

LINEÁRNE (ANALÓGOVÉ) INTEGROVANÉ OBVODY

Spracovávajú spojité signály v reálnom čase,
výstupná informácia je analogická vstupnej

Medzi LIO patria:

Operačné zosilňovače(OZ)

Analógovo-digitálne prevodníky (ADP)

Digitálno- analógové-prevodníky (DAP)

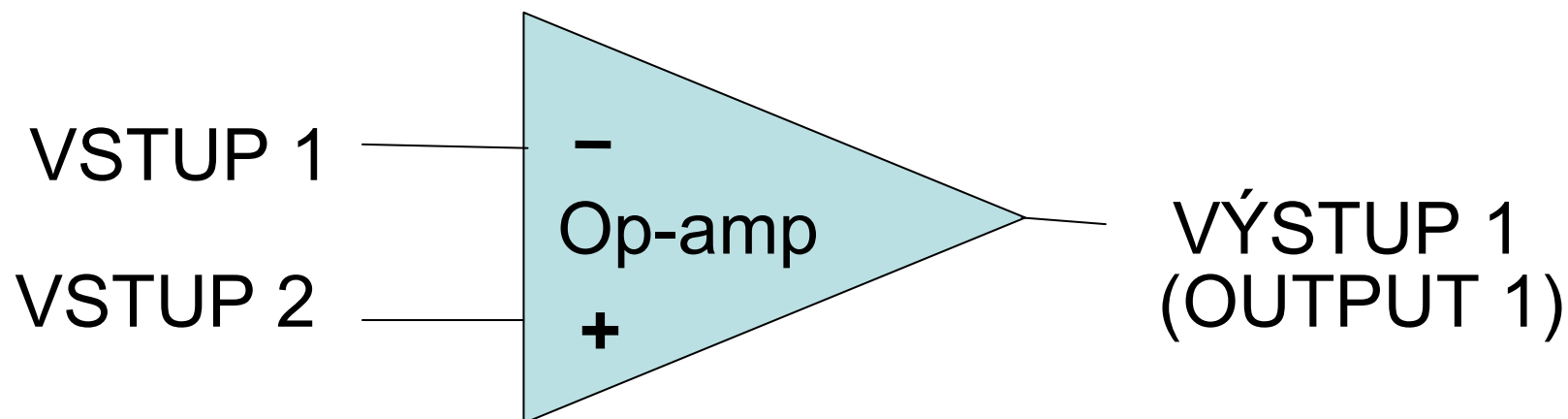
Integrované komparátory

Integrované stabilizátory prúdu a napätia

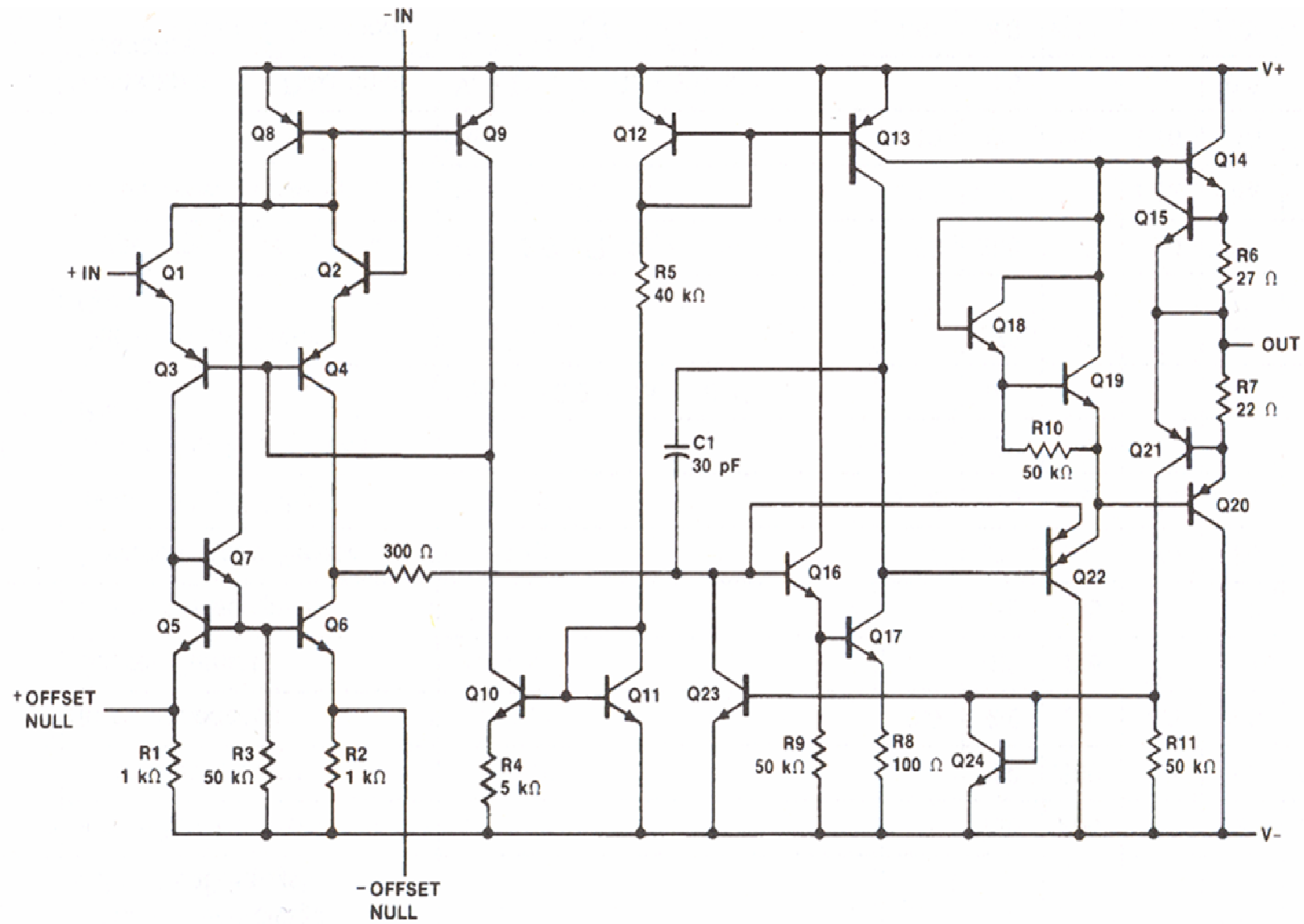
Násobičky

OPERAČNÝ ZOSILŇOVAČ

Poznámka: Zosilňovač-obvod zvyšujúci úroveň signálu, pri zachovaní jeho presného tvaru.



MAA 741



Základné obvody (bloky) v OZ

1. Jeden alebo viac kaskád, stupňov základných DZ
2. Jsm.obvody na potlačenie offsetov, nastavenie $U_o=0$
3. Kompenzačný obvod na potlačenie oscilácií
4. Nízkoimpedančný výstup (emitorový sledovač)

Integrovaná forma obvodu!!! Veľa tranzistorov pracuje vo funkcii aktívnej zaťaže a prúdových zdrojov.

OPERAČNÝ ZOSILŇOVAČ

Operačný zosilňovač (OZ), (angl. op-amp) je lineárny jednosmerný aj striedavý diferenciálny zosilňovač s veľmi vysokým zosilnením (ziskom), s vysokou hodnotou vstupného odporu (impedancie) a nízkou hodnotou výstupného odporu (impedancie).

Má dva vstupy a väčšinou jeden výstup.

Invertujúci vstup OZ otáča fázu o 180° .

Neinvertujúci vstup má vstupné napätie vo fáze s výstupom.

OZ je vysoko odolný voči rušivým signálom a pracuje stabilne. so spätnou väzbou v obvode

Základné vlastnosti OZ

Veľké zosilnenie	ideálny OZ nekonečné
Veľký vstupný odpor	ideálny OZ nekonečný
Malý výstupný odpor	ideálny OZ nulový
Široký frekvenčný rozsah	ideálny OZ nekonečný

Charakteristickou vlastnosťou OZ je jeho veľká citlivosť na rozdiel vstupných napätí a necitlivosť k absolútnej hodnote týchto napätí

Prenosové vlastnosti obvodov s OZ závisia takmer len od prvkov obvodu spätnej väzby

Bežne vyrábané OZ majú vstupný odpor $50\text{k}\Omega$ - $2\text{M}\Omega$,

výstupný odpor 50 - 150Ω

a zosilnenie od 10^4 do 10^8 .

Rozdiel vstupných napätí $U_d = \pm 15\text{V}$, ak $U_{CC} = \pm 15\text{V}$.

$$U_d \leq U_{CC}$$

Využitie OZ je veľmi široké

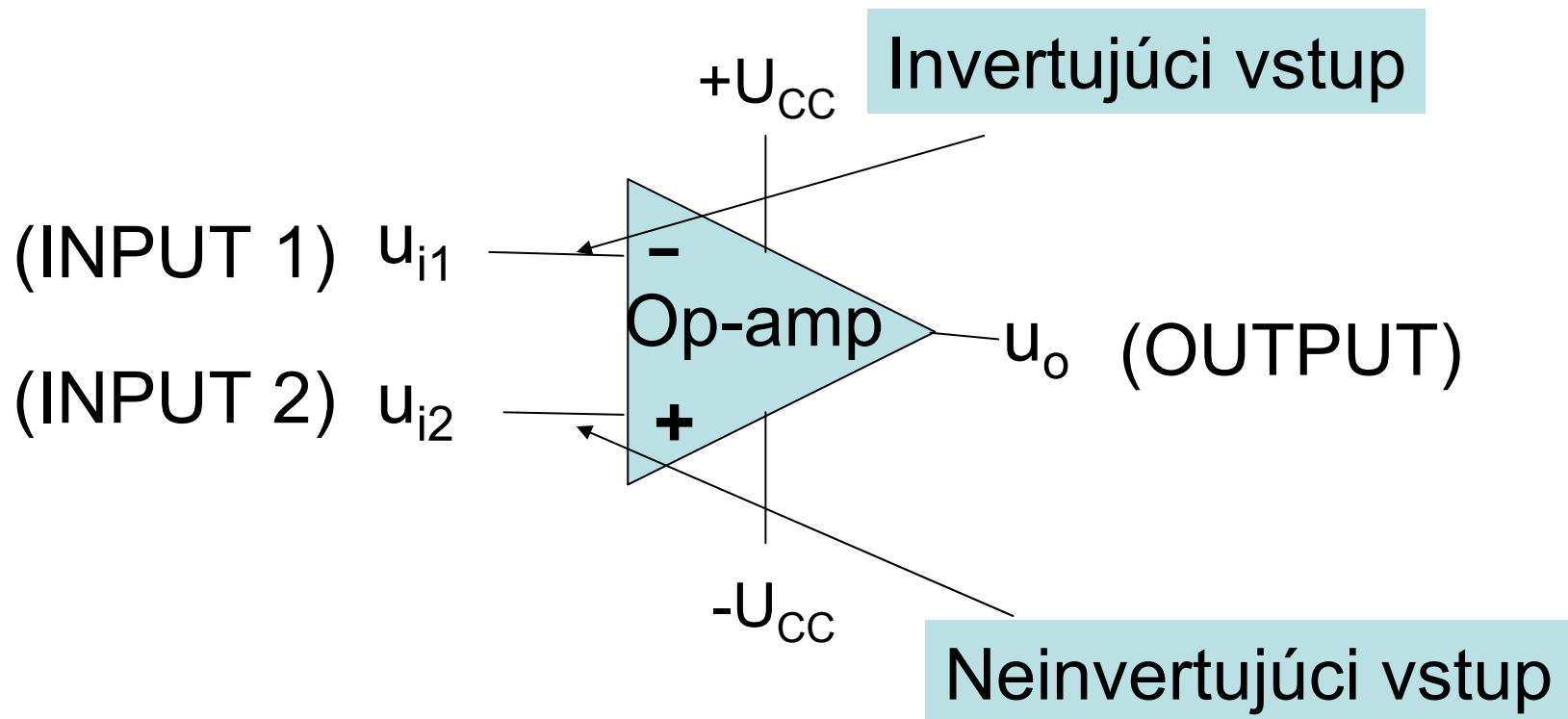
- v procesoch operačných sietí na vykonávanie základných matematických operácií ako integrátory, sčítačky, derivátory
- v meracej technike na priame meranie základných elektrických veličín,
- na úpravu meraných hodnôt a na generovanie rôznych tvarových signálov,
- na zmeny amplitúdy a polarity napätia,
- ako prevodníky napätia a prúdu, komparátory
- v regulačných obvodoch, vyskytujú sa tu
- v meracích a v korekčných výkonových členoch

Oscilátory

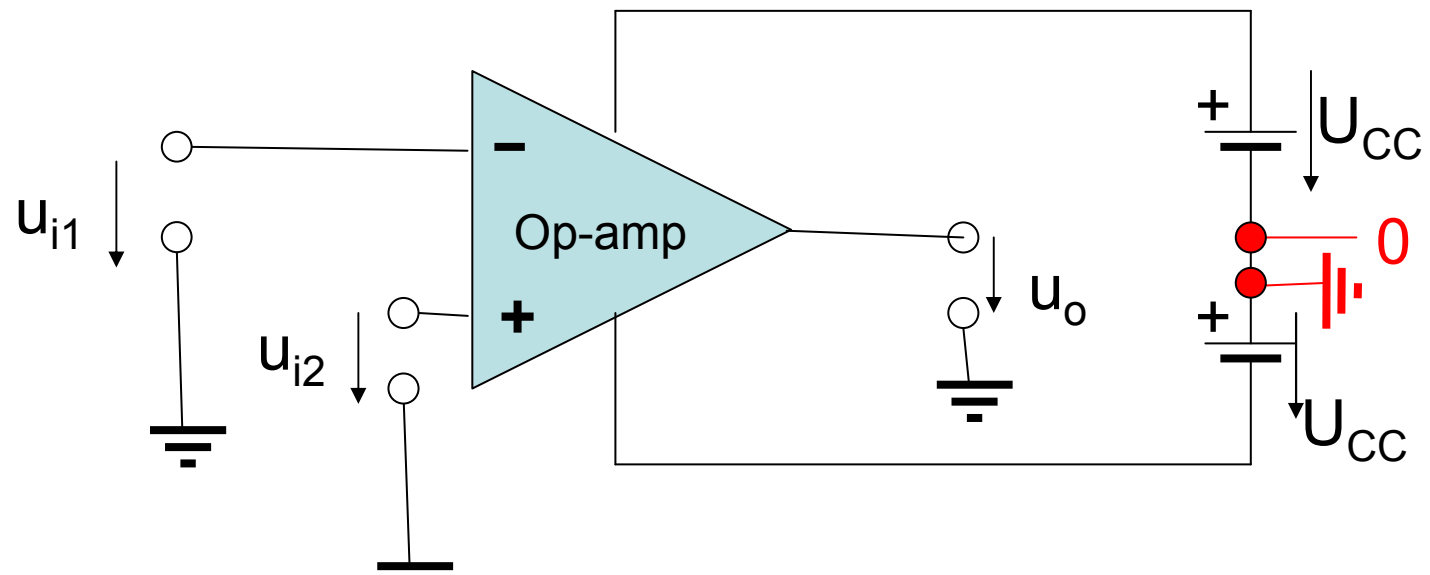
Aktívne filtre

Základný obvod využíva diferenciálny zosilňovač s dvoma vstupmi (invertujúci a neinvertujúci) a najmenej s jedným výstupom.

