \quad A = \frac{U_o}{U_i} = \left(\frac{R_2}{R_1} + 1 \right)$$

$$\left(\frac{R_1}{R_2} + 1 \right) U_1 = U_{01}$$

$$\frac{(U_2 - U_{01})}{R_1} = \frac{U_0 - U_2}{R_2}$$



$$\frac{1}{R_1} U_2 - U_1 \frac{R_1 + R_2}{R_1 R_2} = \frac{U_0 - U_2}{R_2}$$

$$\left(\frac{1}{R_1} + \frac{1}{R_2} \right) (U_2 - U_1) = \frac{U_0}{R_2}$$

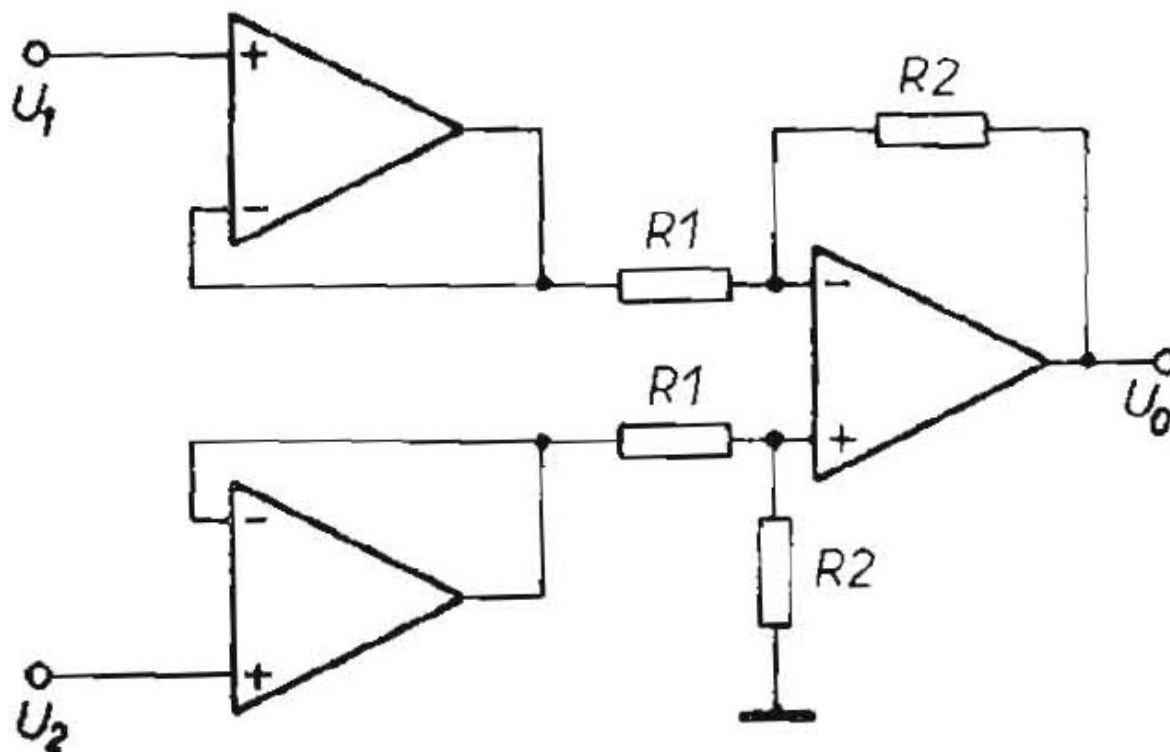
$$\left(\frac{R_1 + R_2}{R_1} \right) (U_2 - U_1) = U_0$$

Diferenční zesilovač

diferenční zesilovač s velkým vstupním odporem

$$A = \frac{R_2}{R_1}$$

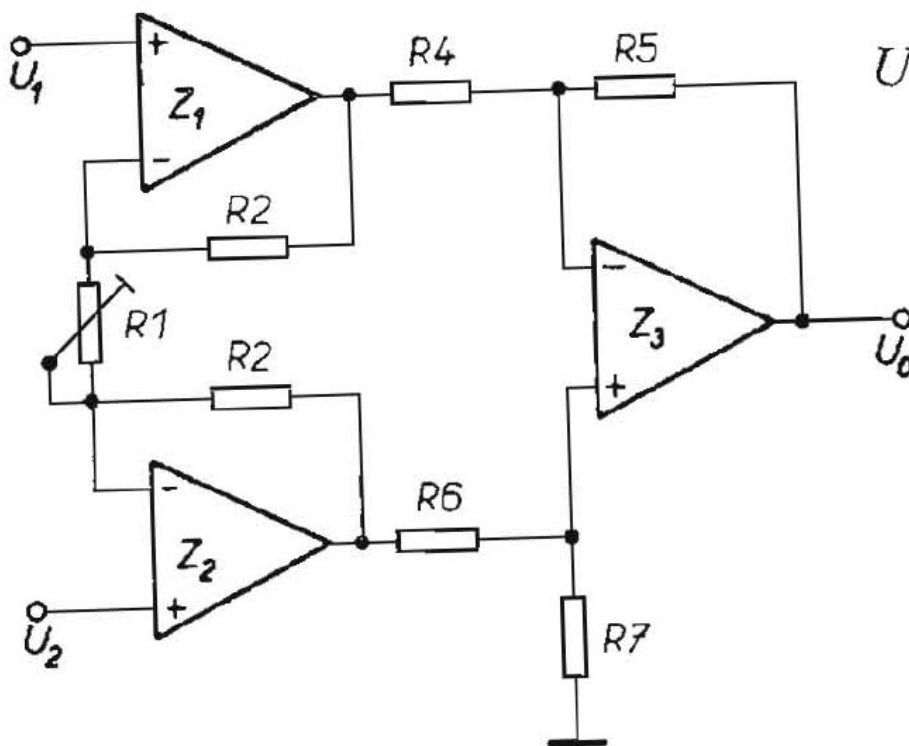
$$U_0 = \frac{R_2}{R_1}(U_2 - U_1)$$



Diferenční zesilovač

diferenční zesilovač s velkým vstupním odporem “přístrojový zesilovač”

