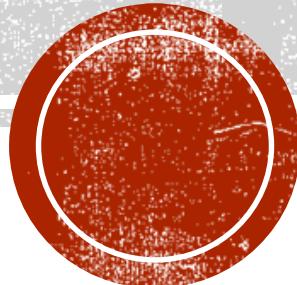


# ELEKTRONIKA

Viera Stopjaková ([viera.stopjakova@stuba.sk](mailto:viera.stopjakova@stuba.sk))

Ústav elektroniky a fotoniky

FEI STU



# ZOSILŇOVAČE

Jednoduché zosilňovače.

Operačné zosilňovače.

Využitie OZ. Aktívne filtre.

Prednáška

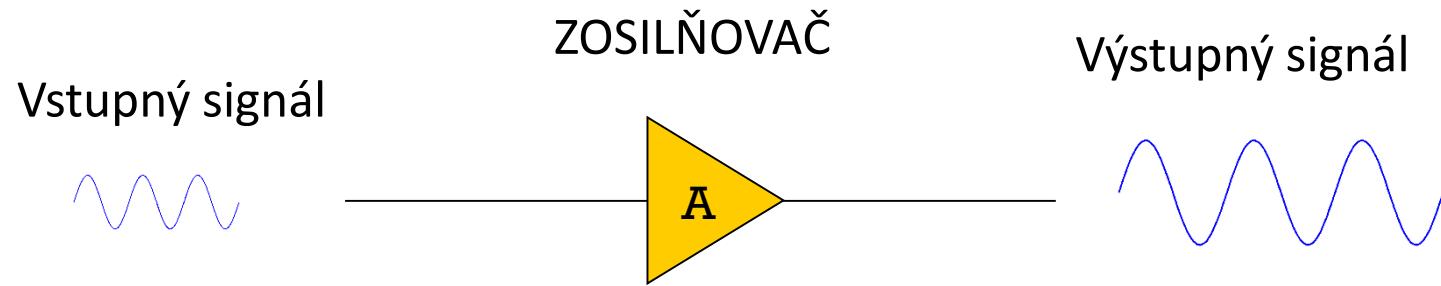
6

# Zosilňovače - úvod

- **Zosilňovače** – základné stavebné bloky analógových obvodov
- Používame ich na zosilnenie signálu generovaného napr. senzorom
- Typický príklad je mikrofón
  - generuje striedavý signál
  - výstupný signál je potrebné **zosilniť** a následne spracovať
- DELENIE:
  - **jednoduché (jedno-tranzistorové)** zosilňovače
  - **diferenciálne (operačné)** zosilňovače



# Zosilňovač



Vstupný signál je na výstupe zosilnený.  
Veľkosť zosilnenia určuje tzv. **zisk zosilňovača**

Na zosilnenie vstupného signálu môžeme použiť  
ľubovoľný prvak so **zosilňovacou vlastnosťou**

**napr. MOS tranzistor**

# MOS tranzistor ako zosilňovač

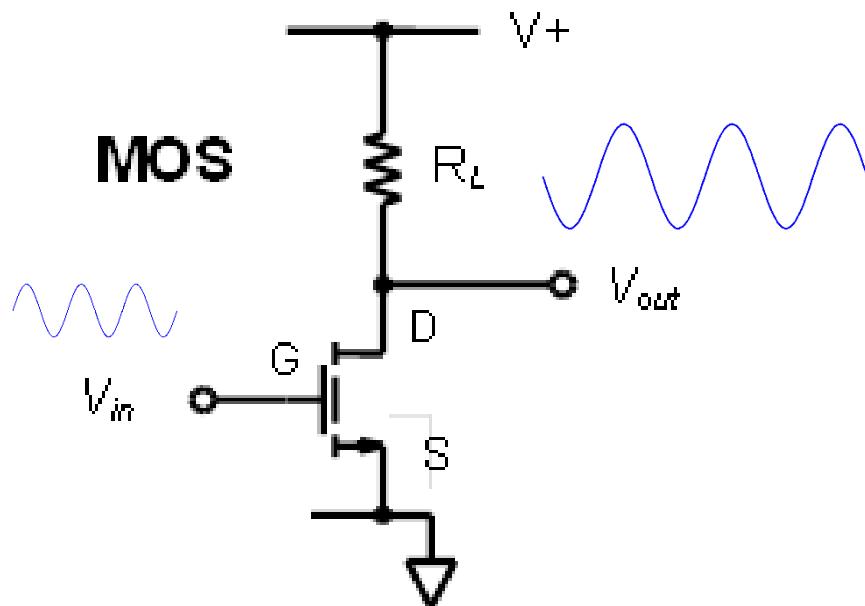
- MOS tranzistor je zosilňovací prvok
  - 3 spôsoby zapojenia
  - zvyčajne jeden terminál tranzistora je **spoločný**
- Podľa zapojenia môžeme zosilňovače rozdeliť na:
  - Zosilňovač so **spoločným emitorom (CS)** – najčastejšie používaný
  - Zosilňovač so **spoločným kolektorom (CD)**
  - Zosilňovač so **spoločným hradlom (CG)**



Zosilňovač s jedným tranzistorom nazývame  
**jedno-tranzistorový** alebo **jednoduchý zosilňovač**

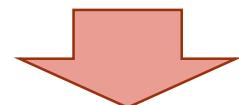
# Zosilňovač so spoločným emitorom (CS)