Symbolická značka OZ:



Symbolická schéma OZ s napájaním :



U_{CC} je jsm., symetrické napájacie napätie

Všetky vstupné a výstupné napätia sa vzťahujú na
vstupné napätie (čo môže byť jsm. alebo) striedavých
napájacích zdrojov

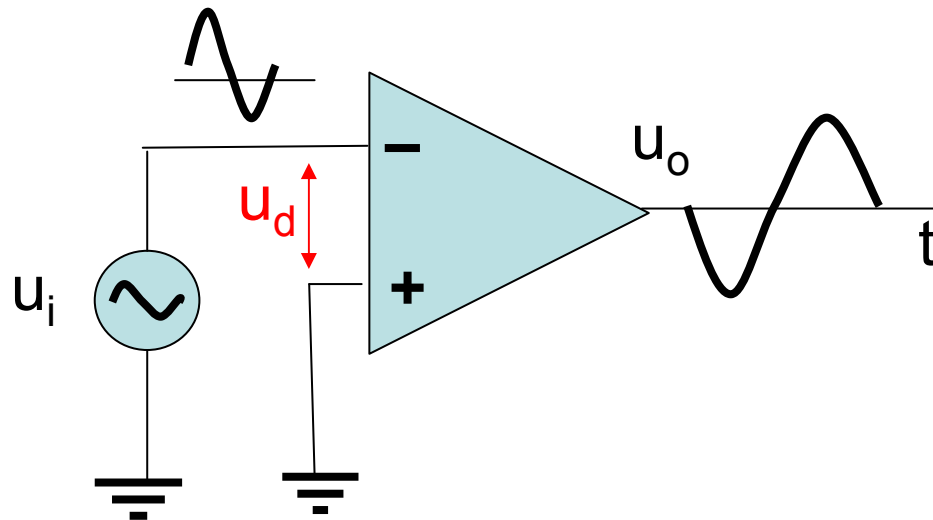
Význam zapojenia vstupných napätí

**Keďže vstupný obvod OZ tvorí
diferenciálny zosilňovač,
OZ zosilňuje len rozdielové alebo
diferenčné vstupné napätie**

**Zosilnenie OZ bude závisieť od spôsobu
pripojenia signálov na vstupy OZ a od ich
polarity,
podľa toho rozlišujeme **diferenciálny
vstup a súhlasný vstup****

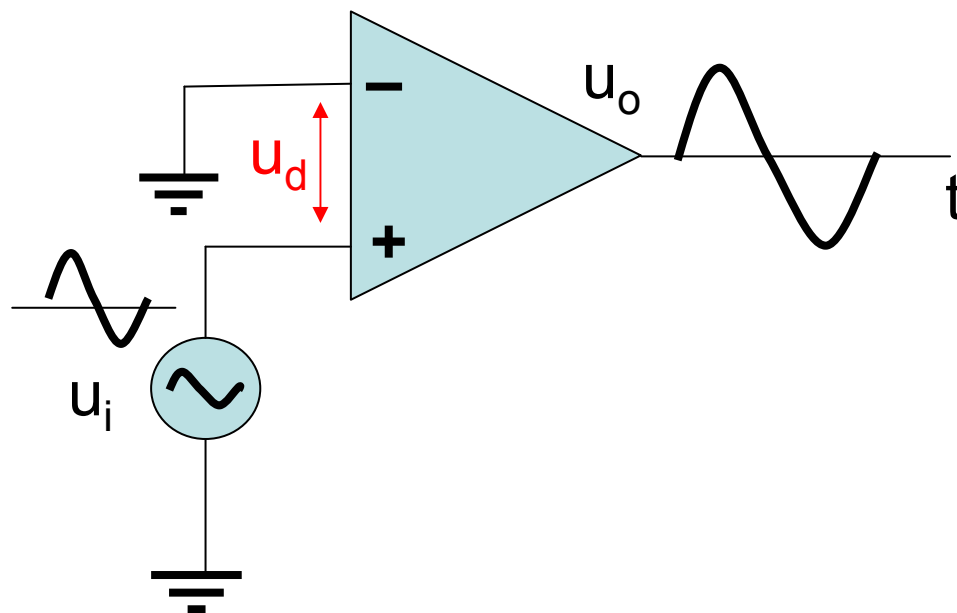
Príklady

1. Vstupný signál pripojený na zápornom vstupe, kladný vstup je uzemnený



Výstupný signál je opačnej polarity ako vstupný

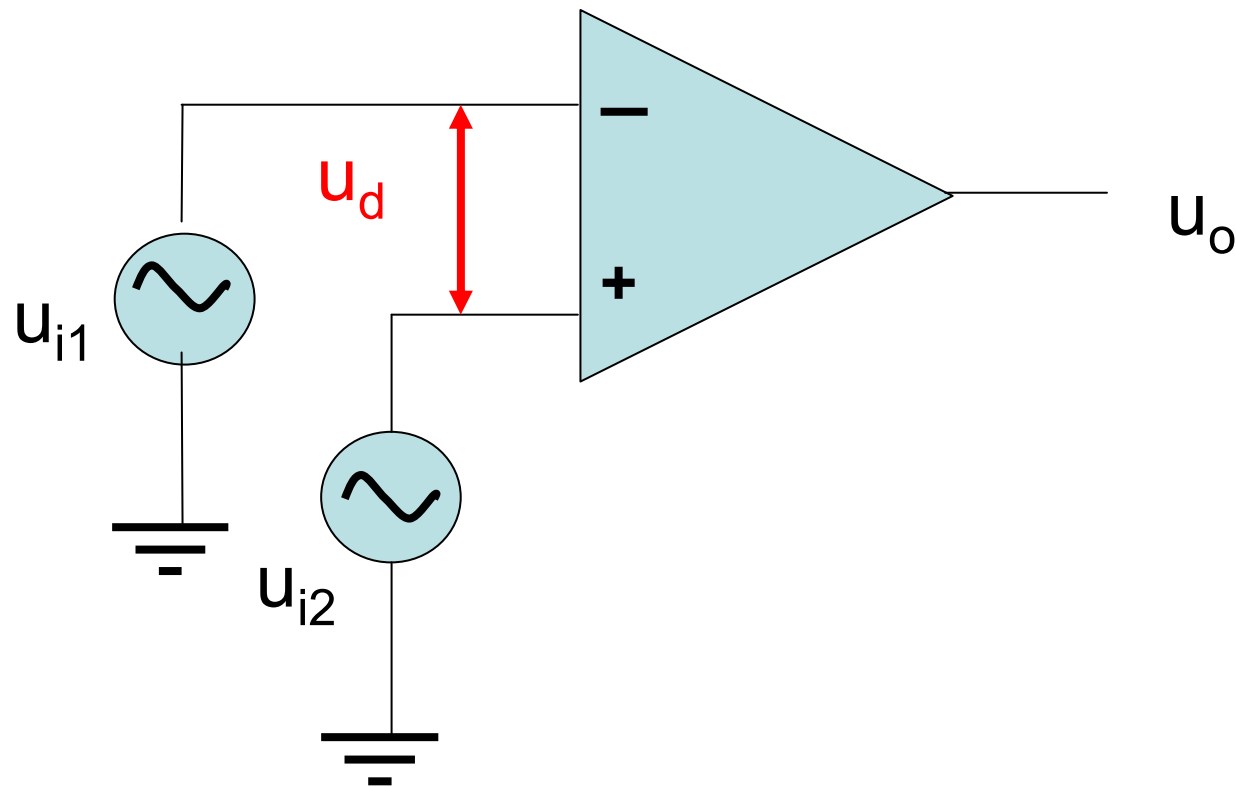
2. Vstupný signál pripojený na kladnom vstupe, záporný vstup je uzemnený



Výstupný signál je rovnakej polarity ako vstupný signál

3. Diferenciálny vstup, dve separátne napätia na vstupoch

$$u_d = u_{i1} - u_{i2}$$

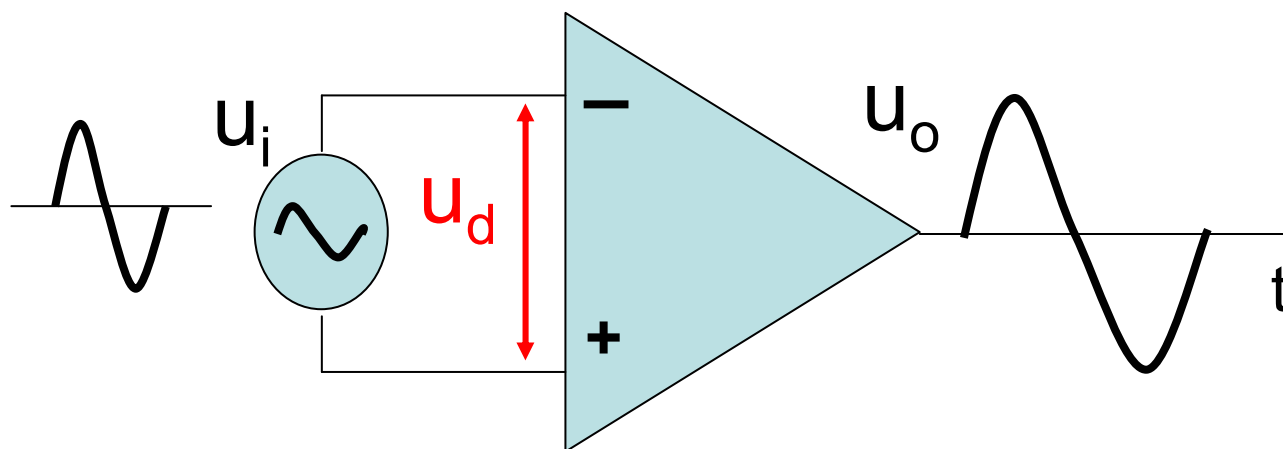


3a. Jednoduchý diferenciální vstup

nerovnaká polarita $\Rightarrow u_{i1} = -u_{i2} = u_i$

Ak $u_{i1} = -u_{i2} = u_i \Rightarrow \mathbf{u_d} = u_i - (-u_i) = 2u_i$

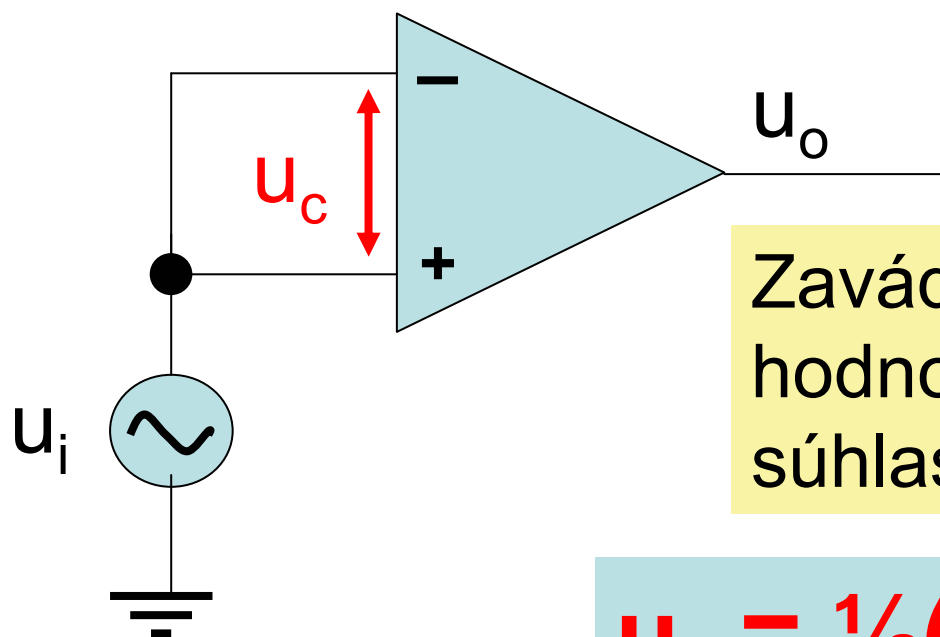
$\Rightarrow$ OZ zosilňuje diferenciu $\Rightarrow \mathbf{u_d}$



3b. Operačný zosilňovač so súhlasným signálom na vstupe Common-mode operation

rovnaká polarita, jeden zdroj $\Rightarrow u_{i1} = u_{i2} = u_i$

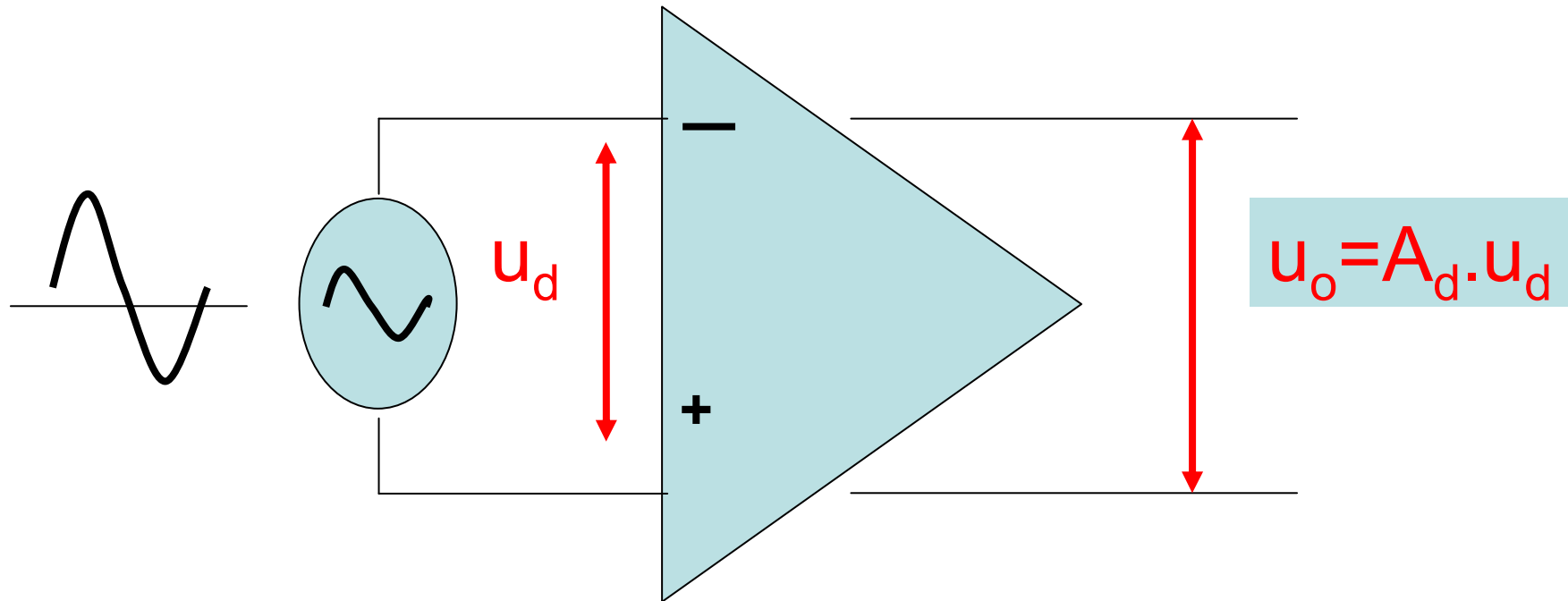
Ak $u_{i1} = u_{i2} = u_i \Rightarrow u_d = u_{i1} - u_{i2} = u_i - u_i = 0$
 $\Rightarrow$ OZ nezosilňuje



Zavádzame pojem stredná hodnota vstupného súhlasného signálu

$$u_c = \frac{1}{2}(u_{i1} + u_{i2})$$

4. Operačný zosilňovač s dvojitém výstupom, Diferenciálny vstup, diferenciálny výstup



Ideálny a reálny operačný zosilňovač (IOZ a ROZ)

Analýza zapojenia s OZ sa porovnáva s parametrami ideálneho OZ.