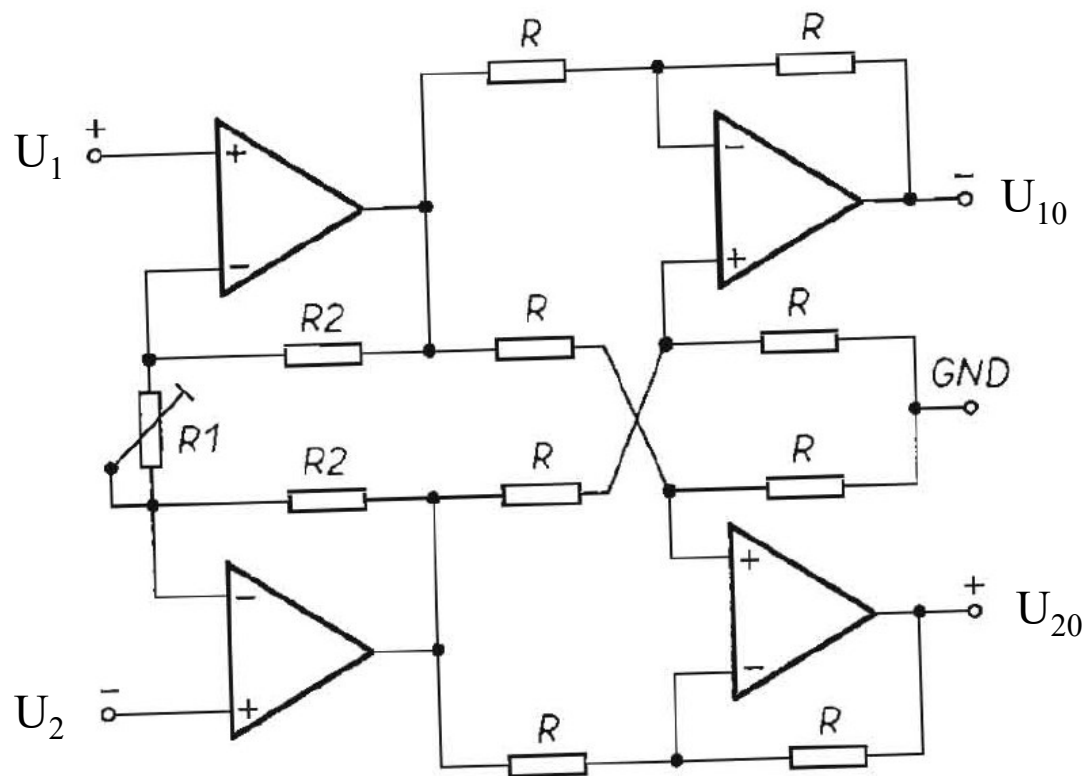
V praxi se pak volí odpory rezistorů $R4 = R6$ a $R5 = R7$



$$U_o = (U_2 - U_1) \left(1 + \frac{2R_2}{R_1}\right) \left(\frac{R_5}{R_4}\right)$$

R_1 – nastavuje se velikost zesílení

Diferenční zesilovač s diferenčním výstupem.



$$U_{10} - U_{20} = -2(U_1 - U_2)\left(1 + \frac{2R_2}{R_1}\right)$$

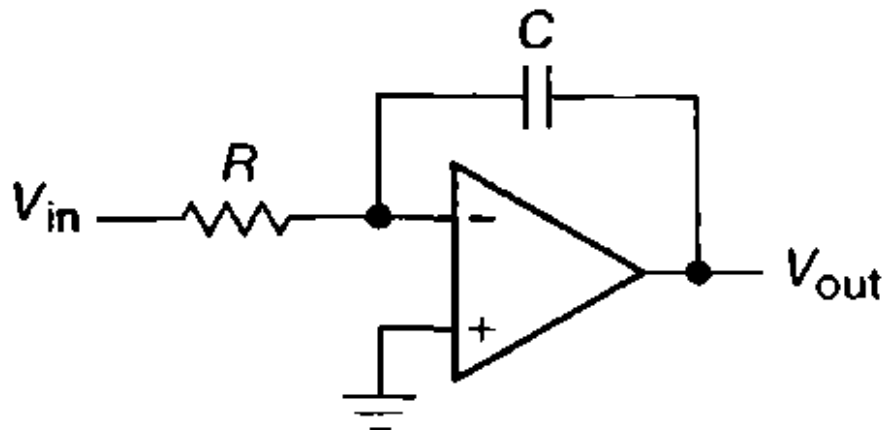
Zesilovač má velký vstupní odpor, symetrický výstup a zesílení se nastavuje velikostí R_1 .

Integrační a derivační obvod

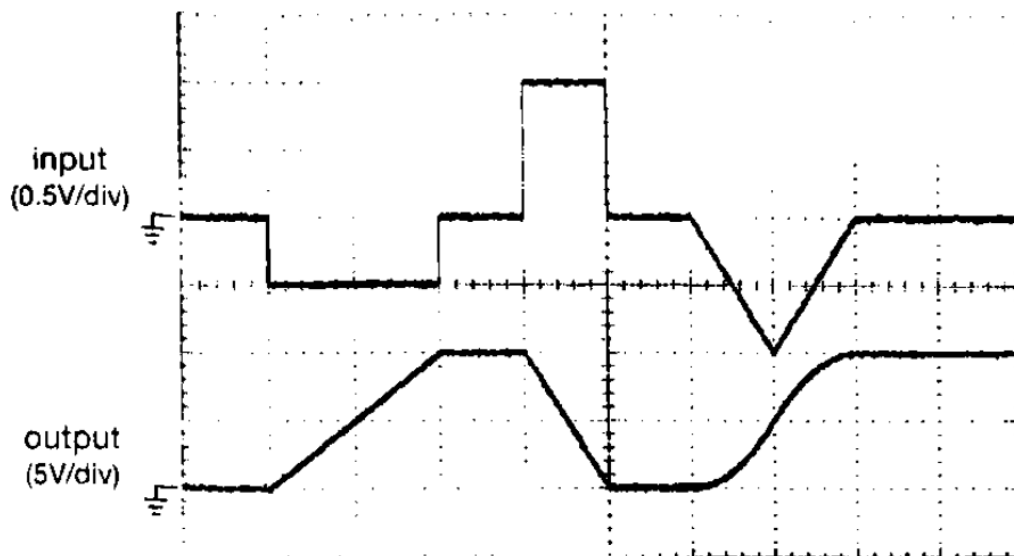
Integrátor:

