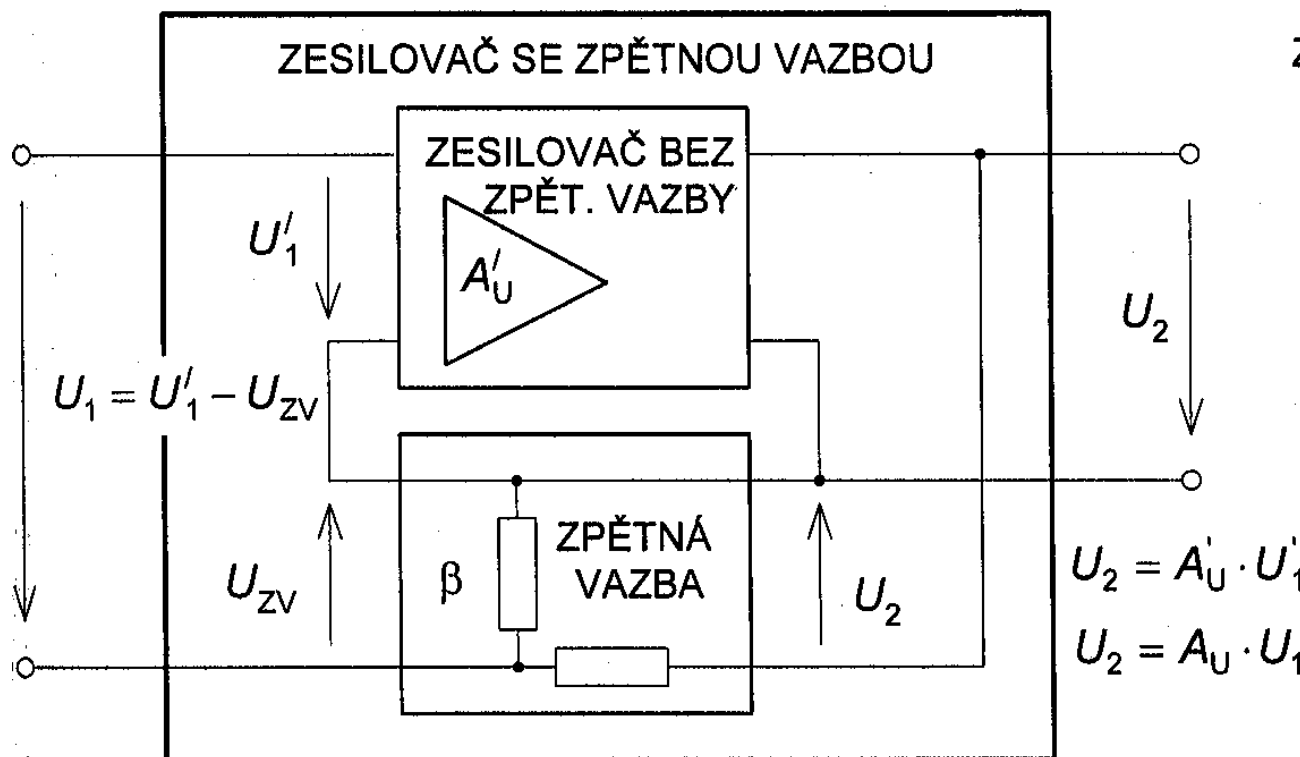
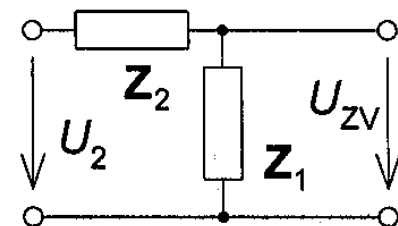


Zpětná vazba



ZPĚTNOVAZEBNÍ ČLEN

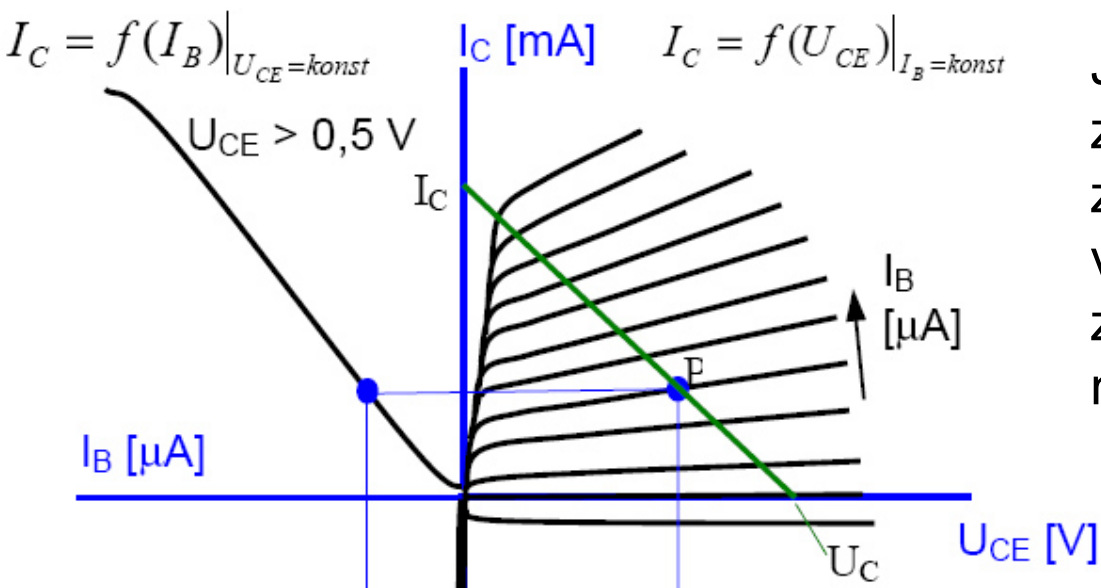


PŘENOS
ZPĚTNÉ
VAZBY

$$\beta = \frac{Z_1}{Z_1 + Z_2}$$

Zpětná vazba přivádí část výstupního signálu zpět na vstup. Kladná zp. vazba způsobuje nestabilitu, používá se vyjíměčně. Záporná zp. vazba (zmenšení vstupního signálu o část výstupního) omezuje zisk (zesílení).