Veľkosť odchýlky určuje kvalitu OZ.

Vlastnosti OZ charakterizuje prevodová charakteristika

Zosilnenie OZ

Jednosmerné diferenčné zosilnenie OZ - A_d
definujeme ako pomer zmeny výstupného napätia
naprázdno (bez obvodu spätnej väzby) a zmeny
jednosmerného vstupného diferenčného napätia

$$A_d = \frac{dU_o}{dU_d}$$

$$\text{IOZ} \Rightarrow A_d = \infty \quad \text{ROZ} \Rightarrow A_d = 10^4 - 10^8$$

Výstupné napätie OZ

Kedže na vstupoch sú rôzne signály, dá sa výstupné napätie všeobecne vyjadriť vzťahom:

Pre striedavé signály

$$u_o = A_d u_d + A_c u_c$$

u_d je diferenciálne napätie na vstupoch

u_c je súhlasné napätie na vstupoch

A_d je diferenciálne zosilnenie (zisk) zosilňovača

A_c je zosilnenie pri súhlasnom signále na vstupe ($A_c < A_d$)

Pre jednosmerné signály

$$U_o = A_d U_d + A_c U_c$$

V prípade **rôzne veľkých** vstupných signálov (diferenciálny signál)

$$U_o = A_d U_d \quad U_c = 0$$

Signály môžu mať aj opačnú polaritu

V prípade **rovnako veľkých** a aj rovnako polarizovaných vstupných signálov (súhlasné signály)

$$U_o = A_c U_c \quad U_d = 0$$

Ak poznáme parametre vstupov(u_i, U_i) a výstupov(u_o, U_o) (získané napr. meraním), môžeme vypočítať zosilnenie OZ.

Zosilnenie diferenčného vstupu je omnoho väčšie ako súhlasného vstupu.

Definujeme parameter:

Činiteľ **potlačenia** súhlasného signálu

Common Mode Rejection Ratio

$$CMRR = \frac{A_d}{A_c}$$

$$CMRR_{(\log)} = 20 \log_{10} \frac{A_d}{A_c} \quad [\text{dB}]$$

Ideálny OZ	CMRR je nekonečné
Reálny OZ	CMRR= 10^4 - 10^8

Úpravou rovnice

$$U_o = A_d U_d + A_c U_c$$

a využitím rovnice

$$CMRR = \frac{A_d}{A_c}$$

$$U_o = A_d U_d \left(1 + \frac{1}{CMRR} \frac{U_c}{U_d} \right)$$

Tento vzťah hovorí, že čím väčšie CMRR, tým lepšia činnosť OZ, uplatňuje sa zosilnenie A_d . Tiež hovorí, že rovnaké signály OZ nezosilňuje, diferenčné áno

Vstupný offset a drift OZ

Offset, odchýlka – nežiadúci, parazitný signál na vstupe ROZ, generovaný v obvode ROZ, ktorý môže zmeniť výstup ROZ.

Drift – jeho teplotná, časová nestálosť, aj vplyv zmeny U_{CC} .

Nežiadúcim signálom môže byť:

a-zvyškové napätie

⇒ **napäťová nesymetria, U_{i0}** na vstupe OZ

b-zvyškové kludové prúdy

⇒ **prúdová nesymetria, I_{i0}** na vstupe OZ

Napät'ová nesymetria vstupov OZ je napätie, ktoré sa musí priviesť medzi vstupné svorky + a -, aby výstupné napätie bolo nulové.

Prúdová nesymetria vstupov OZ je rozdiel prúdov do obidvoch vstupov, ak je výstupné napätie nulové.

Vstupný klúdový prúd OZ je stredná hodnota jsm. prúdov tečúcich medzi vstupnými svorkami a zemou pri nulovom vstupnom signále.

Vstupný napät'ový rozsah OZ je rozsah vstupných napätí, v ktorom má OZ špecifikované funkčné vlastnosti.

Vstupný diferenčný odpor OZ je odpor medzi jedným vstupom a druhým uzemneným vstupom.

Napät'ové zosilnenie OZ pri otvorenej spätnoväzobnej slučke je napät'ové zosilnenie definované pre predpísanú záťaž, napájacie napätie a maximálny prípustný neskreslený signál pri kompenzovanej napät'ovej nesymetrii vstupov.

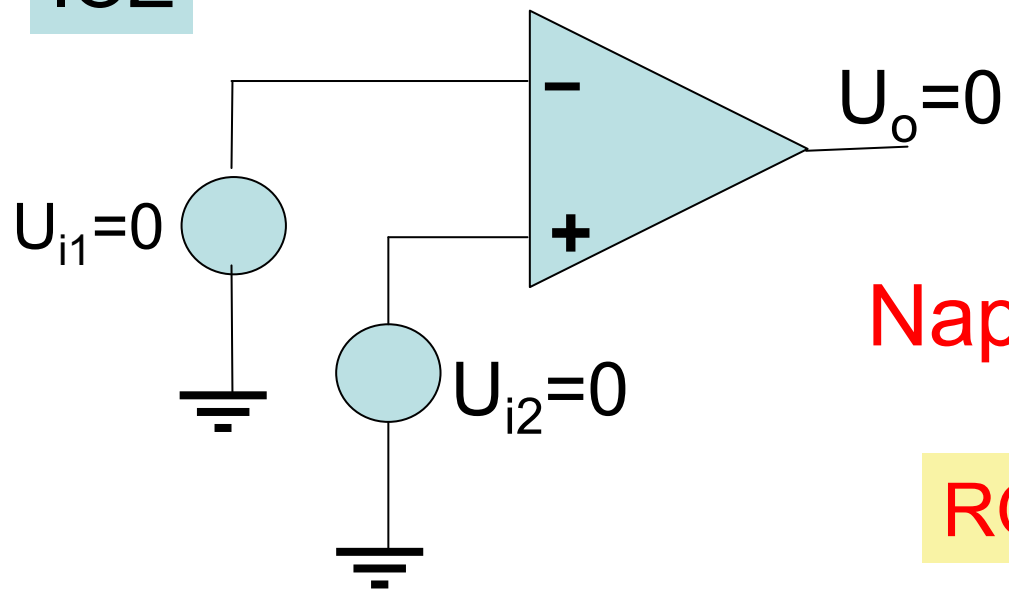
Prechodová charakteristika je odozva OZ na skokové napätie privedené na vstup pri uzatvorenej spätnoväzobnej slučke.

Na prechodovej charakteristike sa definuje doba nábežnej hrany výstupného impulzu, čo je doba potrebná na zväčšenie výstupného napätia z 10 na 90% ustálenej veľkosti.

Maximálna dovolená výkonová strata je maximálny výkon, ktorý môže OZ dodať do určenej záťaže pri špecifikovanom napájacom napätí, pričom sa nesmie nedovolené zvýšiť teplota OZ.

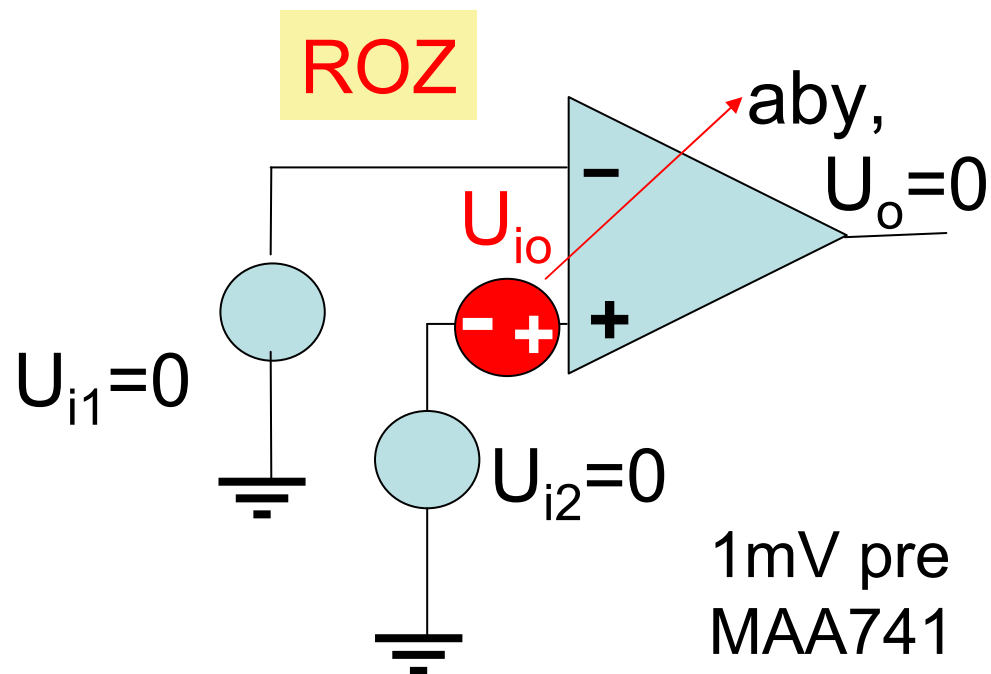
Príkion OZ je jednosmerný príkon dodávaný do obidvoch vetví napájania, potrebný ku činnosti OZ pri nulovom výstupnom napätí, bez záťaže a pri danej teplote.

IOZ

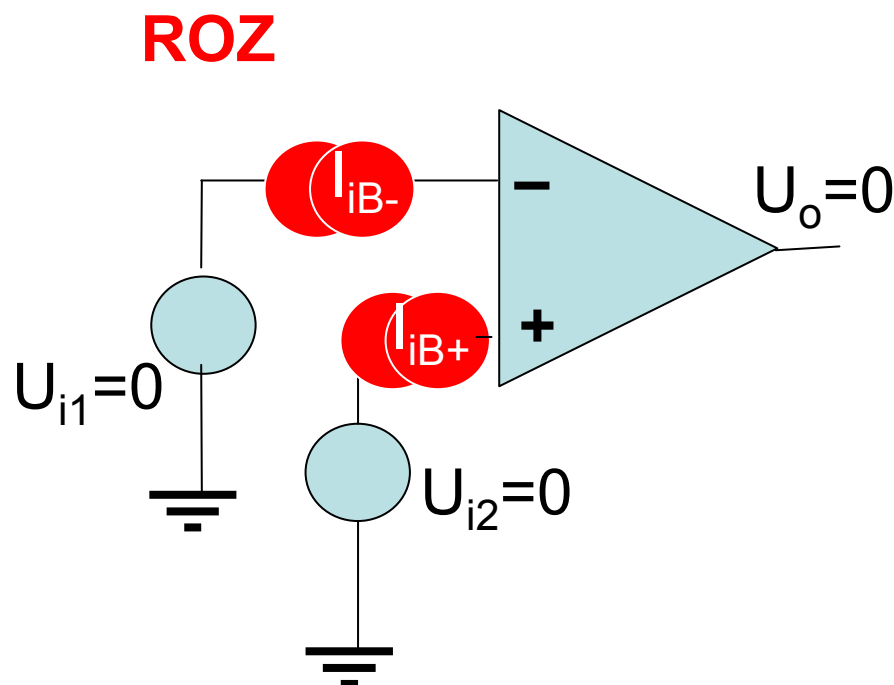
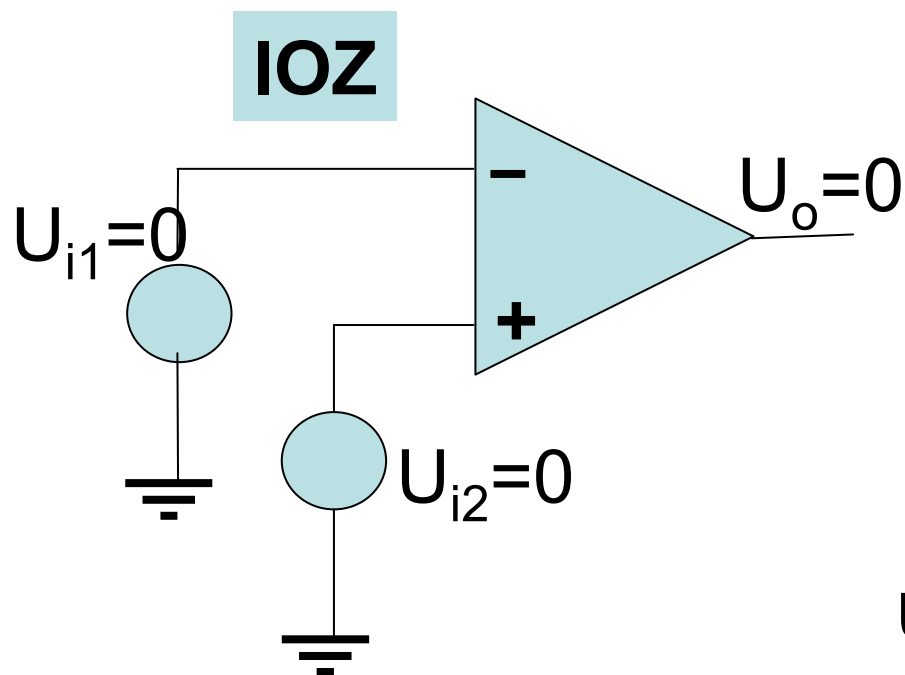


Napät'ová nesymetria, U_{io}

ROZ



1mV pre
MAA741



Stredná hodnota
vstupných kľudových
prúdov

$$I_{iB} = (I_{iB+} + I_{iB-}) / 2 \quad U_i = 0$$

prúdová nesymetria, I_{io}

$$I_{io} = |I_{iB+} - I_{iB-}| \quad U_i = 0$$

Hodnoty nesymetrických napätí a prúdov pre MAA 741 (pre 25°C)

Napät'ová nesymetria, $U_{i0} = 1\text{mV} - 5\text{mV}$

Prúdová nesymetria, $I_{i0} = 20\text{nA} - 200\text{nA}$

Stredná hodnota vstupných kludových prúdov
 $I_{iB} = 80\text{nA} - 500\text{nA}$

Napät'ovú nesymetriu vstupov, vstupné kludové prúdy a prúdovú nesymetriu nazývame **offset** operačného zosilňovača. Teplotnú nestálosť offsetu označujeme ako **drift** operačného zosilňovača.