$$V_{\text{in}}/R = -C(dV_{\text{out}}/dt)$$

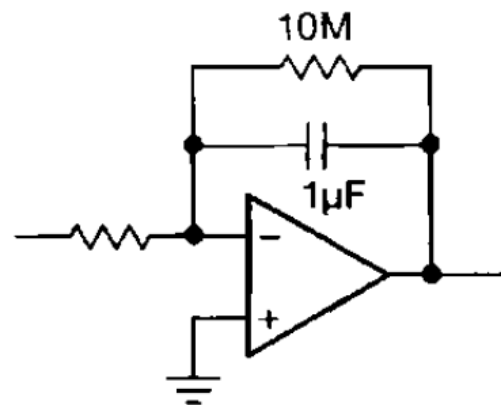
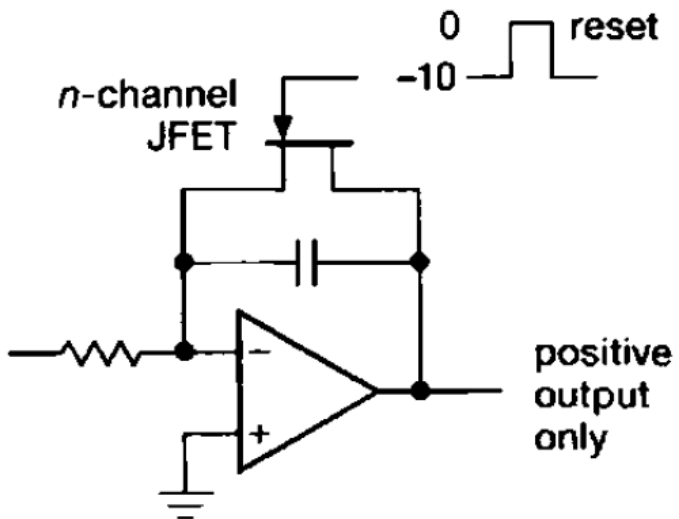
$$V_{\text{out}}(t) = -\frac{1}{RC} \int V_{\text{in}}(t) dt + \text{const.}$$



$$R = 1\text{M}\Omega \quad C = 1\text{nF}$$

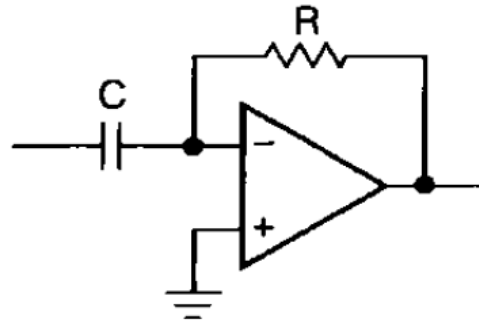


Tento integrátor má nestabilní výstup také díky vstupní napěťové a proudové nesymetrii. Nutno zařadit resetovací obvod.



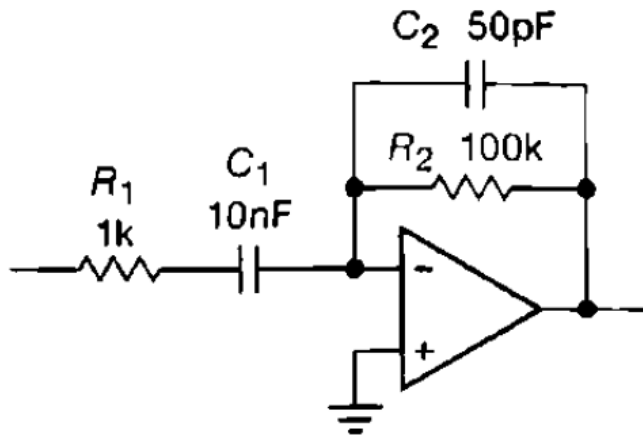
Derivační obvod

$$V_{\text{out}} = -RC \frac{dV_{\text{in}}}{dt}$$



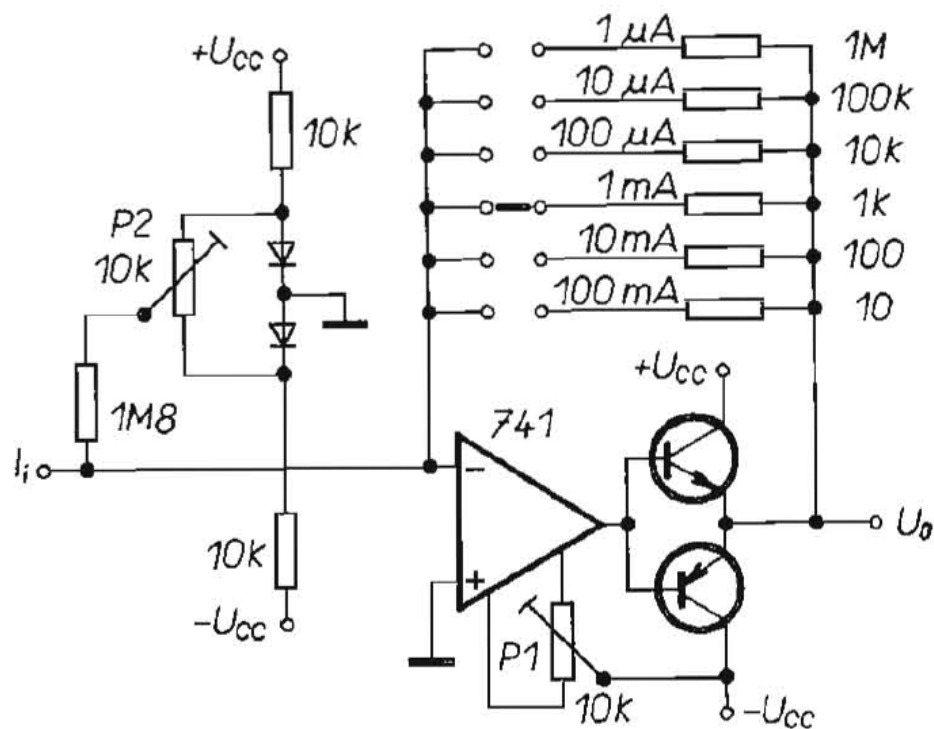
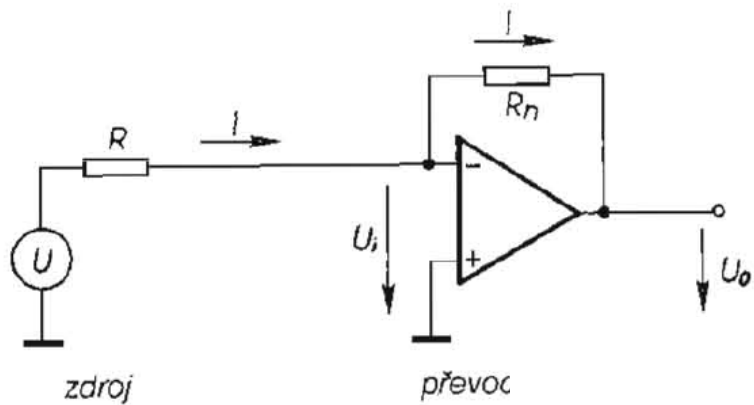
Op-amp differentiator (noisy, probably unstable!).