Zpětná vazba a linearita zesílení

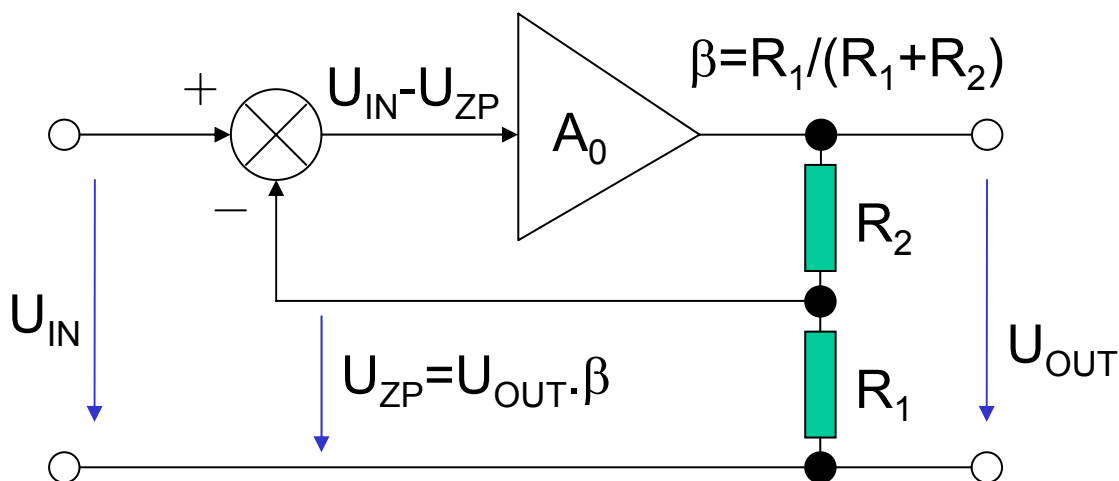


Jednoduchý tranzistorový zesilovač není příliš lineární, zesílení není konstantní pro různě velká napětí. To způsobuje zkreslení střídavého signálu, nebo chyby v měření.

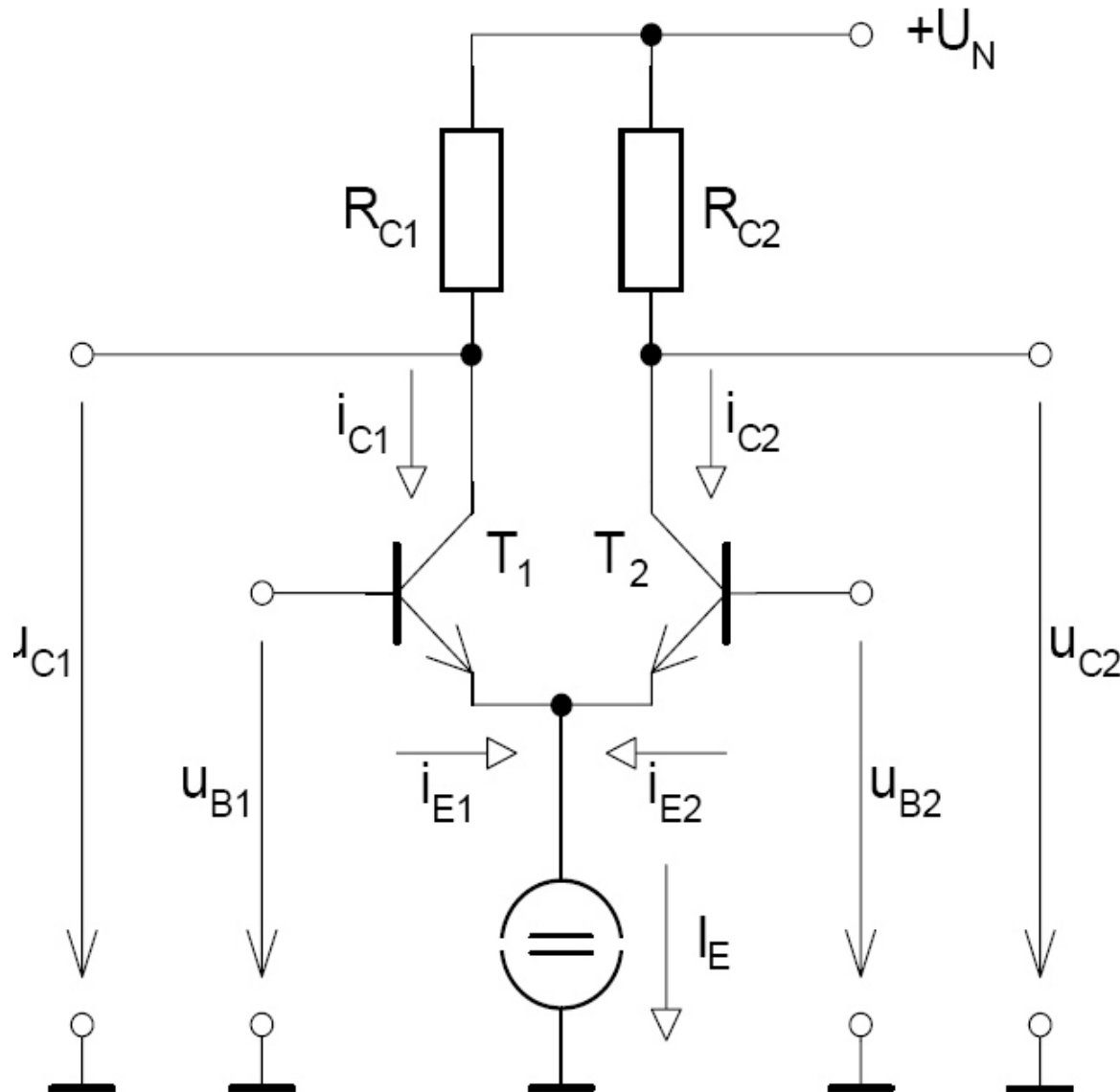
Zesilovač se zesílením A_0 a zpětnou vazbou β bude mít zesílení:

$$A = U_{OUT}/U_{IN} = A_0/(1-\beta A_0)$$

záporná zpětná vazba β omezí zesílení, ale potlačí nelinearitu zesilovače. Dělič R_1 , R_2 dělí přesně, lineárně.