Vstupné odpory

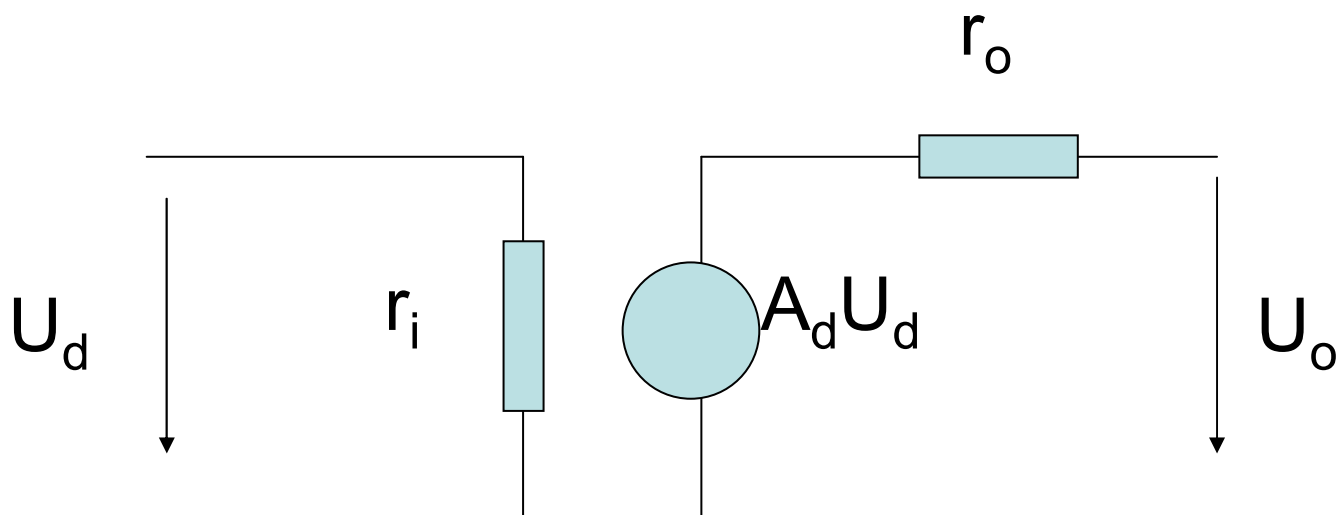
r_d diferenčný vstupný odpor (bez uvažovania spätnej väzby)

r_c súhlasný vstupný odpor (bez uvažovania spätnej väzby)

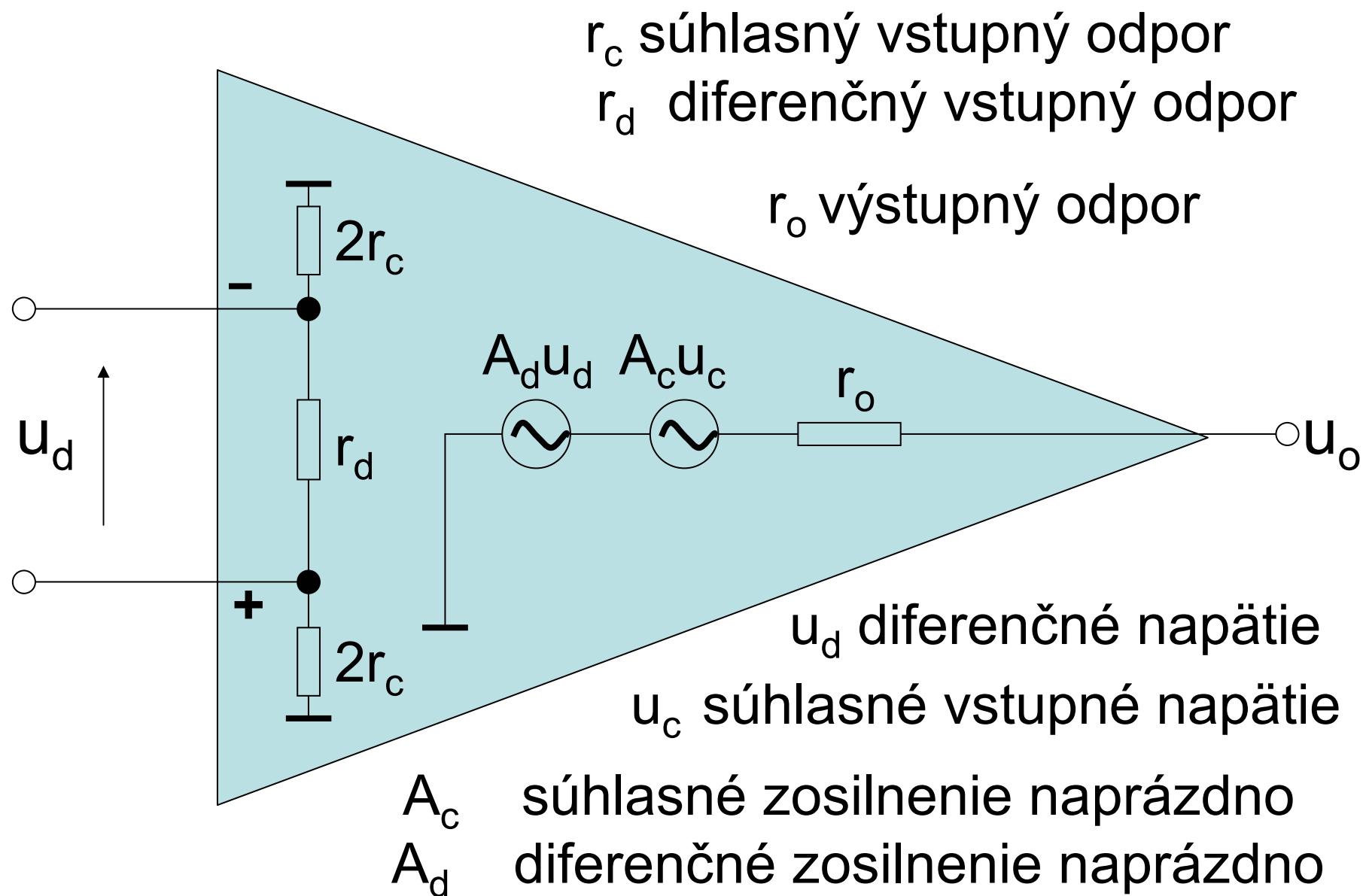
Výstupný odpor

r_o výstupný odpor (bez uvažovania spätnej väzby)

Zjednodušená náhradná schéma ROZ:

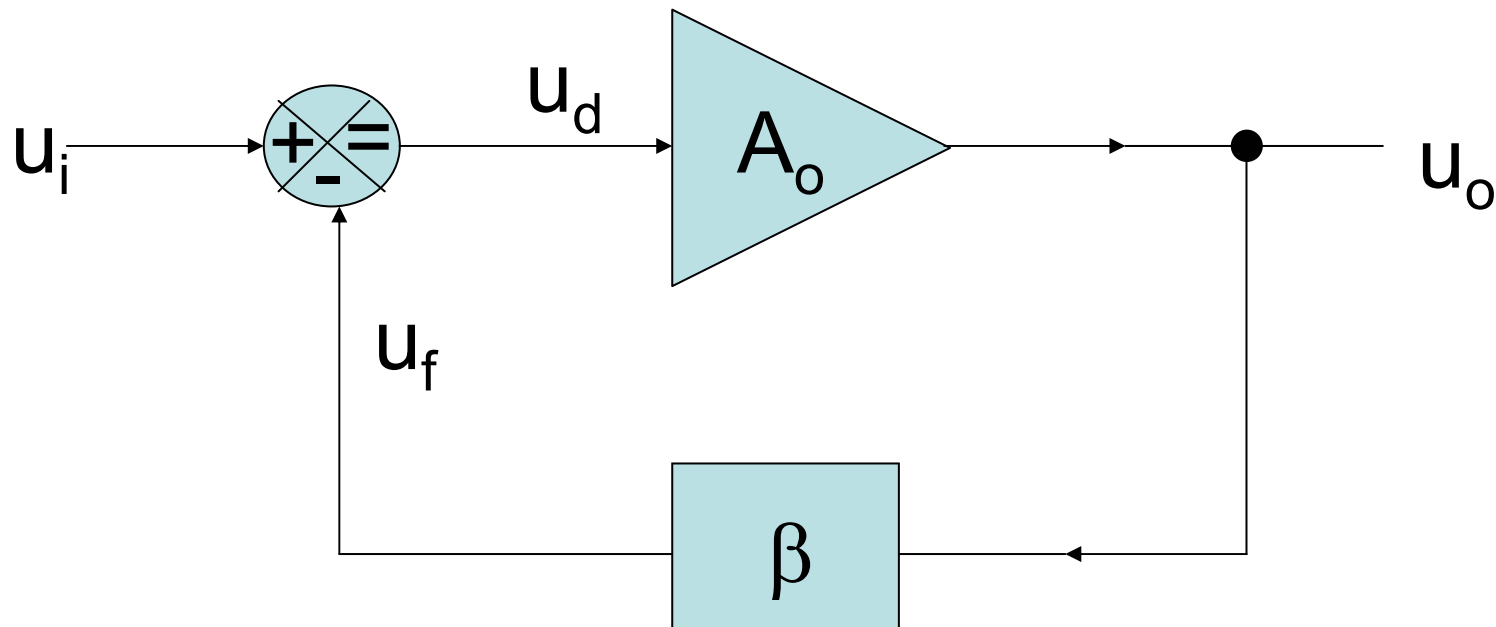


Celková náhradná schéma ROZ:



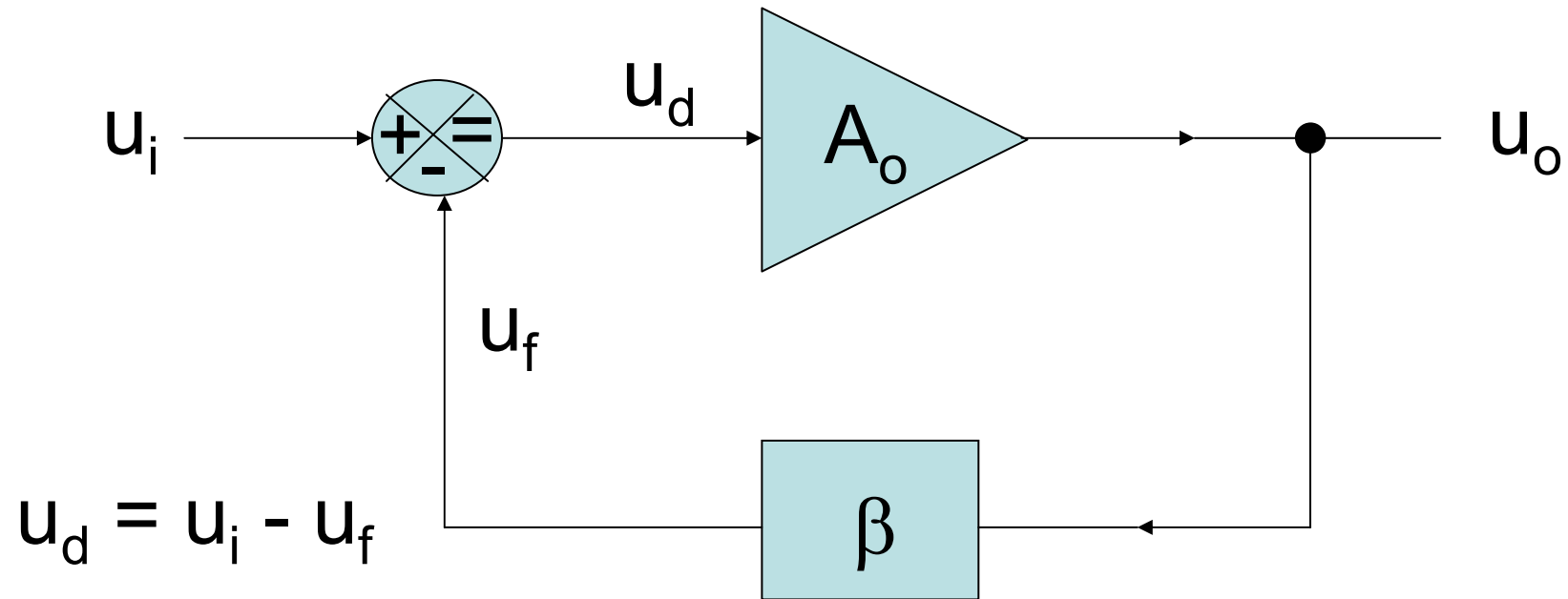
OZ v zapojení so spätnou väzbou

Bloková schéma zápornej spätnej väzby



A_o zosilnenie bez spätnej väzby

β prenosová konštanta



$$u_d = u_i - u_f$$

$$u_o = A_o u_d$$

$$u_f = \beta u_o$$

$$u_d = u_i - \beta u_o$$

$$u_o = A_o(u_i - \beta u_o) = A_o u_i - A_o \beta u_o \Rightarrow$$

$$u_o(1 + A_o \beta) = A_o u_i$$

ak

$$A_{CL} = \frac{u_o}{u_i}$$

je zosilnenie OZ so
spätnou väzbou (**C**losed
Loop)

potom

$$A_{CLO} = \frac{A_o}{1 + A_o \beta}$$

βA_o je zisk slučky

Slučka síce znižuje zosilnenie, ale stabilizuje obvod,
zmenšuje skreslenie signálu, zmenšuje šum.

Frekvenčné vlastnosti OZ

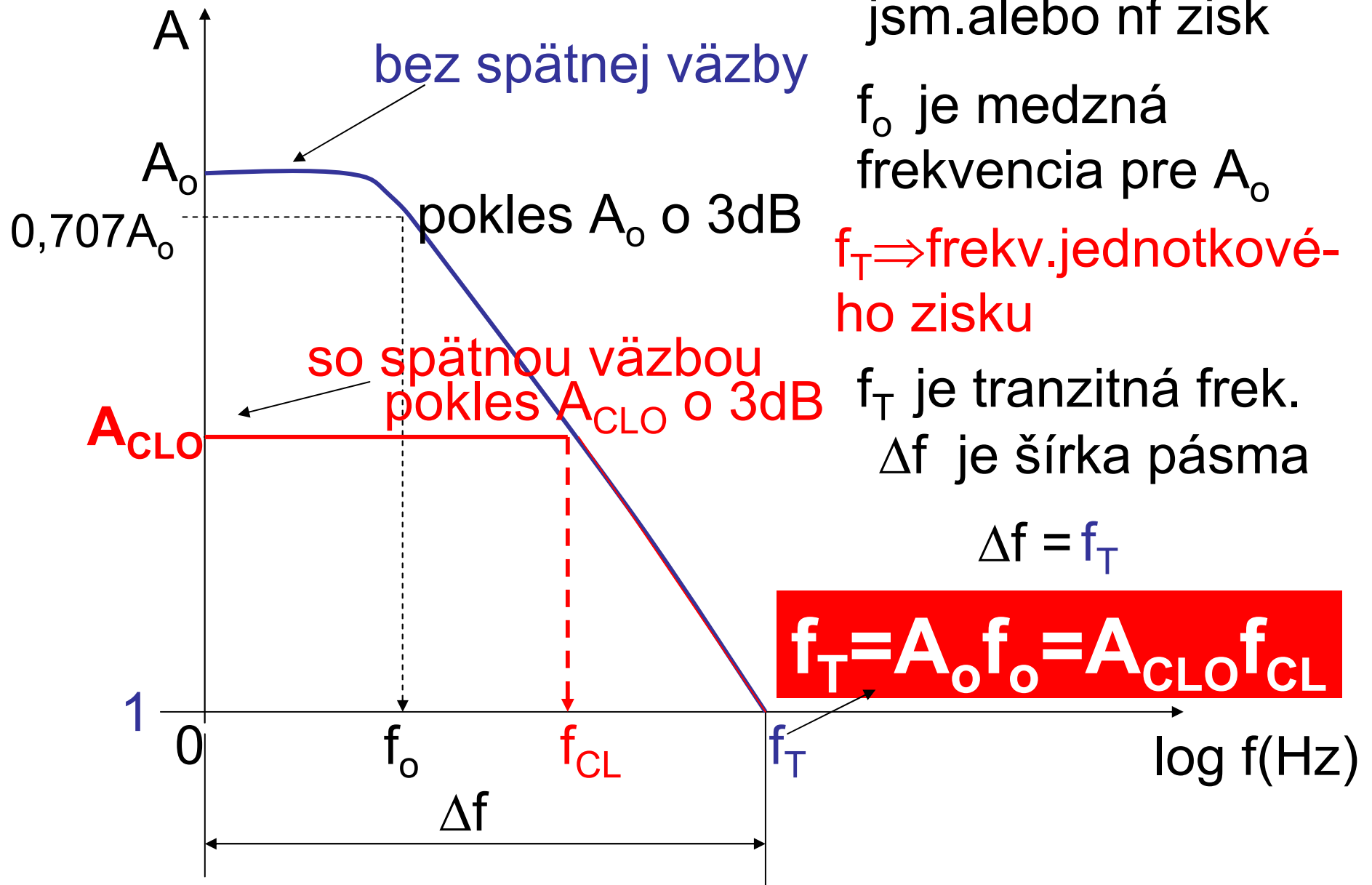
OZ možno použiť na zosilnenie periodických aj neperiodických striedavých signálov.