Problém je velký zisk pro vysoké frekvence a to vede k šumu a nestabilitě.

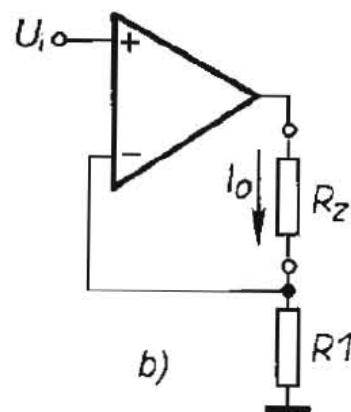
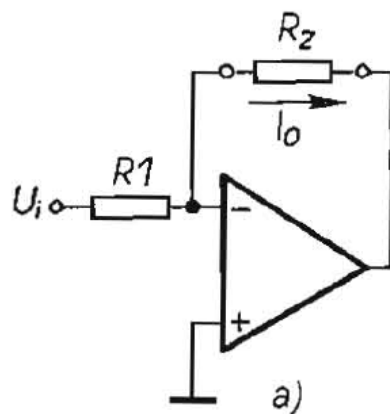


Touto úpravou redukujeme frekvenční pásmo derivačního obvodu. Pro vysoké frekvence to integruje.

Převodník proud-napětí

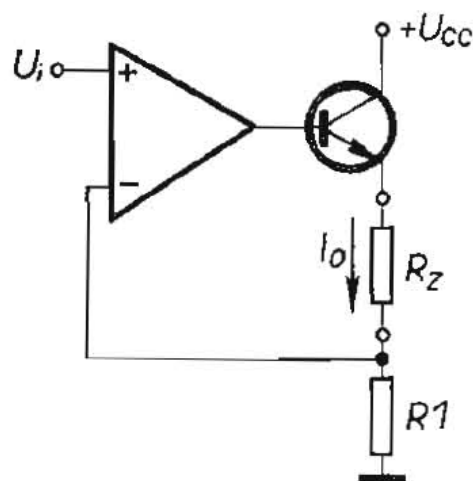


Převodník napětí proud



Proud zátěží je přitom v celém rozsahu výstupních napětí OZ nezávislý na odporu R_Z

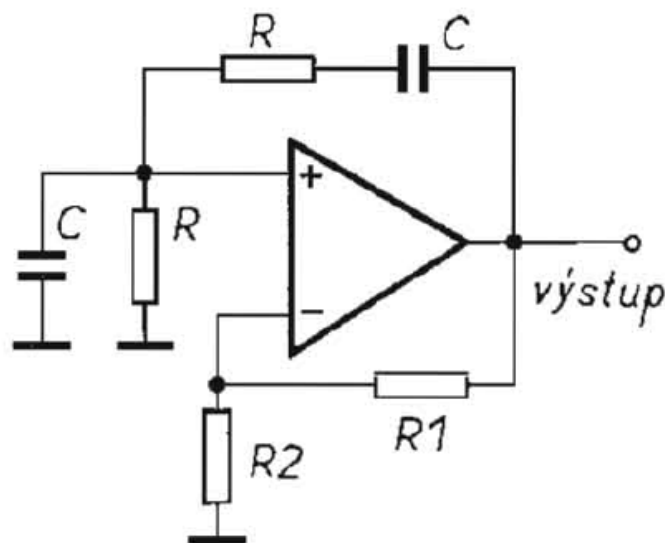
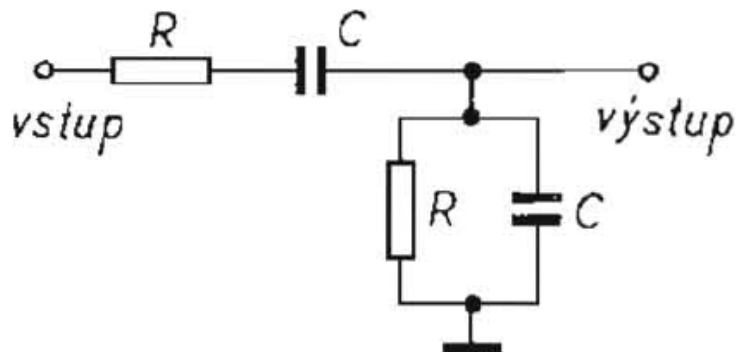
$$I_0 = \frac{U_i}{R_1}$$



Převodník napětí–proud s větším výstupním proudem

RC oscilátor s OZ

Využívá Wienův člen:



Oscilátor s Wienovým členem

Aby oscilátor kmital musí být:

$$A\beta = -1$$

Má maximální přenos $A = \frac{1}{3}$ pro frekvenci

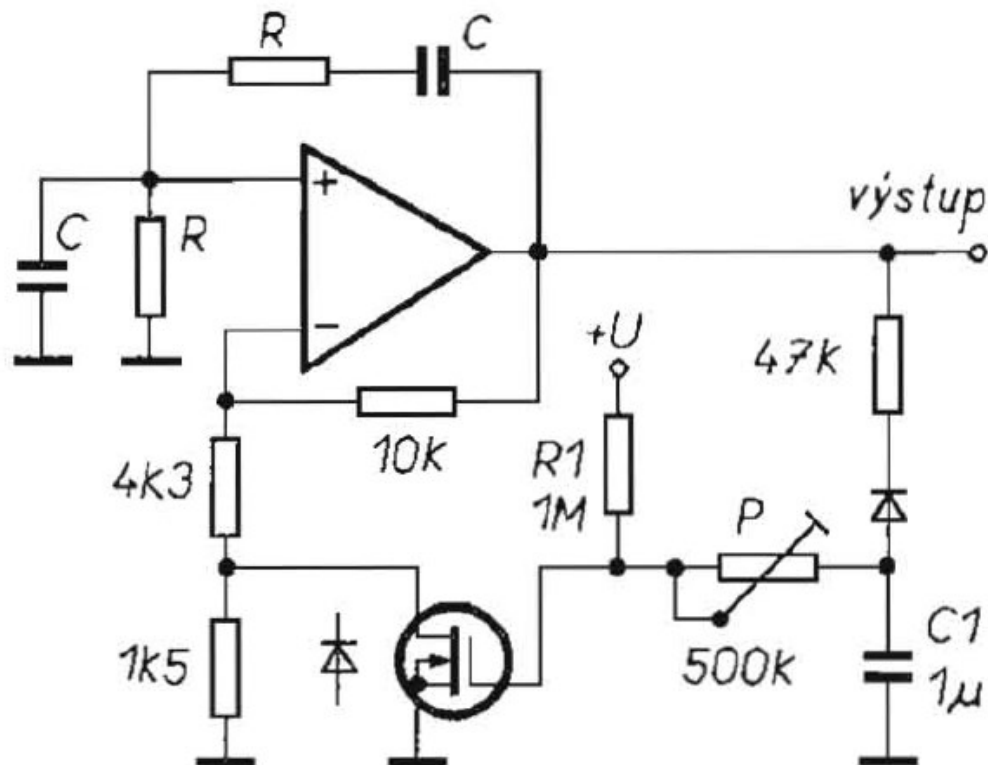
$$f_o = \frac{1}{2\pi RC}$$

Na frekvenci f_o je výstupní napětí ve fázi se vstupním napětím.