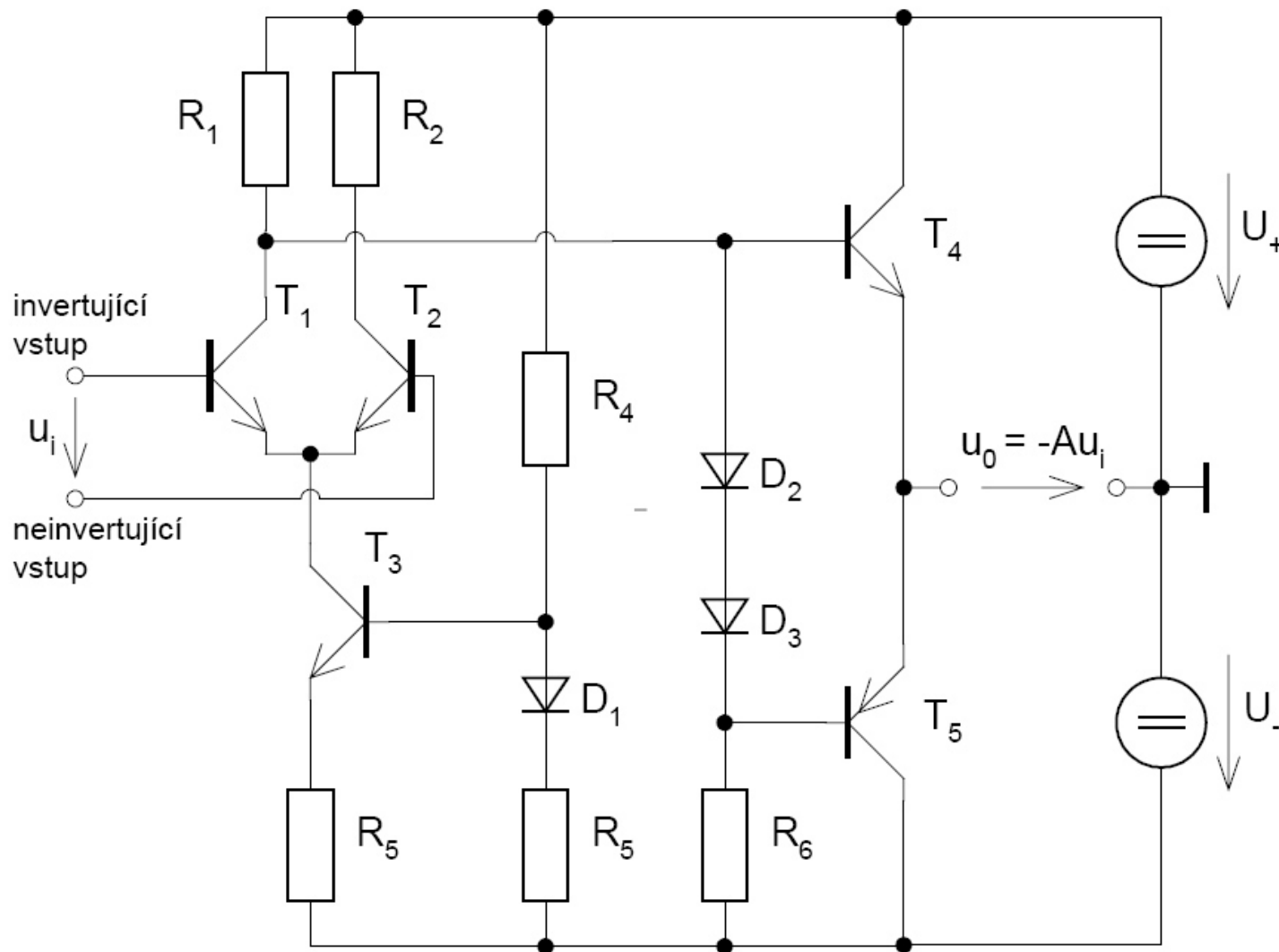
Operační zesilovač – diferenční zesilovač



Ideálně lineární zesilovač by měl tedy velké zesílení, které by se podle potřeby snadno omezilo přiměřenou zpětnou vazbou. Součástí takového zesilovače je také rozdílový člen – diferenční zesilovač.

Zapojení diferenčního zesilovače využívá dva tranzistory napájené z jednoho proudového zdroje, u_{C1} , resp. u_{C2} se změní jen porušením rovnováhy i_{C1} , i_{C2} .

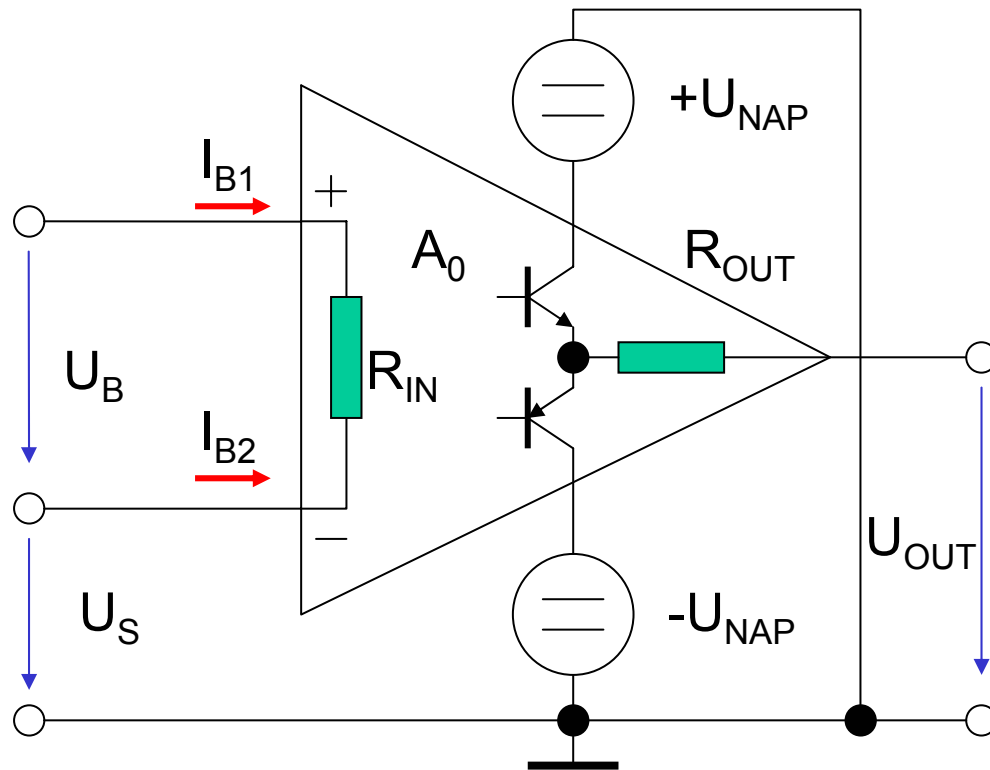
Operační zesilovač – základní vnitřní zapojení



Zesilovač s velkým zesílením a diferenčním zesilovačem na vstupu se nazývá „operační zesilovač“ (OZ). Je to nejuniverzálnější obvod analogové elektroniky a vyrábí se jich tisíce typů.

OZ má na vstupu rozdílový, diferenční stupeň, za ním následuje dvojice výstupních tranzistorů schopných přenášet kladná i záporná napětí. OZ se obvykle napájí ze „symetrického“ zdroje, zdroje kladného i záporného napětí.

Hlavní vlastnosti operačního zesilovače



Zesílení OZ A_0 je velké, obvykle větší, než 10^5 , i víc. V praxi jej můžeme považovat za nekonečné.