OZ je konštruovaný ako vysokoziskový, širokopásmový zosilňovač. Frekvenčná nestabilita sa dá kompenzovať vnútorným kompenzačným obvodom.

Frekvenčné vlastnosti OZ charakterizuje amplitúdovo-frekvenčná charakteristika, AFCH

AFCH OZ

Bodeho diagram



A_0 udáva katalóg,
jsm. alebo nf zisk

f_0 je medzná
frekvencia pre A_0

$f_T \Rightarrow$ frekv. jednotkového
zisku

f_T je tranzitná frek.
 Δf je šírka pásma

$$f_{CL} = (1 + A_o \beta) f_o$$

$$\begin{aligned} A_{CLO} f_{CL} &= \frac{A_o}{1 + A_o \beta} f_o (1 + A_o \beta) \\ &= A_o f_o \end{aligned}$$

Frekvenčné vlastnosti OZ

Frekvenčnými kompenzáciami je treba dosiahnuť taký tvar frekvenčnej charakteristiky, aby výsledné zosilnenie bolo stabilné.

Väčšina OZ ako napríklad MAA 741, alebo MAA 1458 sú vnútorne kmitočtovo kompenzované, t.j. sú stabilné pre akúkoľvek spätnú väzbu. Niektoré iné operačné zosilňovače, napríklad MAA 748, je nutné kompenzovať vonkajšími prvkami R,C.

Aby bola zaistená stabilita výstupného zapojenia musíme postupovať podľa odporúčenia výrobcu.

U zosilňovačov s vonkajšou frekvenčnou kompenzáciou môžeme dosiahnuť pre konkrétne zapojenie lepšie frekvenčné vlastnosti.

Vlastnosti IOZ:

Vstupný odpor, $R_i \Rightarrow \infty$

Výstupný odpor, $R_o \Rightarrow 0$

Zosilnenie, všeobecne $A_o \Rightarrow \infty$

Šírka frekvenčného pásma, $\Delta f \Rightarrow \infty$

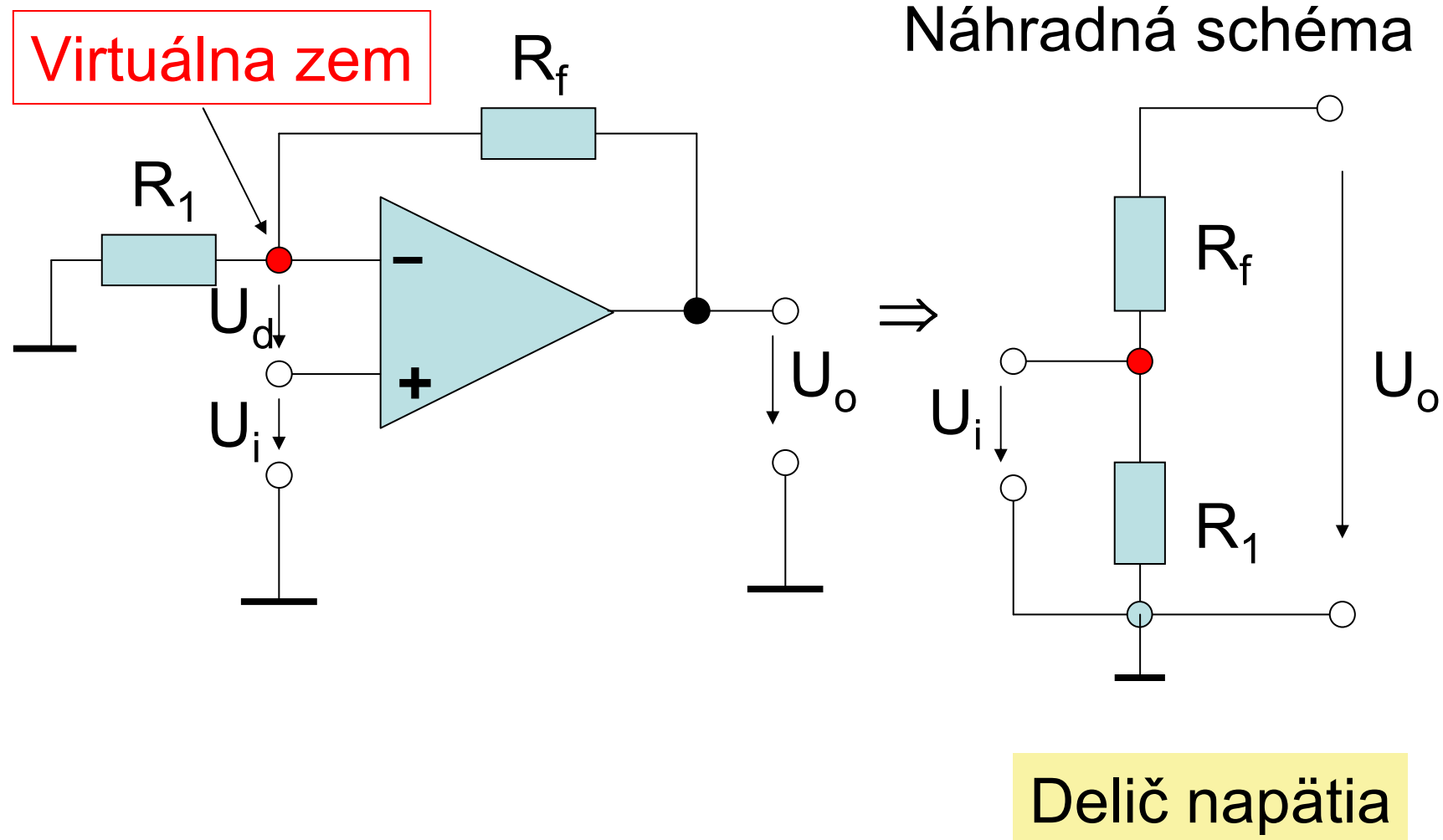
Snaha, aby sa parametre ROZ približovali parametrom IOZ.

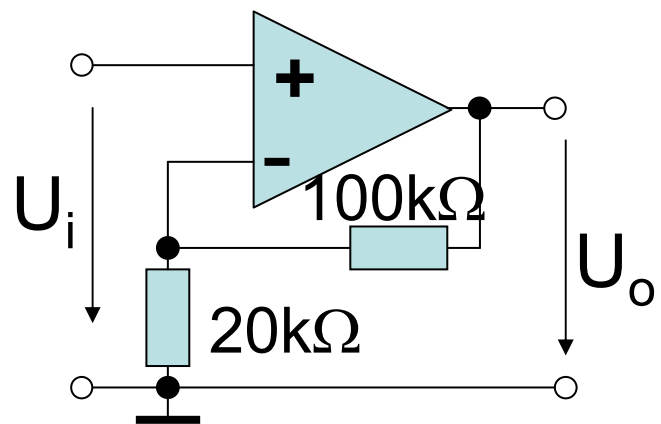
Čo najmenšie diferenciálne napätie na vstupe.

Virtuálna nula. Potom do vstupov netečie prúd. Vysoký vstupný odpor.

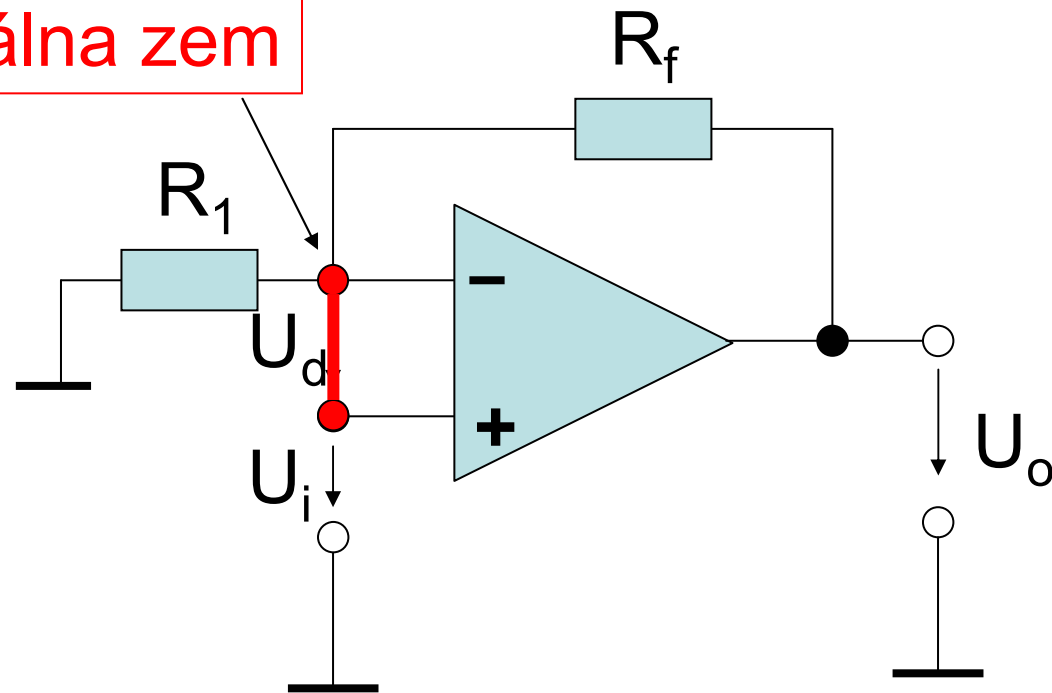
Maximálne zosilnenie.

Neinvertujúce zapojenie OZ





Virtuálna zem



V bode ● je potenciál rovný $U_i \Rightarrow U_d \approx 0$
(virtuálna zem)

$$A_o = \frac{U_o}{U_i} = \frac{R_f + R_1}{R_1} = 1 + \frac{R_f}{R_1}$$

Koncepcia virtuálnej zeme

OZ má veľmi vysoké zosilnenie

$$U_o = A_o U_i$$

U_i je U_d

Príklad

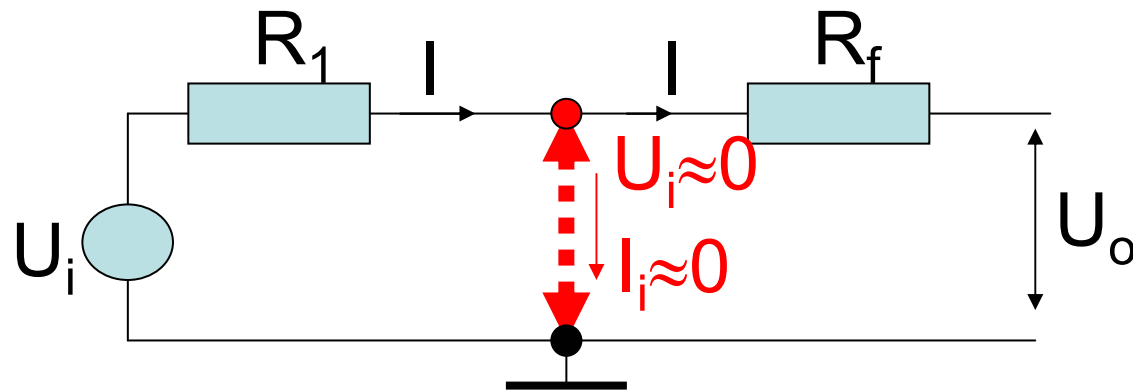
Ak $U_o = -1V$ a $A_o = 10^6$, potom $U_i = 10^{-6}V = 1\mu V$

V porovnaní s inými napätiami je to takmer 0V!!!

Nie je to ale skutočne 0V, ale len **zdanlivo, takmer, virtuálne**.

Táto aproximácia alebo virtuálna zem zjednodušuje analýzu obvodov s OZ.