Wienův člen je zapojen ve větvy kladné zpětné vazby a má pro f_o přenos $\beta = -\frac{1}{3}$

Zesílení OZ musí být nastaveno pomocí záporné zpětné vazby dané odpory R_1 a R_2 na hodnotu přesně $A=3$.

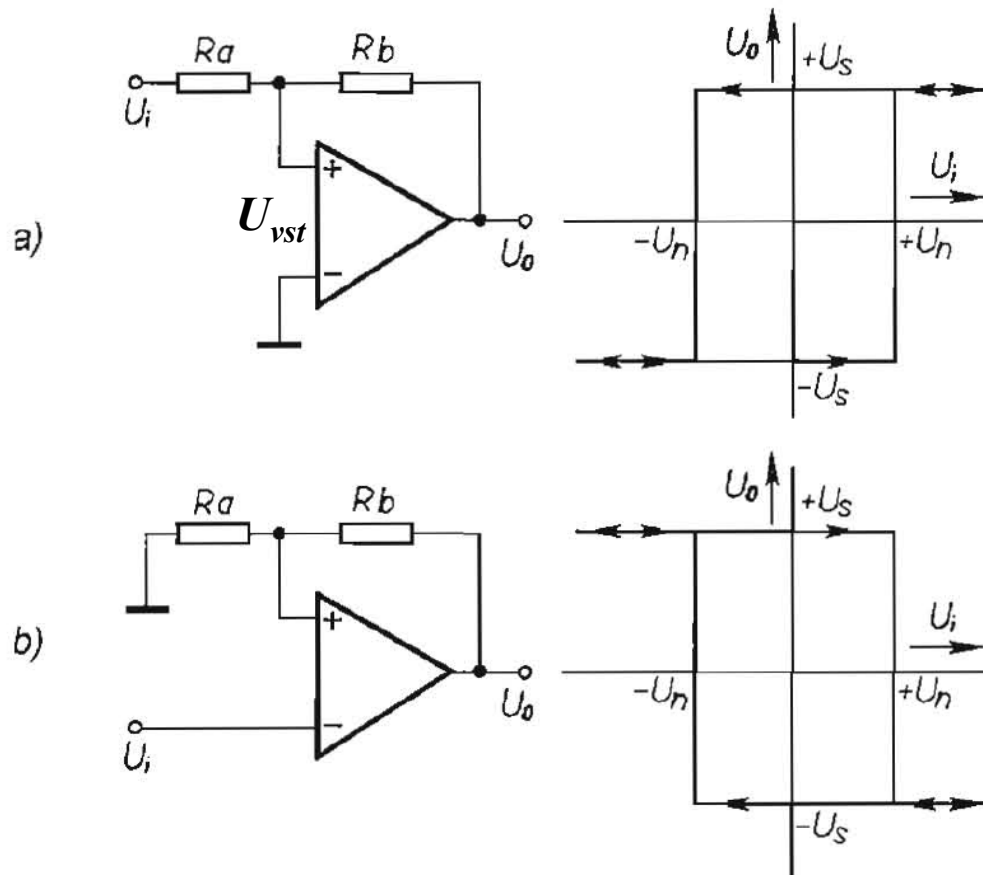
Oscilátor s Wienovým členem a se stabilizací amplitudy tranzistorem MOS



MOSFET pracuje v odporové oblasti a nesmí být mezi D a S větší střídavé napětí než 300 mV díky interní diodě substrát drain D.

Trimrem P nastavíme požadovanou hodnotu výstupního napětí.

Komparátor s hysterezí - Schmittův klopný obvod.



$$a) \quad U_i - \frac{U_i - U_0}{R_a + R_b} R_a = U_{vst}$$

překlápění výstupu při $U_{vst} = 0$ V

zvyšování U_i při $U_o = -U_s = -15$ V
 přechod výstupu nastane při $U_{vst} \geq 0$ V
 $U_i = U_n$

$$U_n - \frac{U_n - (-U_s)}{R_a + R_b} R_a = 0$$

$$U_n R_a + U_n R_b - U_n R_a - U_s R_a = 0$$

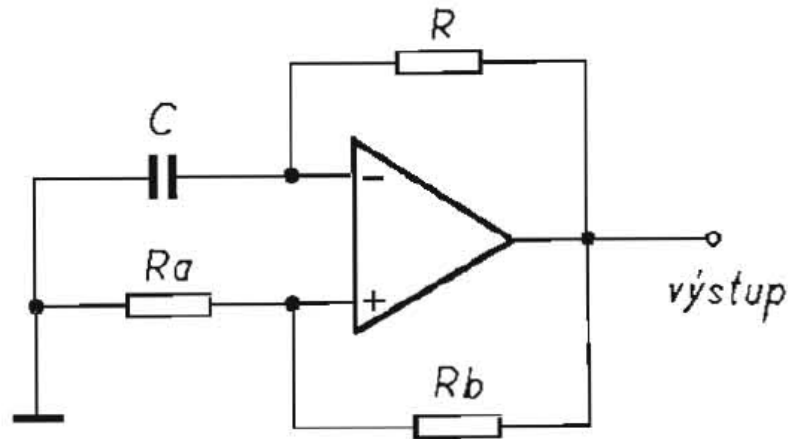
$$U_n R_b - U_s R_a = 0$$

$$U_n = \frac{R_a U_s}{R_b}$$

- b) Napětí při kterém se obvod překlápí závisí na výstupním saturačním napětí OZ a poměru R_a a R_b