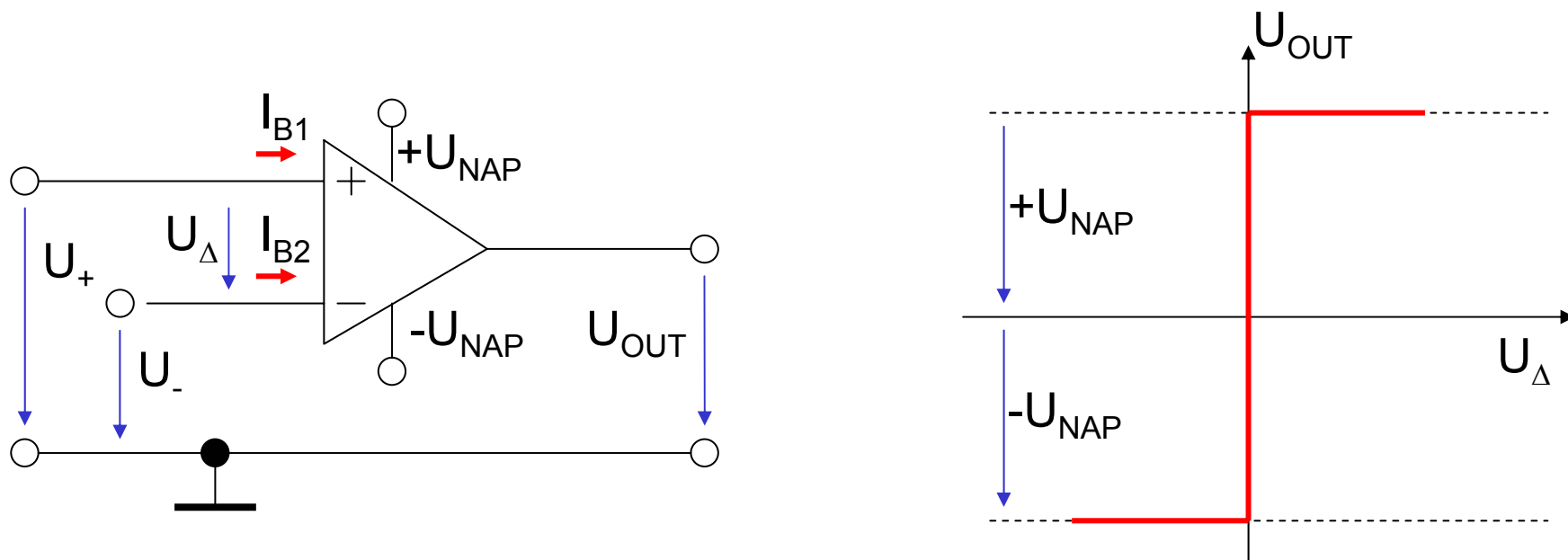
Vstupní proudy $I_{B1,2}$ jsou velmi malé, vstupní odpor R_{IN} tedy velmi velký. $I_{B1,2}$ můžeme považovat za prakticky nulové.

Výstupní odpor R_{OUT} je velmi malý, opět téměř nulový.

Vstupní napěťová nesymetrie udává, jaké napětí musí být mezi vstupy, aby na výstupu bylo nulové napětí. Je malá ($<1\text{mV}$), podle typu OZ.

OZ zesiluje **rozdíl** mezi vstupy. Tzv. „souhlasné“ napětí U_S by na U_{OUT} nemělo mít žádný vliv. U reálného OZ se tento vliv mírně projeví, nazývá se CMRR (Common Mode Rejection Ratio).

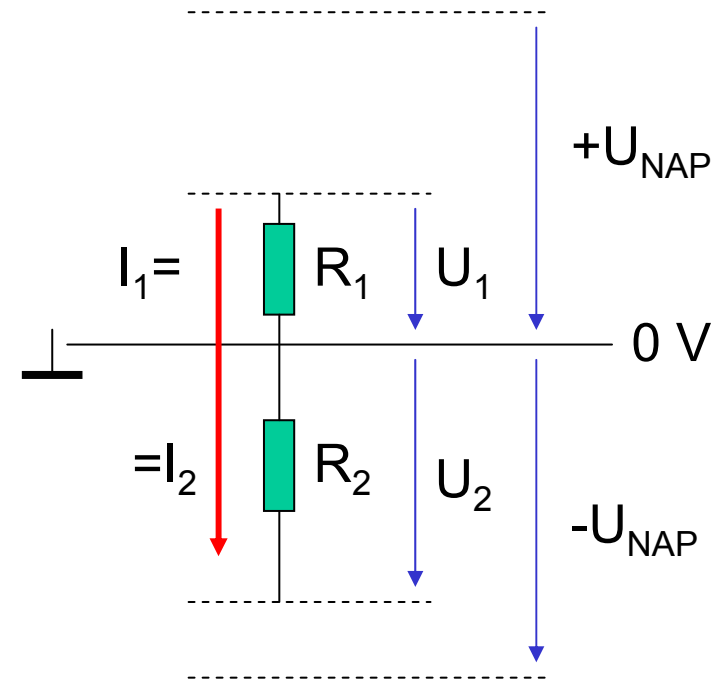
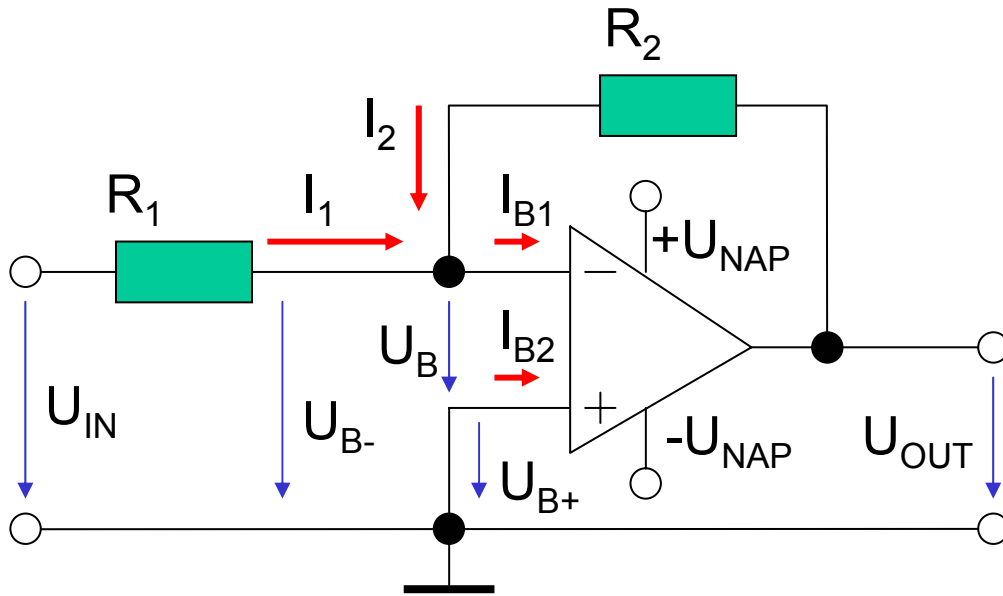
Operační zesilovač – komparátor



OZ bez zpětné vazby funguje jako komparátor. Nekonečně velké zesílení rozdílového napětí U_Δ způsobí, že je-li U_+ byť jen o malinko větší, než U_- , je tento rozdíl nekonečně krát zesílen. Výstupní napětí ale nemůže být nekonečně velké, je omezené hodnotou napájecího napětí. Mluvíme o tom, že OZ je v kladné saturaci. Je-li U_- větší, než U_+ , bude OZ v záporné saturaci.