Aproximácia obvodu, virtuálna zem



- • majú rovnaký potenciál

Napätie U_i je **takmer nulové**, ale predpokladáme, že netečie žiadny prúd cez vstup OZ do zeme. V schéme uvažujeme skrat, len virtuálny, preto netečie žiadny prúd cez skrat do zeme, ale len cez odpory.

$$I = \frac{U_i}{R_1} = -\frac{U_o}{R_f}$$

Vlastnosti neinvertujúceho zapojenia OZ

Nulový fázový posun signálu

Vstupný odpor je veľmi vysoký, ako u IOZ $R_i \Rightarrow \infty$

Prúd tečúci cez delič napätia dodáva výstup OZ

Vysoká frekvenčná stabilita

Výstupný odpor je veľmi malý

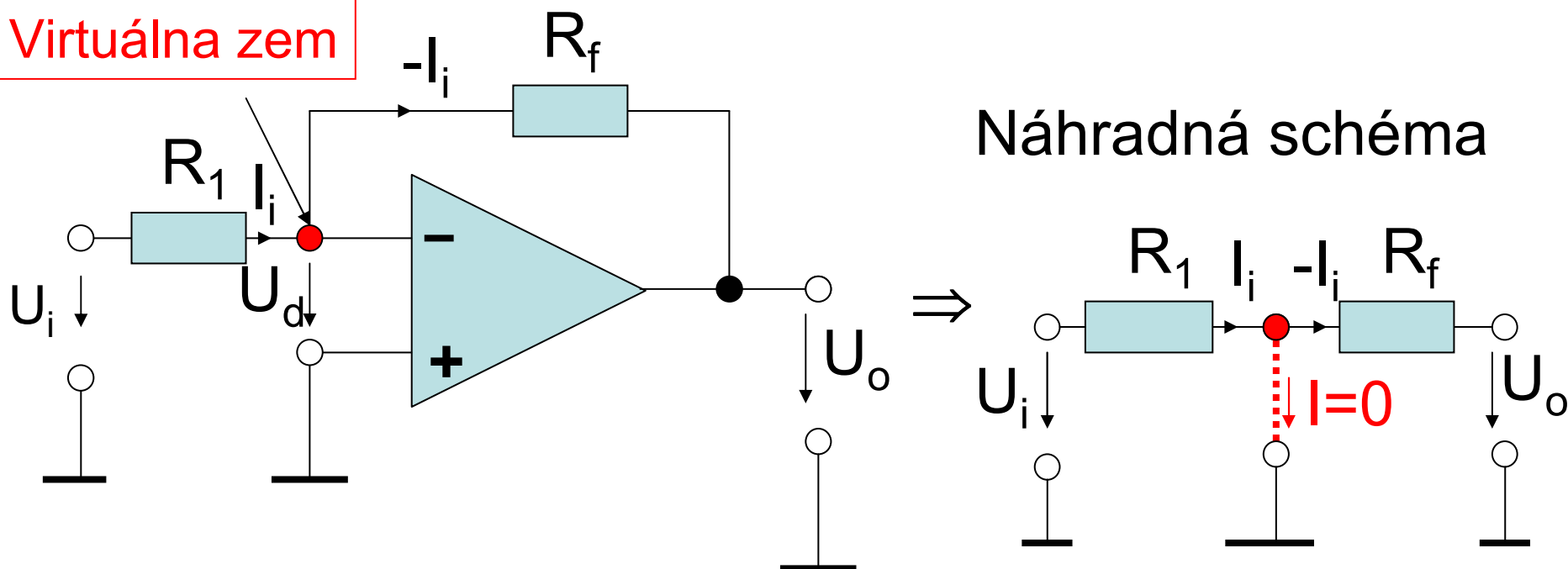
$$R_i = (1 + A\beta)r_d$$

$$R_o = \frac{r_o}{1 + \beta A}$$

Pre svoj veľmi vysoký vstupný odpor sa neinvertujúce zapojenie OZ nazýva **elektrometrický zosilňovač**
(**elektrometer**)

Invertujúce zapojenie OZ

Virtuálna zem



$$A_o = \frac{U_o}{U_i} = \frac{-I_i R_f}{I_i R_1} = -\frac{R_f}{R_1}$$

Vlastnosti invertujúceho zapojenia OZ

180° fázový posun signálu

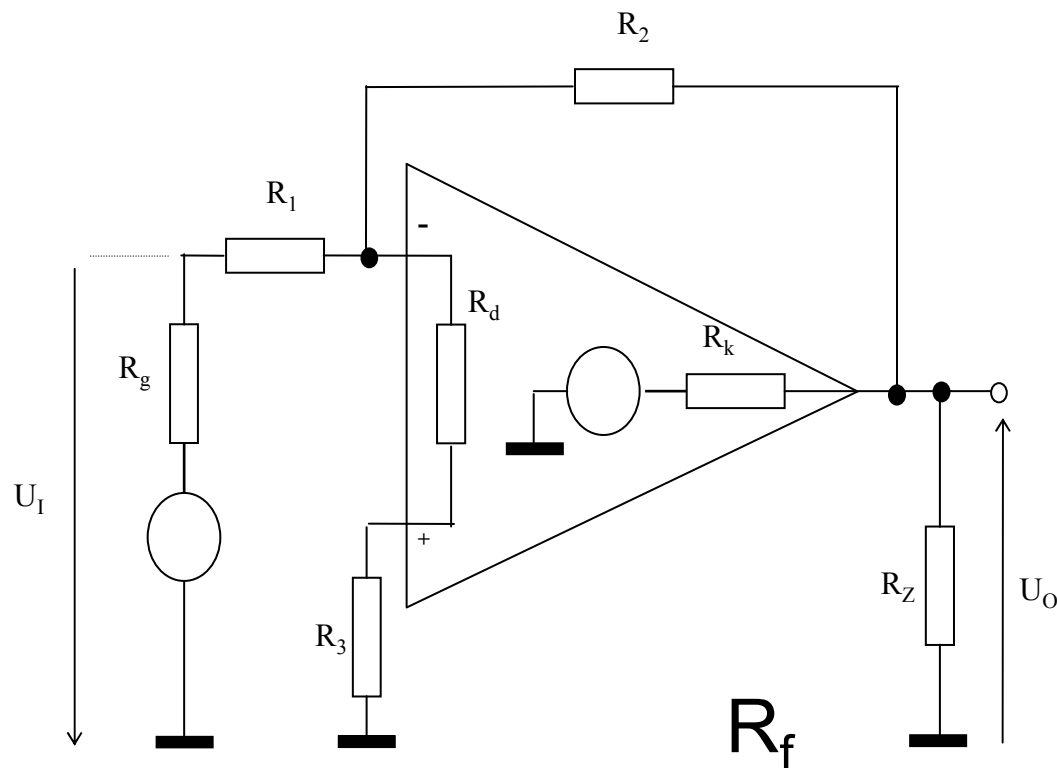
Vstupný odpor je R_1

Prúd tečúci cez delič napätia dodáva zdroj signálu, vyžaduje sa veľký výkon vstupného signálu

Výstupný odpor je veľmi malý

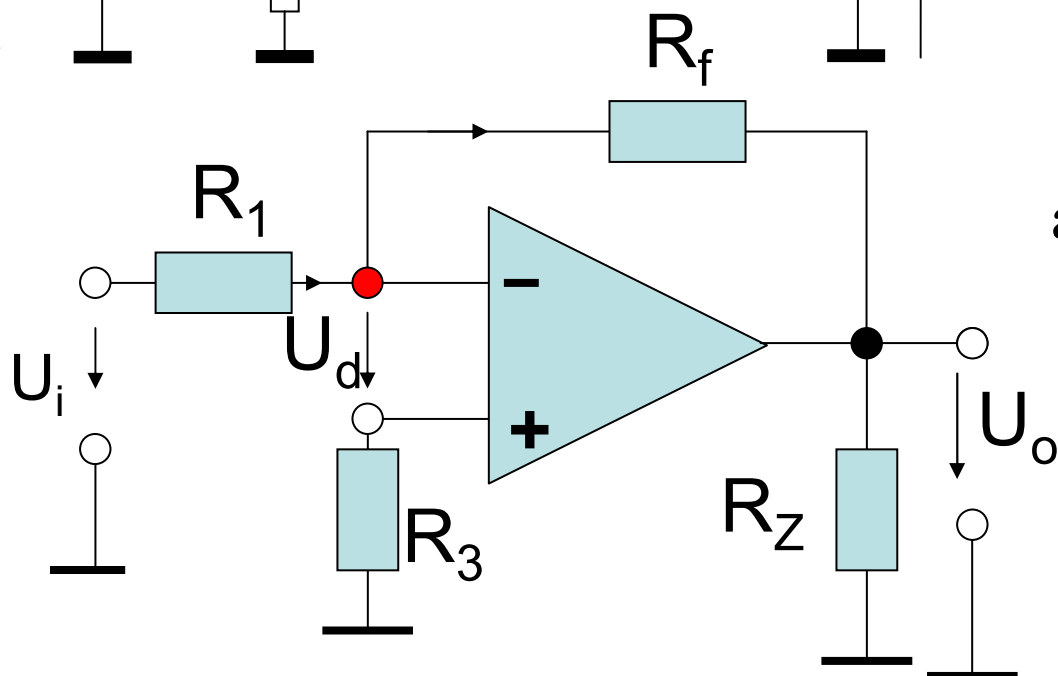
$$R_i = R_1$$

$$R_o = \frac{r_o}{1 + \beta A}$$



R_3 pomáha
vyrovnávať nesy-
metriu vstupov OZ
a volí sa

$$R_3 = \frac{R_1 R_f}{R_1 + R_f}$$



ak $R_f \gg R_1$, potom
 $R_3 = R_1$

Príklad:

Požadované zosilnenie invertujúceho zosilňovača je $A=40\text{dB}$ pri $R_g=0$. $U_{CC} = \pm 15\text{V}$. Použiť ideálny OZ. Vypočítajte R_1, R_f a R_3 . Určite max. vstupné napätie pre IO MAA1458. Určite v percentách vplyv napäťovej nesymetrie na výstupný signál 10V .

Výpočet:

Volíme $R_1=1\text{k}\Omega$, potom $R_f=A.R_1=100.1.10^3=\underline{100\text{k}\Omega}$.
 $R_3=R_1=\underline{1\text{k}\Omega}$.

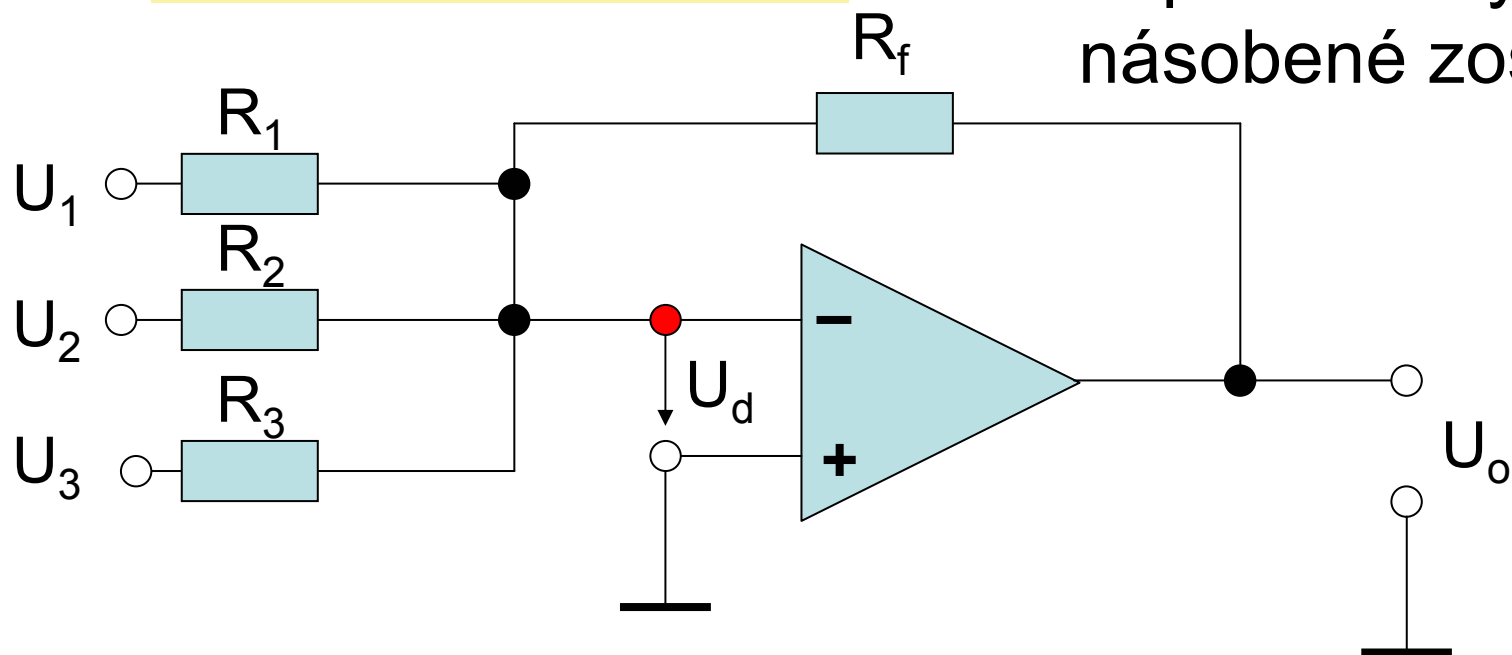
Pre MAA1458 je max. rozkmit výstupného napätia $U_o=\pm 14\text{V}$ (katalógová hodnota), t.j. pre $A=40\text{dB}$ je $U_i=U_o/100=\pm 14\text{V}/100=\underline{\pm 140\text{mV}}$.

Napäťová nesymetria vstupov je 1mV (katalógová hodnota). Pri zosilnení $A=40\text{dB}$ sa to prejaví na výstupe ako $\underline{100\text{mV}}$, čo je pri výstupnom napätí 10V zmena $\underline{1\%}$.

Aplikácie OZ

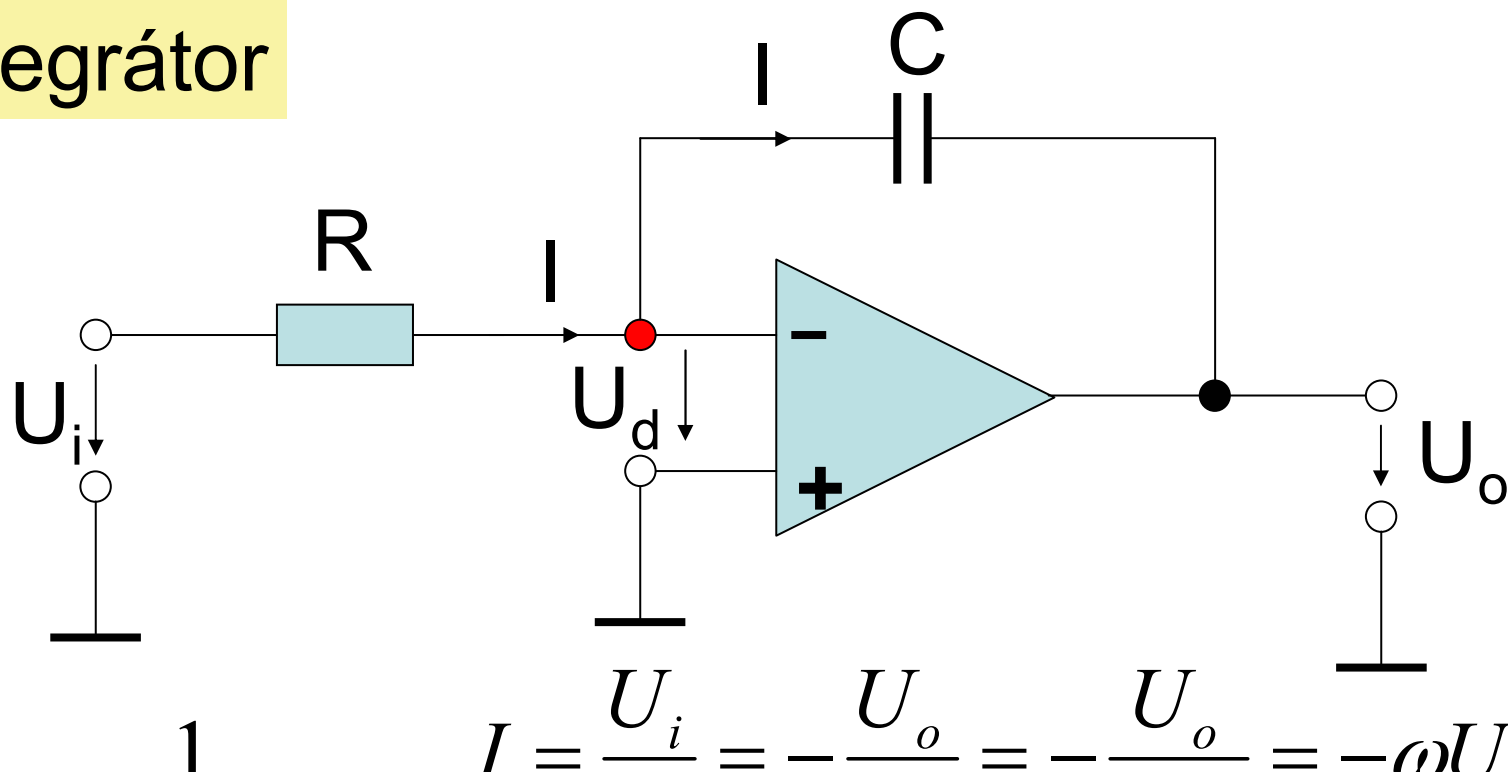
Sčítačka, sumátor

Každý vstup dodáva
napätie do výstupu
násobené zosilnením



$$U_o = - \left(\frac{R_f}{R_1} U_1 + \frac{R_f}{R_2} U_2 + \frac{R_f}{R_3} U_3 \right)$$