$$U_n = \pm U_s \frac{R_a}{R_a + R_b}$$

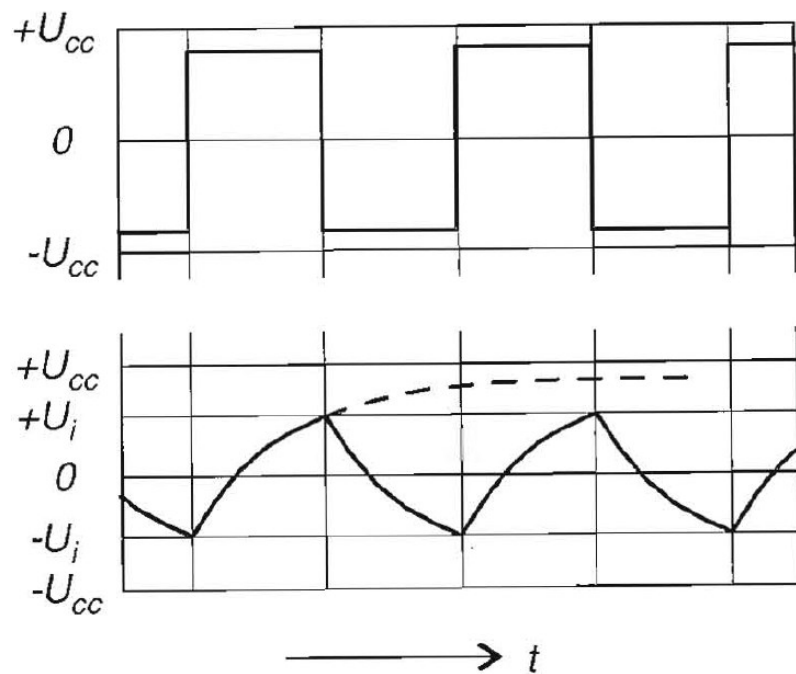
Multivibrátor



Multivibrátor s OZ

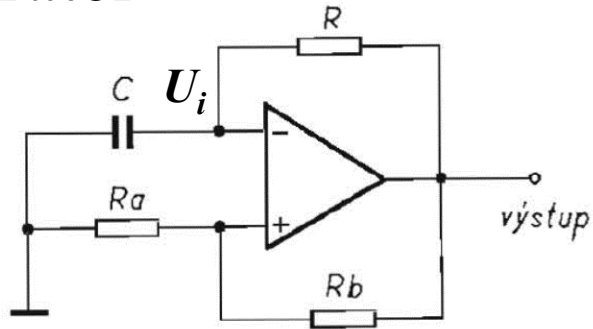
Základní zapojení multivibrátoru. Na výstupu je pravoúhlý signál se střídou 50%. Strmost hran je určena dobou přeběhu použitého operačního zesilovače.

Multivibrátor

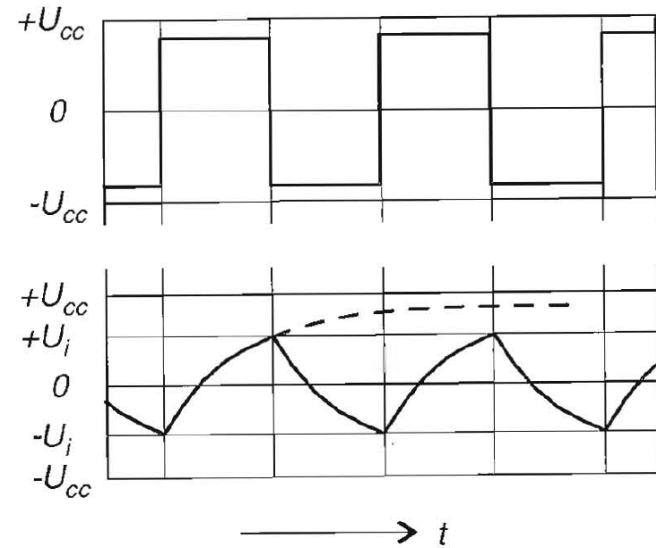


*Průběh napětí na výstupu (nahore) a na invertujícím vstupu (dole)
astabilního multivibrátoru*

Multivibrátor



Multivibrátor s OZ



Když U_i dosáhne $\pm U_n$ dojde k překlopení výstupu.

$$U_n = \pm U_s \frac{Ra}{Ra + Rb}$$

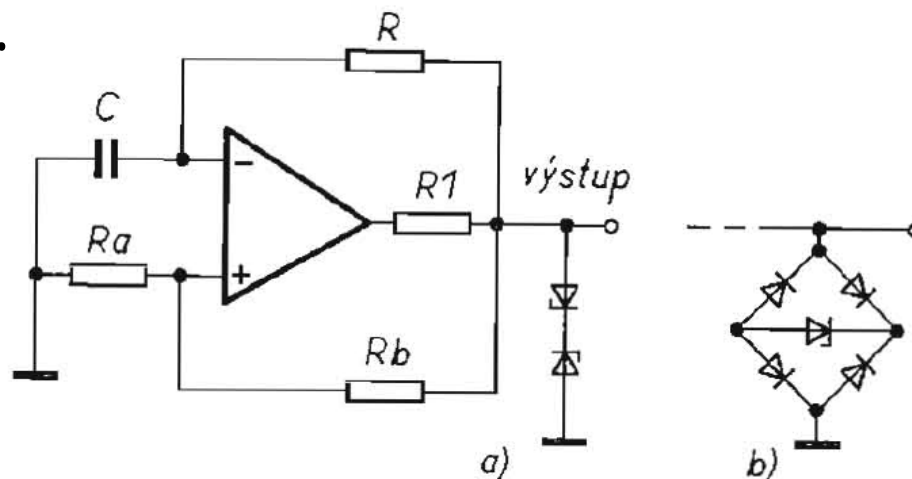
frekvence kmitů multivibrátoru je:

$$f = \frac{1}{2RC \ln(1 + \frac{2Ra}{Rb})}$$

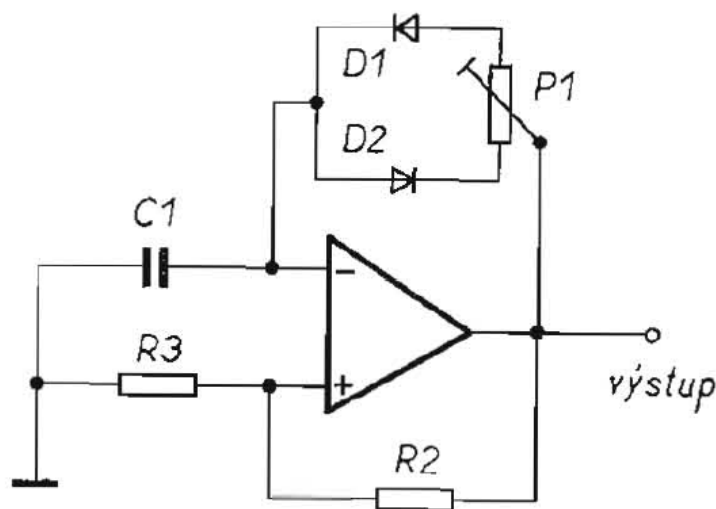
časová konstanta $\tau = RC$

Kmitočet je nezávislý na napájecím napětí, ale to musí být přesně symetrické.