To v praxi znamená, že OZ „rozhoduje“, které z napětí U_+ , U_- je větší, porovnává, komparuje. Proto komparátor. Vstupu označenému „+“ říkáme neinvertující, vstup „-“ invertující.

Invertující zapojení operačního zesilovače



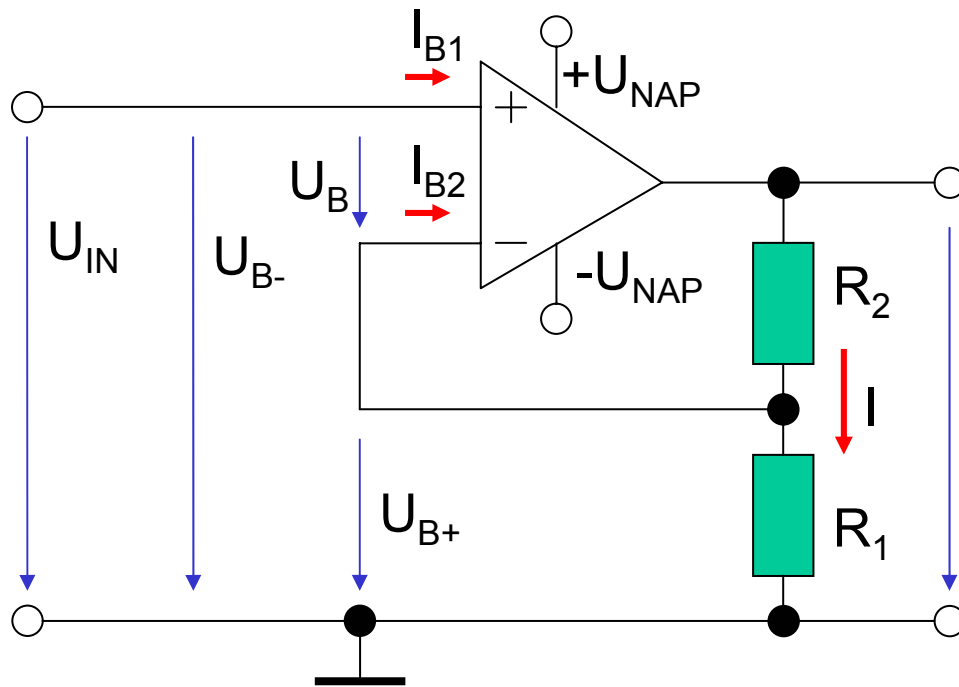
Základní zapojení OZ. Na zapojení se můžeme dívat proudově: Platí: $I_{B1}=I_{B2}=0$, Zesílení $A_0=\infty$, takže $U_B=0$. Z toho vycházíme.

Pak: $I_1=-I_2$ (neb do OZ nic neteče) neinvertující vstup je připojený na 0V, takže $U_{B+}=U_{B-}=0$.

Takže $U_{IN}/R_1 = -U_{OUT}/R_2 \Rightarrow A = -U_{OUT}/U_{IN} = -R_2/R_1$

Nebo napěťově: Na invertujícím vstupu je „virtuální nula“. Tím pádem vstupní a výstupní napětí se dělí na děliči R_1 a R_2 v příslušném poměru, takže:

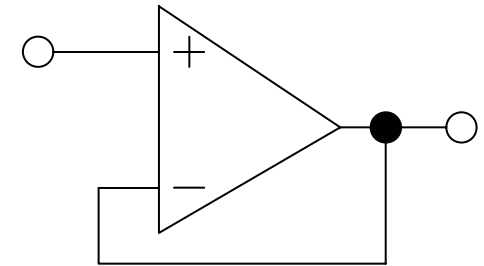
Neinvertující zapojení operačního zesilovače



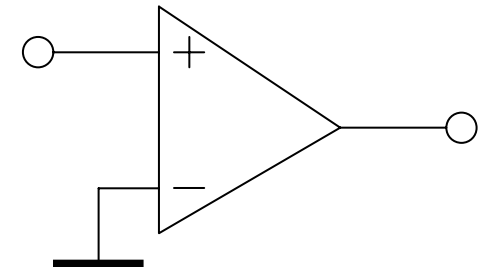
Další základní zapojení OZ: Podobně:
 $U_B=0$ (virtuální nula na vstupech), do
OZ nic neteče, $A_0=\infty$, takže zesílení
odpovídá dělicímu poměru děliče R_1 a
 R_2 : $U_{B+} = U_{IN}$; $I=U_{IN} \cdot R_1=U_{OUT} \cdot (R_1+R_2)$