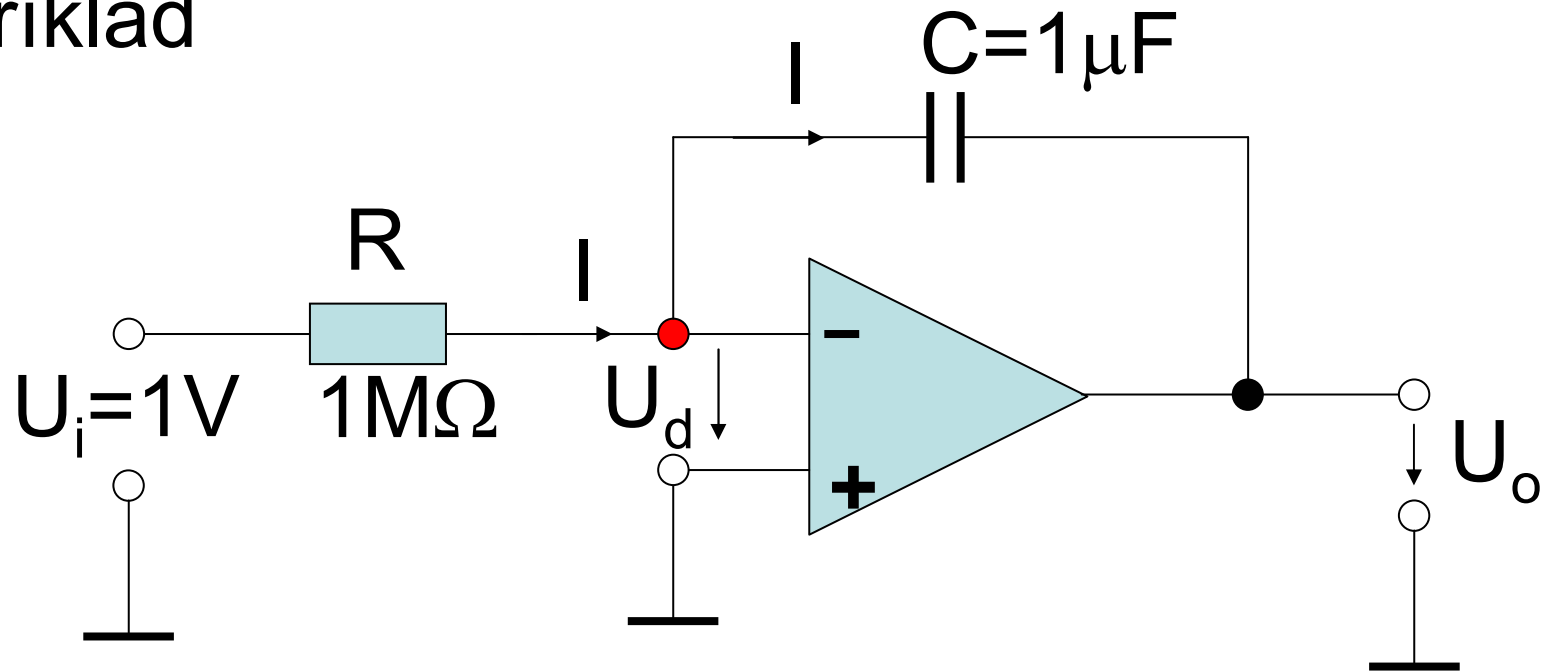
Integrátor



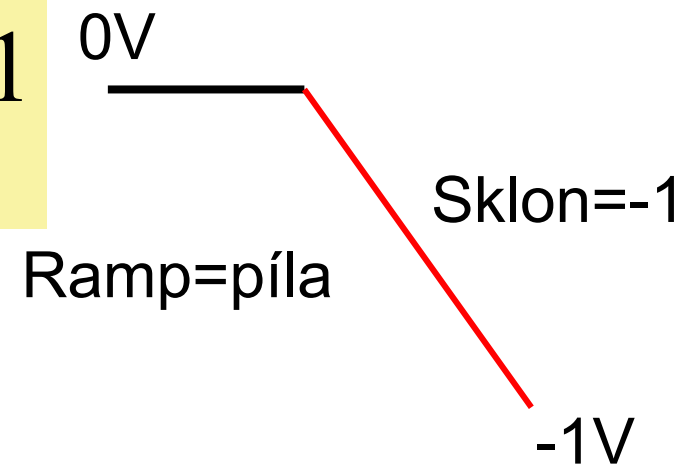
$$I = \frac{U_i}{R} = -\frac{U_o}{R} = -\frac{U_o}{R} = -\frac{U_o}{R} = -\frac{U_o}{R}$$

$$u_o(t) = -\frac{1}{RC} \int_0^t u_i(t) dt + u_o(0)$$

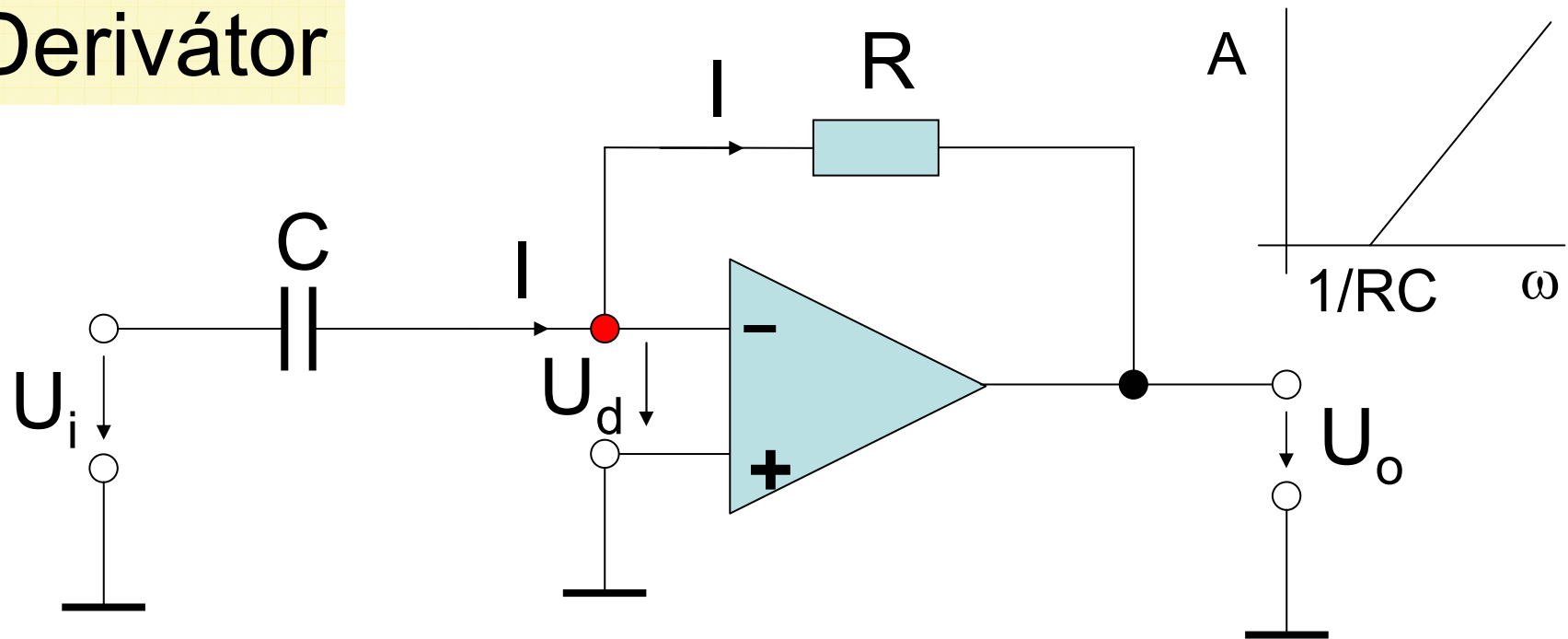
Príklad



$$\frac{U_o}{U_i} = \frac{-1}{RC} = \frac{1}{1M\Omega \times 1\mu F} = -1$$

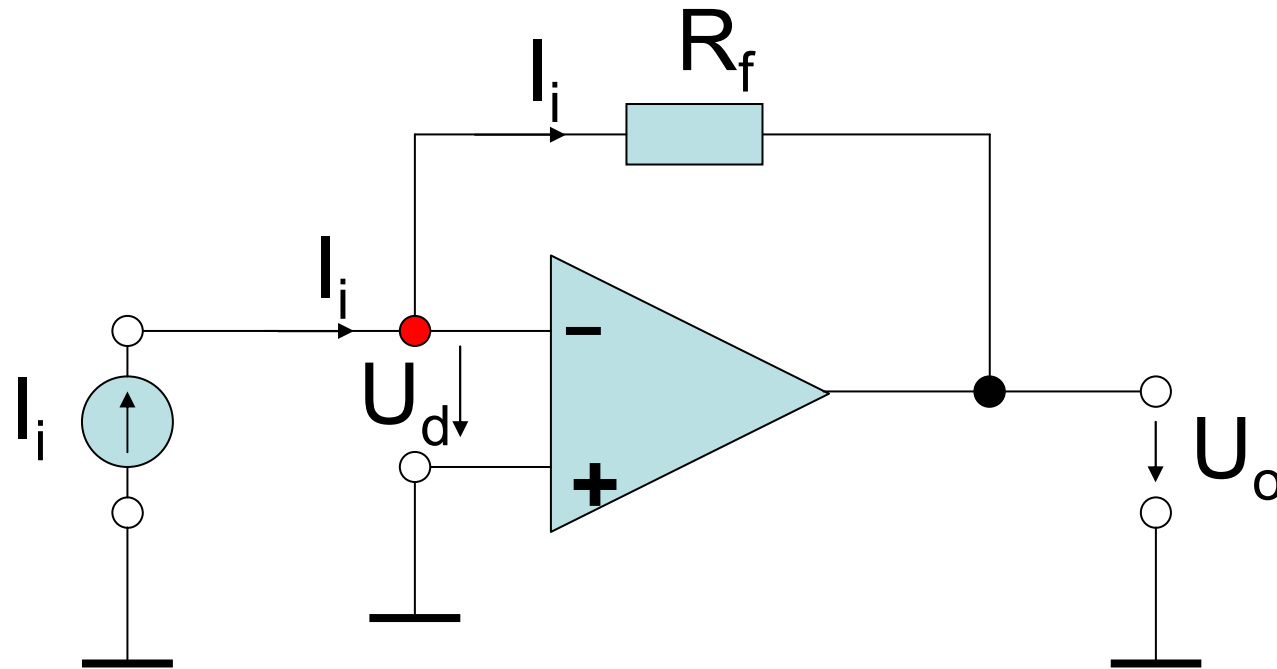


Derivátor



$$u_o(t) = -RC \frac{dU_i(t)}{dt}$$

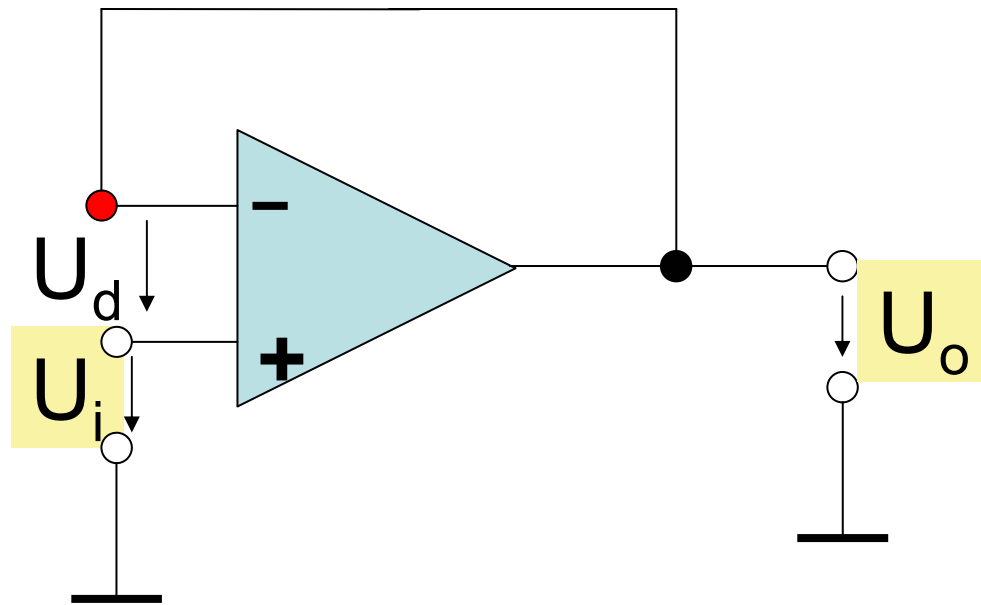
Prúdom riadený napäťový zdroj Prevodník prúd-napätie