Multivibrátor

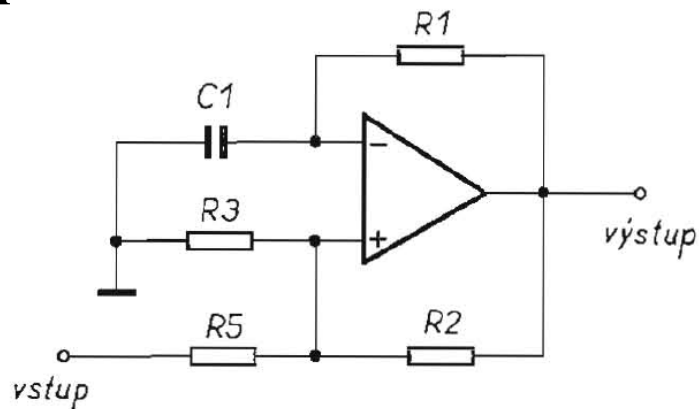


Stabilizace výstupního napětí multivibrátoru dvěma Zenerovými diodami (a) a diodovým můstkem se Zenerovou diodou (b)



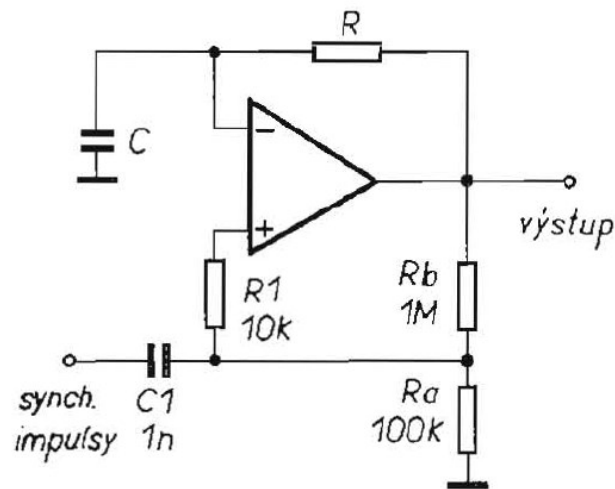
Astabilní multivibrátor s nastavitelnou střídou výstupního signálu

Multivibrátor



Zapojení multivibrátoru, u něhož lze měnit střidu vnějším napětím

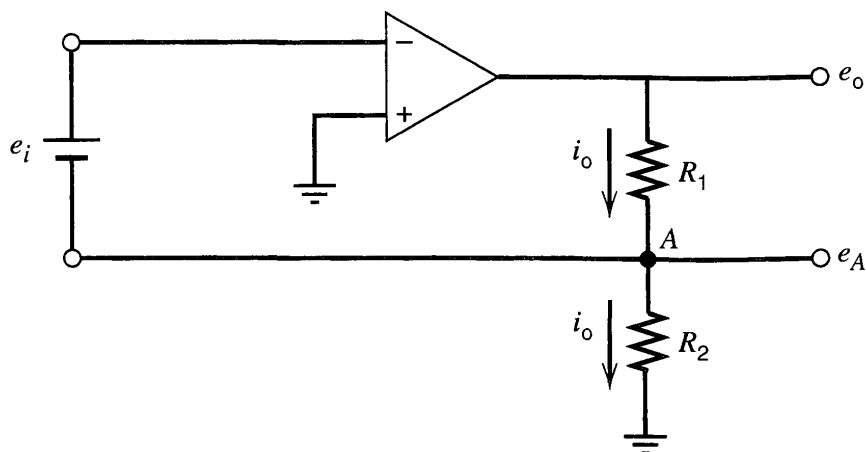
U tohoto zapojení se změnou střídý se mění i frekvence



Zapojení multivibrátoru synchronizovaného vnějším signálem

Potenciostat pro elektrochemická měření

Obvod, který kontroluje napětí v bodě A vůči zemi nezávisle na velikosti odporů R_1 a R_2 .

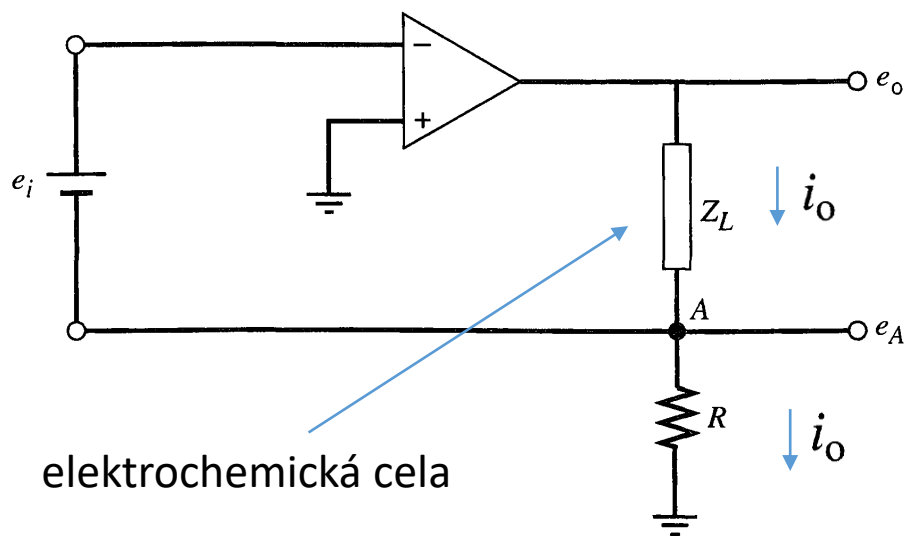


$$e_o = i_o(R_1 + R_2)$$

$$i_o = -e_i/R_2$$

$$e_o = -e_i \left(\frac{R_1 + R_2}{R_2} \right)$$

základní zapojení galvanostatu (obvod, který určuje proud zátěží Z_L nezávisle na její velikosti)