$$A = U_{OUT}/U_{IN} = 1+R_2/R_1$$

$$R_2 = 0; R_1 = \infty; A_U = 1$$



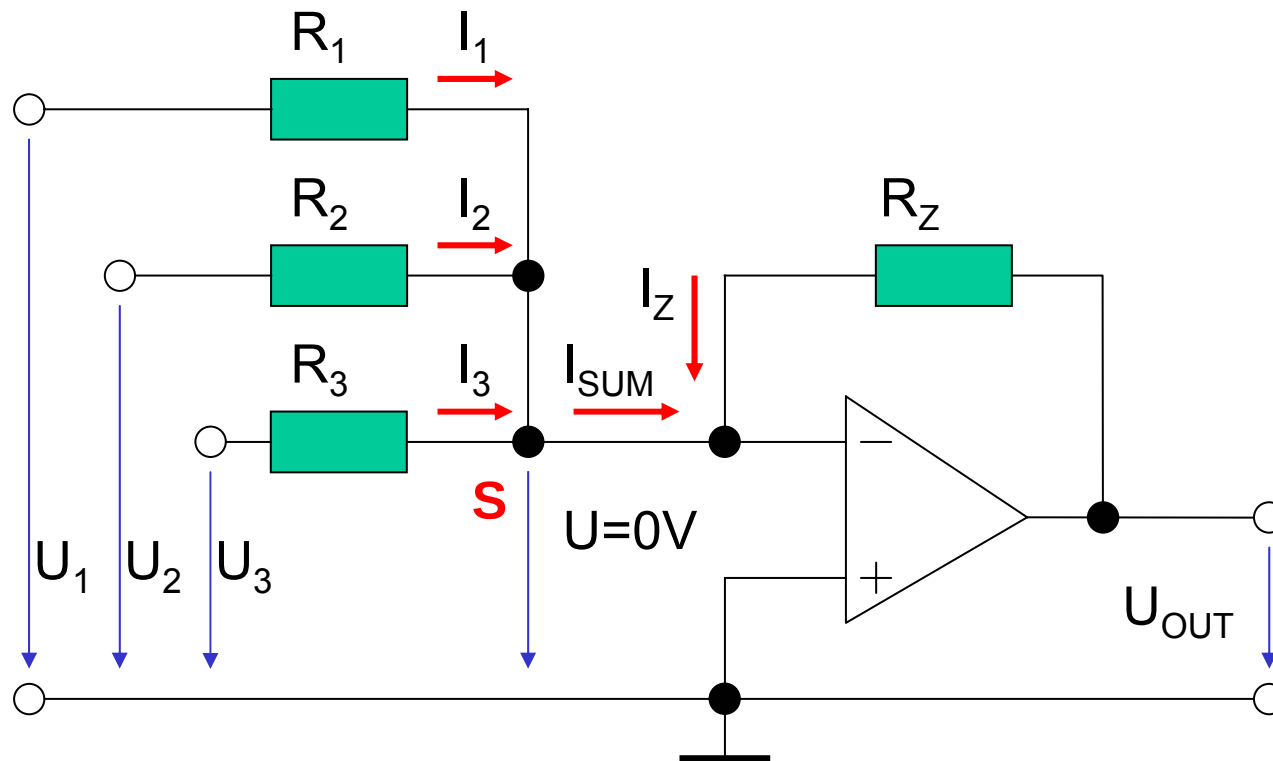
$$R_2 = \infty; R_1 = 0; A_U = \infty$$



Dva extrémní případy tohoto
zapojení: sledovač (zesílení 1) a
komparátor (zesílení ∞)

Neinvertující zapojení má téměř
nekonečný vstupní odpor –
nezatěžuje obvody před sebou.

Sumační zesilovač



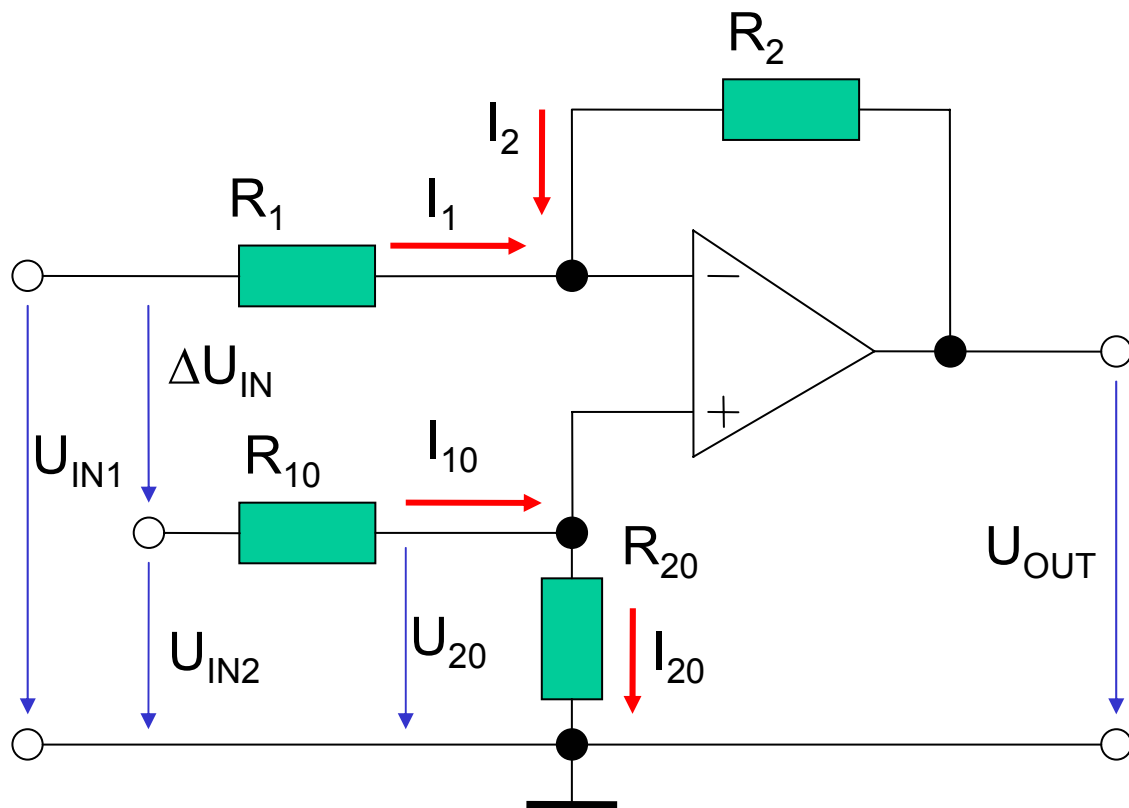
Variace na základní invertující zapojení: sumátor, obvod sčítající více napětí.

Proudový pohled: v sumačním bodě „S“ se sčítají proudy: $I_{\text{SUM}} = I_1 + I_2 + I_3 = -I_Z$
sumační bod „S“ je současně virtuální nulou: $U=0$, takže: $I_1 = U_1/R_1$, atd.

Odtud: $U_{\text{OUT}} = -R_Z(U_1/R_1 + U_2/R_2 + U_3/R_3)$

Zesílení pro jednotlivé vstupy pak budou: $A_1 = -R_Z/R_1$, atd.

Diferenční zesilovač



Kombinace invertujícího a neinvertujícího zapojení. Zesiluje rozdíl napětí U_{IN1} a U_{IN2} s konečným zesílením A_{Δ} .

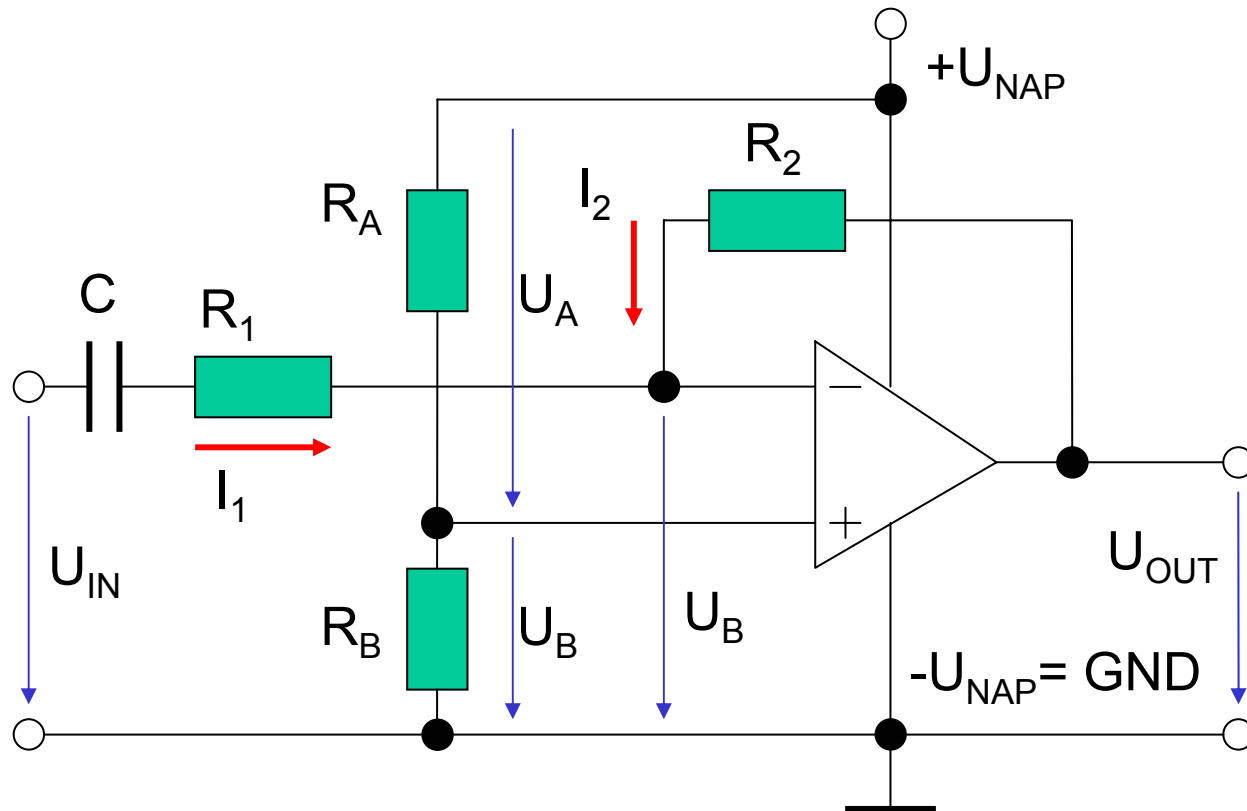
$$I_1 = -I_2, \text{ takže: } (U_{IN1} - U_{20}) / R_1 = -(U_{OUT} - U_{20}) / R_2$$