$$I_i - \frac{U_o}{R_f} = 0$$

$$U_o = -R_f I_i$$

Napätový sledovač
Jednotkový
zosilňovač
Napätový buffer-
oddeľovací stupeň



$$A_o = 1 \Rightarrow U_i = U_o$$

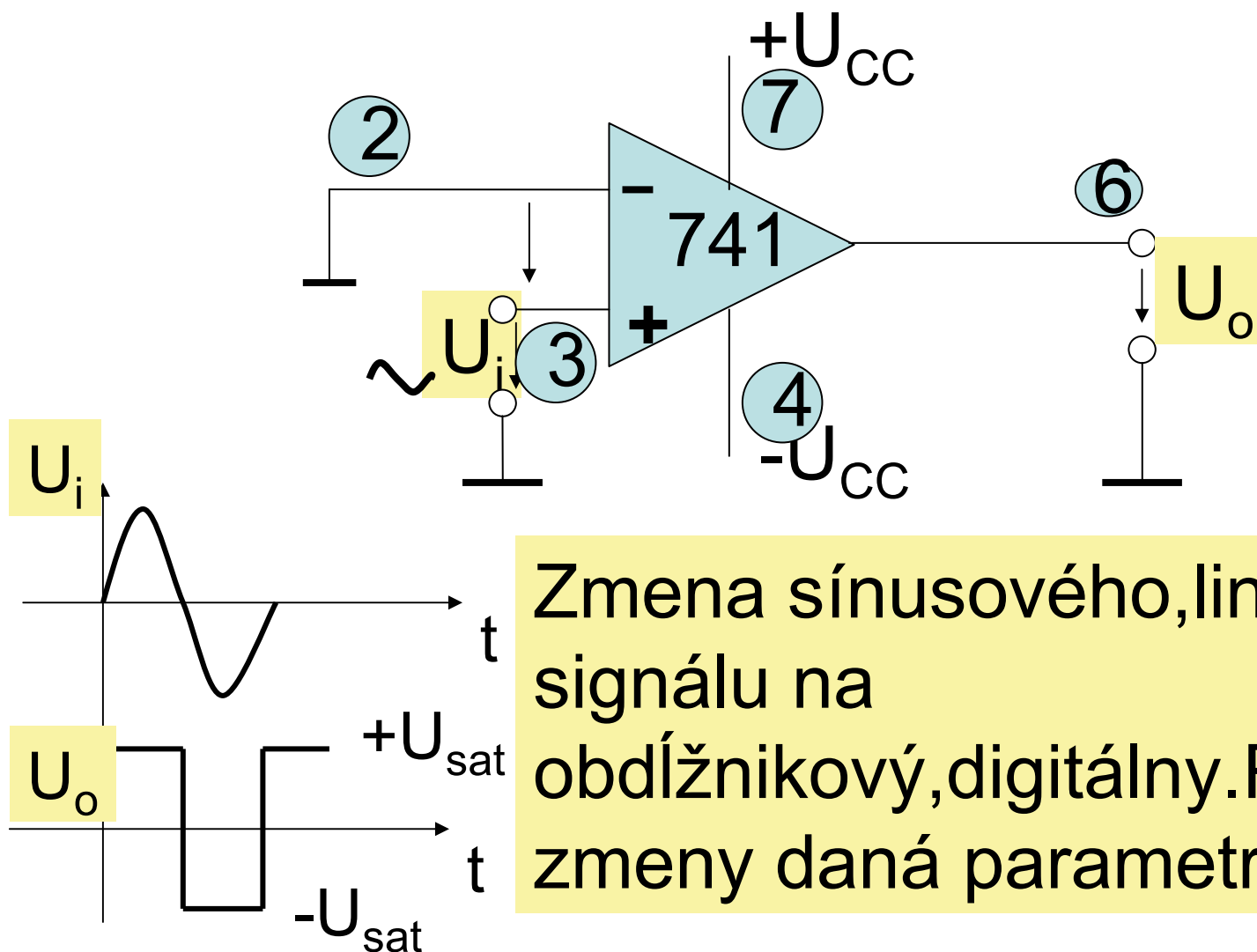
R_i sa blíži k nekonečnu

R_o sa blíži k 0 ,

izolácia vstupu od výstupu, ideálne vlastnosti pri
vytváraní stupňov, kaskád

Komparátor

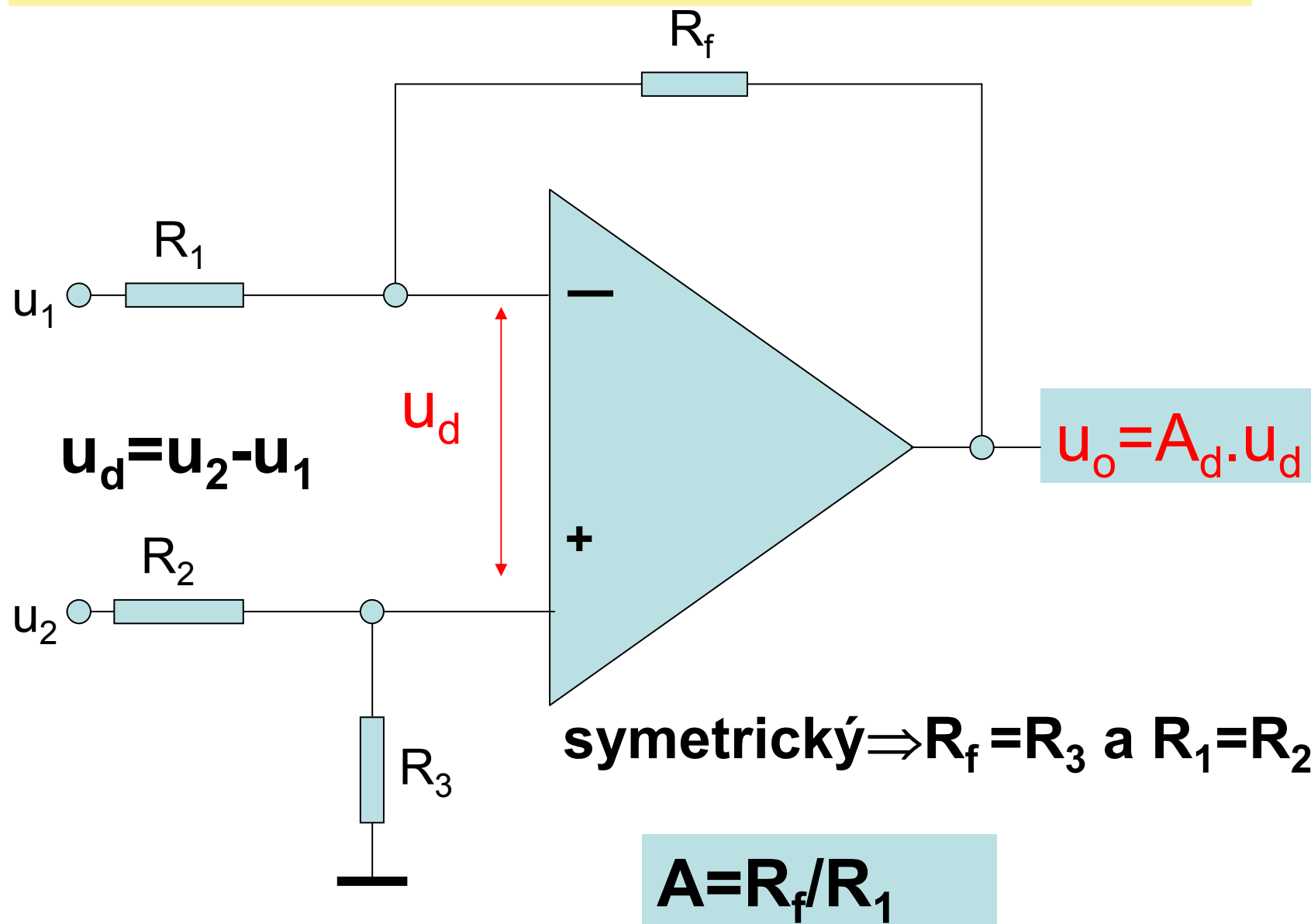
Neinvertujúci komparátor, MAA 741
(Môže byť aj invertujúci komparátor).



Zmena sínusového, lineárneho signálu na obdĺžnikový, digitálny. Rýchlosť zmeny daná parametrami OZ

Operačné zosilňovače sa využívajú aj vo funkcii aktívnych frekvenčných filtrov. Hlavne pre veľmi malé frekvencie sú jediným riešením.

Operačný zosilňovač s diferenčným vstupom

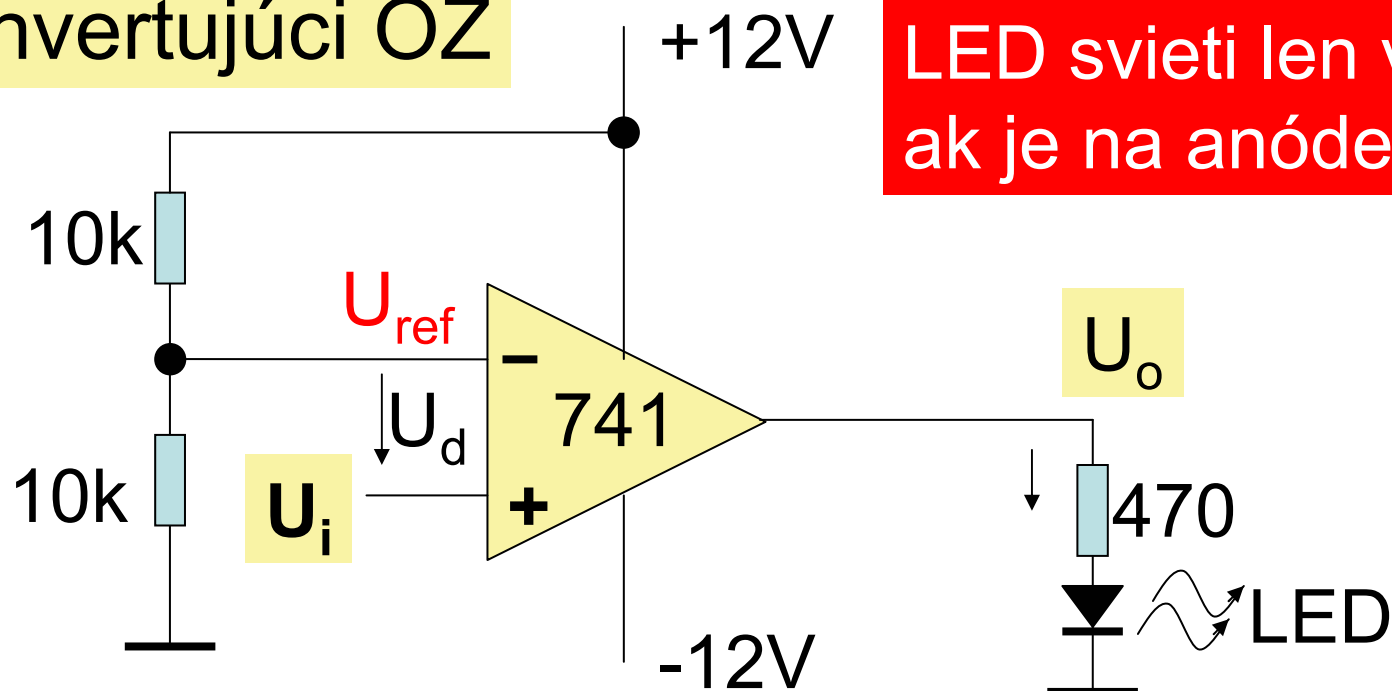


$$u_o = \frac{1 + R_f / R_1}{1 + R_2 / R_3} u_2 - \frac{R_f}{R_1} u_1$$

**Ak $R_1=R_2=10\text{k}\Omega$ a $R_f=R_3=50\text{k}\Omega$
potom $A=5$**

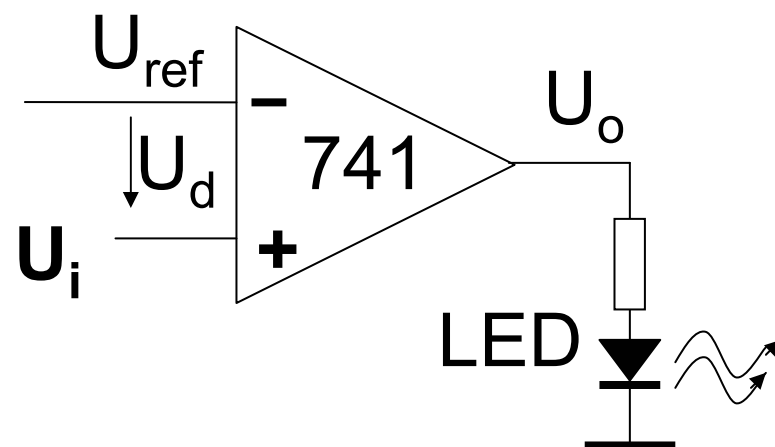
Využitie OZ na rozsvietenie LEDky

Neinvertujúci OZ



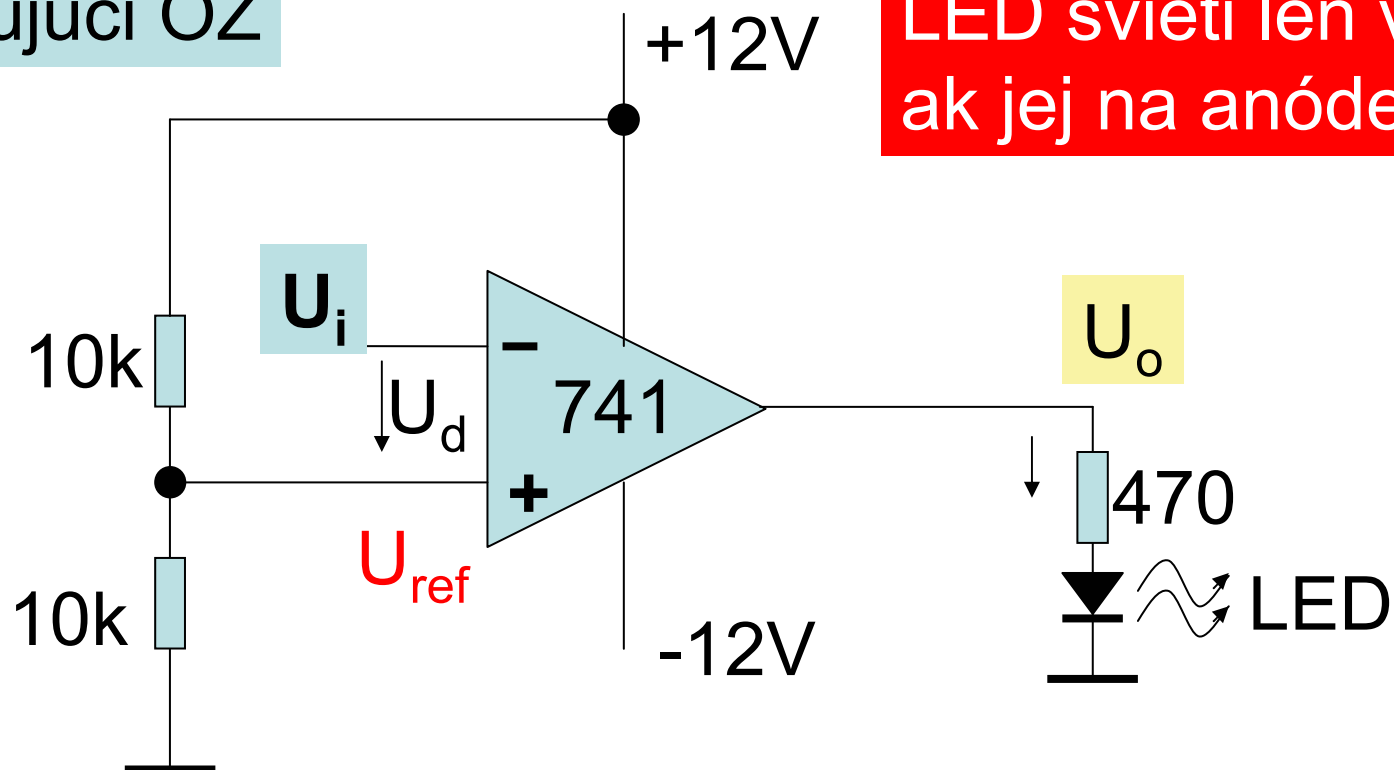
$$U_{ref} = \frac{10k}{10k + 10k} 12V = 6V$$

LED „ON“, len keď $U_i > U_{ref}$



Využitie OZ na rozsvietenie LEDky

Invertujúci OZ



$$U_{ref} = \frac{10k}{10k + 10k} 12V = 6V$$

LED „ON“, len keď $U_i < U_{ref}$