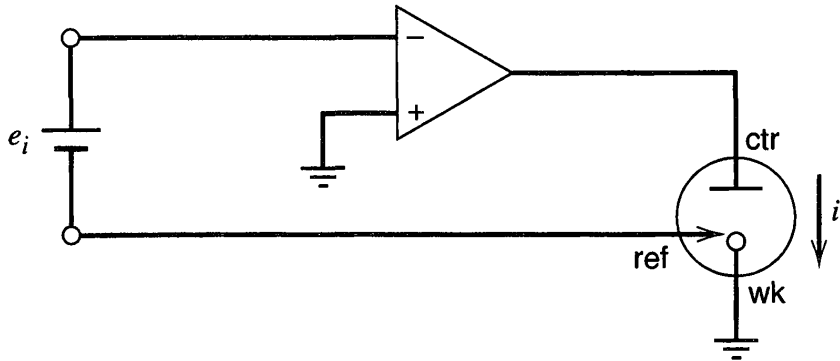


$$e_A = -e_i$$

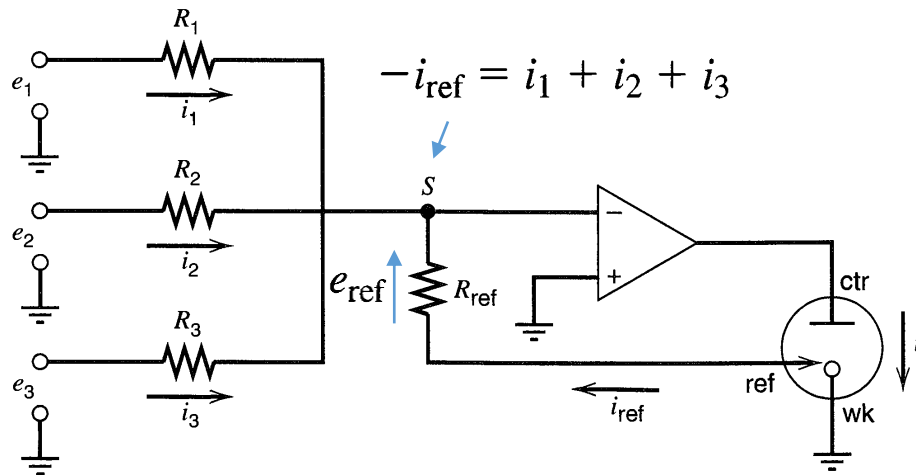
$$i_o = -e_i/R$$

elektrochemická cela

Potenciostat pro elektrochemická měření



Základní zapojení potenciostatu zajistí nulový proud referenční elektrodou a a definované napětí e_i mezi wk (pracovní elektrodou) a referenční elektrodou (ref)



S - je virtuální zem

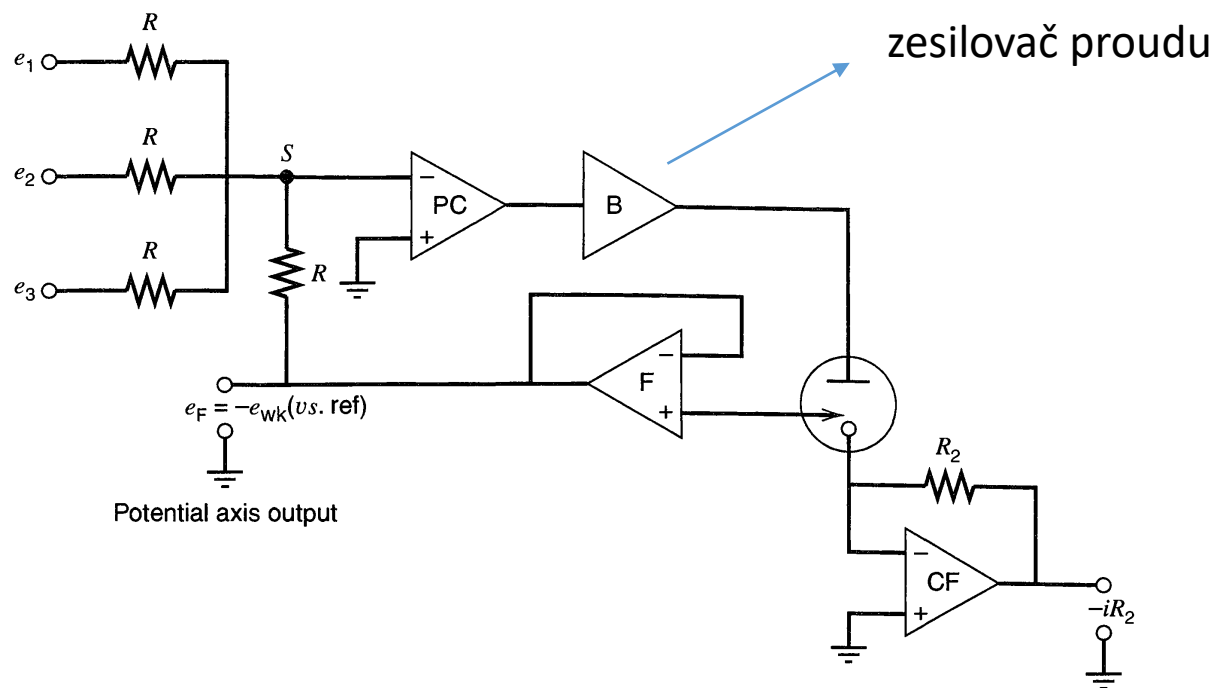
$$-e_{\text{ref}} = e_1 \left(\frac{R_{\text{ref}}}{R_1} \right) + e_2 \left(\frac{R_{\text{ref}}}{R_2} \right) + e_3 \left(\frac{R_{\text{ref}}}{R_3} \right)$$

Jestliže se $R_1=R_2=R_3=R_{\text{ref}}$ pak se potenciál pracovní elektrody e_{wk} vůči referenční elektrodě (ref) rovná:

$$e_{\text{wk}}(\text{vs. ref}) = e_1 + e_2 + e_3$$

Nevýhoda: velký proud i_{ref}

Potenciostat pro elektrochemická měření



Reálný potenciostat, kde proud referenční elektrodou je nula a lze měřit proud pracovní elektrodou a potenciál $e_{wk}(vs. ref)$

Literatura:

P. Neumann, J. Uhlíř, Elektronické obvody a funkční bloky 1, skriptum ČVUT (2005)

J. Belza, Operační zesilovače pro obyčejné smrtelníky, BEN, 2004.

P. Neumann, J. Uhlíř, Elektronické obvody a funkční bloky 2 skriptum ČVUT (2005)

J. Punčochář, Operační zesilovače v elektronice, BEN Technická literature Praha (2002).

P. Horowitz, W. Hill, The art of Electronics, Third edition, Cambridge University Press, 1980, 1989, 2015.

Donald A. Neamen, Microelectronics Circuit Analysis and Design, Published by McGraw-Hill (2010).