$$I_{10} = I_{20}, \text{ takže: } U_{IN2} / (R_{10} + R_{20}) = U_{20} / R_{20}$$

celé se to zjednoduší, když $R_1 = R_{10}$ a $R_2 = R_{20}$, čímž pádem:

$$U_{OUT} = (R_2 / R_1) \cdot (U_{IN1} - U_{IN2}) \Rightarrow \mathbf{A_{\Delta} = R_2 / R_1}$$

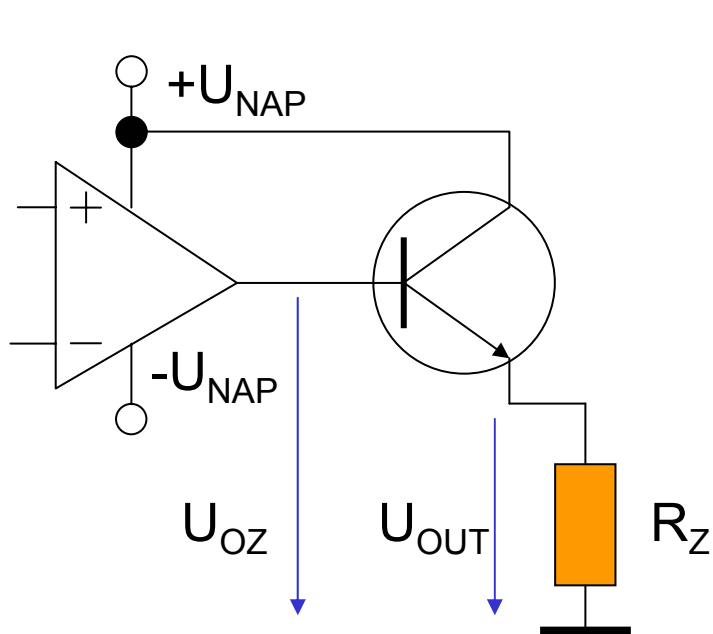
Střídavý zesilovač s unipolárním napájením



OZ lze použít i když není k dispozici symetrické napájení. Např. pro zesilování střídavých signálů, jako u tranzistorového zesilovače.

Děličem R_A a R_B vytvoříme pomocnou „nulu“, vlastně nastavíme pracovní bod zesilovače, obvykle na $\frac{1}{2}$ napájecího napětí U_{NAP} . Kondenzátorem C oddělíme střídavou složku, kterou pak můžeme zesilovat v max. rozkmitu daném napájecím napětím.

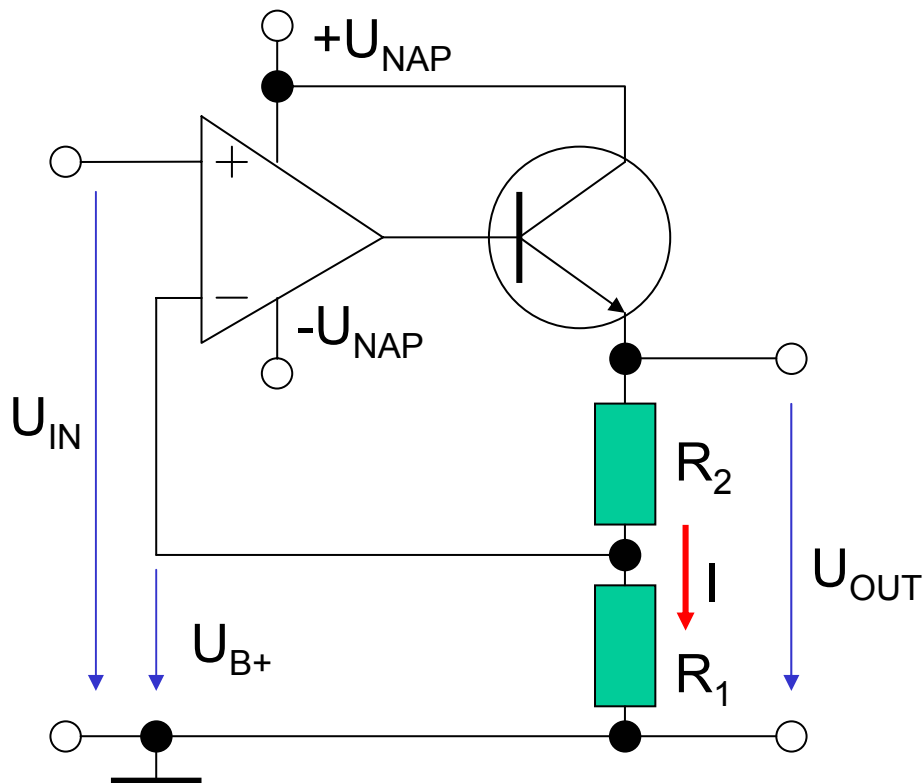
Posílení výstupního proudu



$$U_{OUT} = U_{OZ} - U_{BE} = U_{OZ} - 0,65V$$

Potřebujeme-li výstupem OZ napájet spotřebič vyžadující velké proudy, resp. výkony (topení, motor, ap.) lze posílit výstup OZ tranzistorem, obvykle emitorovým sledovačem.

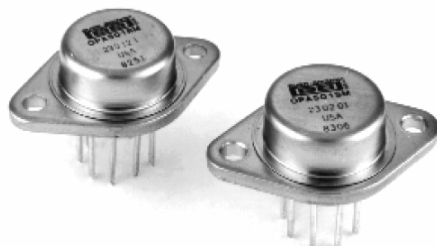
Nelinearity způsobené tranzistorem opět potlačí zpětná vazba, která překlene OZ i s tranzistorem.



Výkonové a vysokonapětové OZ



OPA 512
výkonový
OZ, až 15 A



OPA 501 výkonový
OZ, až 10 A



OPA 547 slabší
výkonový OZ, 0,5 A,
přesný, rychlý



3584 JM
vysokonapětový
OZ, až 150 V



OPA 549
výkonový
OZ, až 8 A,
rychlý

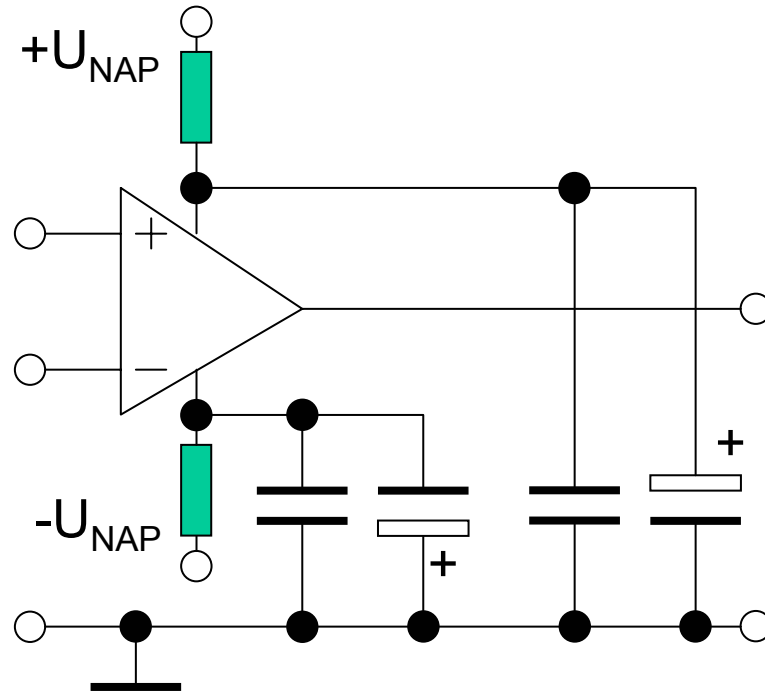
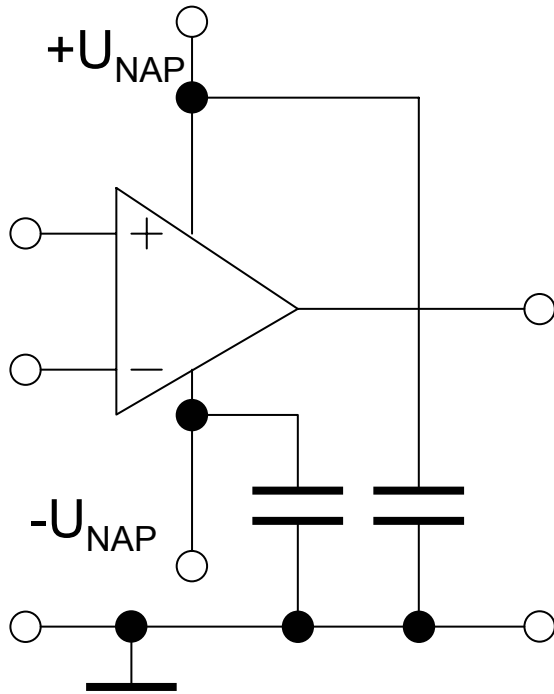
OZ se vyrábí i ve verzích pro velké proudy (až 15 A) i velká napětí (až ± 150 V) a představují konstrukčně jednoduché a ideální řešení výkonových zesilovačů. Nevýhodou je, že jsou obvykle poměrně drahé.

Chyby OZ a volba vhodného typu

Part#	# OpAmps per Pkg	Vos	-3dB Bandwidth	Slew Rate	Ib	Rail-Rail In	Rail-Rail Out	Vcc-Vee Supply (V)	Iq per Amplifier (max)	Packages	Price* (1000 pcs.)
Sort Parameter:	▼ ▲	▼ ▲	▼ ▲	▼ ▲	▼ ▲	▼ ▲	▼ ▲	▼ ▲	▼ ▲		
ADD8702	12	n/a	n/a	n/a	n/a	No	No	7 to 16	1.25mA	CSP	**
AD8628	1	1µV	2.5MHz	1V/µs	30pA	Yes	Yes	2.7 to 6	1.1mA	SOIC; SOT	\$0.95
AD8571	1	1µV	1.5MHz	400mV/µs	10pA	Yes	Yes	2.7 to 6	975µA	SOIC; SOP	\$1.00
AD8551	1	1µV	1.5MHz	0.4V/µs	10pA	Yes	Yes	2.7 to 6	975µA	SOIC; SOP	\$1.08
AD8630	4	1µV	2.5MHz	1V/µs	30pA	Yes	Yes	2.7 to 6	1.1mA	SOP	\$2.70
AD8538	1	5µV	600kHz	0.4V/µs	15pA	No	Yes	2.7 to 5.5	180µA	SOIC; SOT	\$0.89
AD8675	1	10µV	10MHz	2.5V/µs	0.5nA	No	Yes	10 to 36	2.9mA	SOIC; SOP	\$1.17
OP177	1	10µV	0.6MHz	0.3V/µs	1.2nA	No	No	6 to 36	2mA	DIP; SOIC	\$0.73
AD8603	1	12µV	400kHz	0.1V/µs	0.2pA	Yes	Yes	1.8 to 6	50µA	SOT	\$0.67
AD8676	2	12µV	10MHz	2.5V/µs	0.5nA	No	Yes	10 to 36	2.9mA	SOIC; SOP	\$1.64
OP1177	1	15µV	1.3MHz	700mV/µs	500pA	No	No	5 to 36	500µA	SOIC; SOP	\$0.80
OP777	1	20µV	700kHz	200mV/µs	5.5nA	No	Yes	3 to 36	350µA	SOIC; SOP	\$1.08

Vyráběné OZ se člení do skupin podle některého významného parametru, např.: vysokofrekvenční, přesné, s extrémně malými vstupními proudy, s nízkou spotřebou, nízkošumové ap. Volíme podle toho který parametr je v dané aplikaci nejdůležitější.

Napájení OZ a filtrace napájení



I když má OZ vysoký CMRR, kolísání napájecího napětí a rušivé signály šířící se po napájecích vodičích se projeví na výstupu. Je užitečné jim zamezit kondenzátorovým filtrem, alespoň keramickým C: 100 nF v obou větvích, nebo u zvláště citlivých aplikací kombinací keramického kondenzátoru a elektrolytického kondenzátoru a odporu – vznikne RC filtr, dolní propust, která filtruje vyšší kmitočty.