- Najčastejšie používané zapojenie



## Zosilňovač so spoločným emitorom:

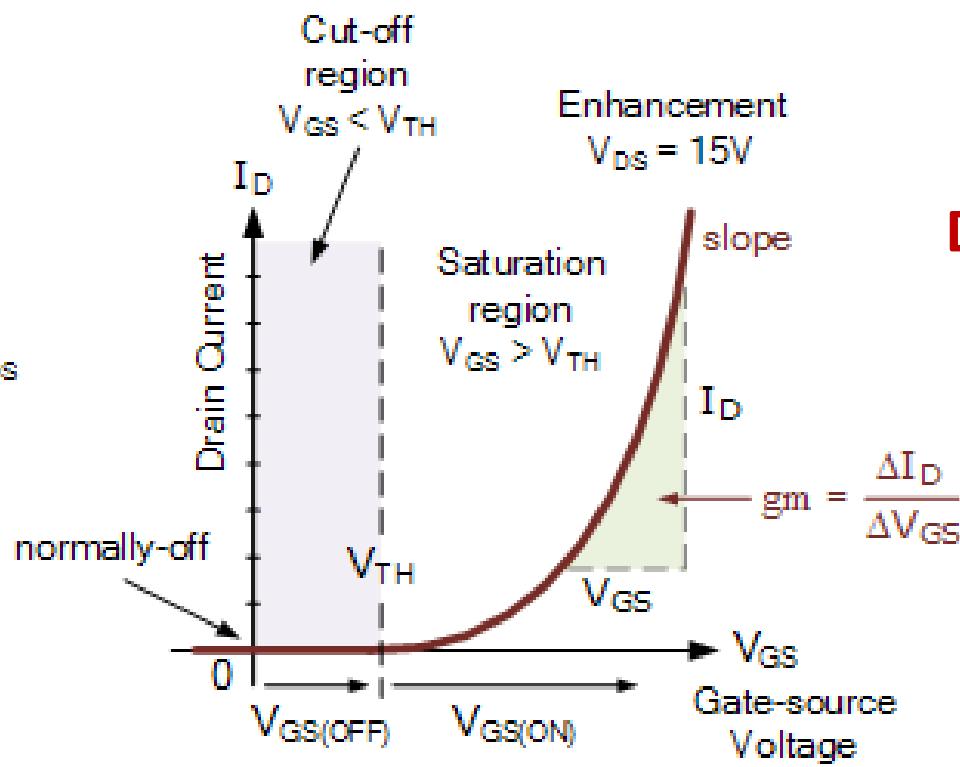
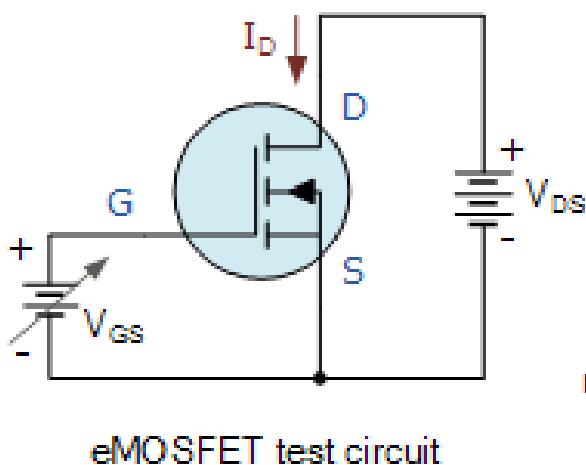
- Spoločný terminál pre vstup a výstup je source
- $R_L$  predstavuje záťaž zosilňovača (nastavenie pracovného bodu)
- Ide o invertujúci zosilňovač – fáza na výstupe je posunutá o  $180^\circ$



**Zosilnenie** závisí od hodnoty rezistora  $R_L$  a **prenosovej vodivosti (strmosti)  $g_m$**  MOS tranzistora.

# Prenosová vodivost' MOS tranzistora

Prenosová vodivost' definuje zmenu prúdu  $I_D$  spôsobenú zmenou napäťia  $V_{GS}$

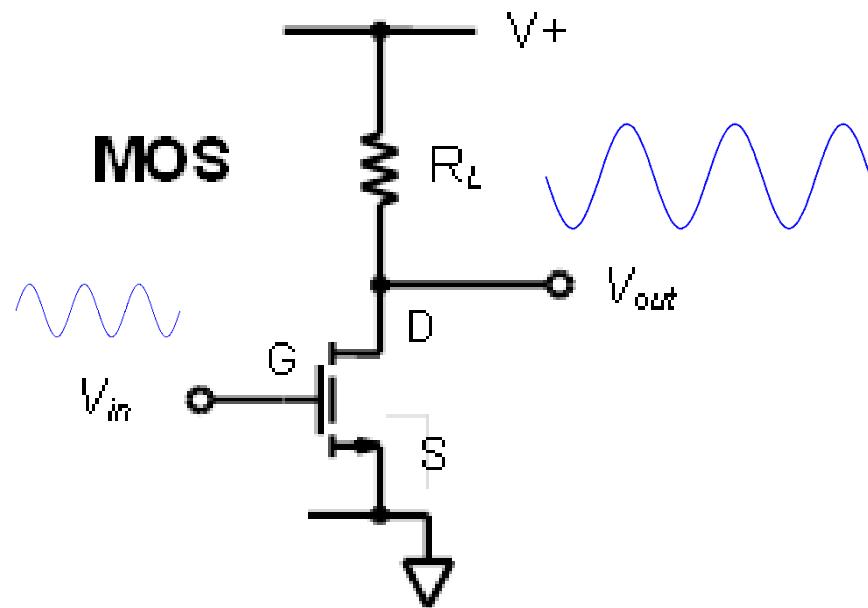


Derivácia prúdu  $I_D$  podľa napäťia  $V_{GS}$

$$g_m = \frac{\partial I_D}{\partial V_{GS}} \Big|_{V_{DS}=\text{const.}}$$

# Zosilňovač so spoločným emitorom (CS)

- Zosilnenie je závislé aj od **pracovného bodu** zosilňovača

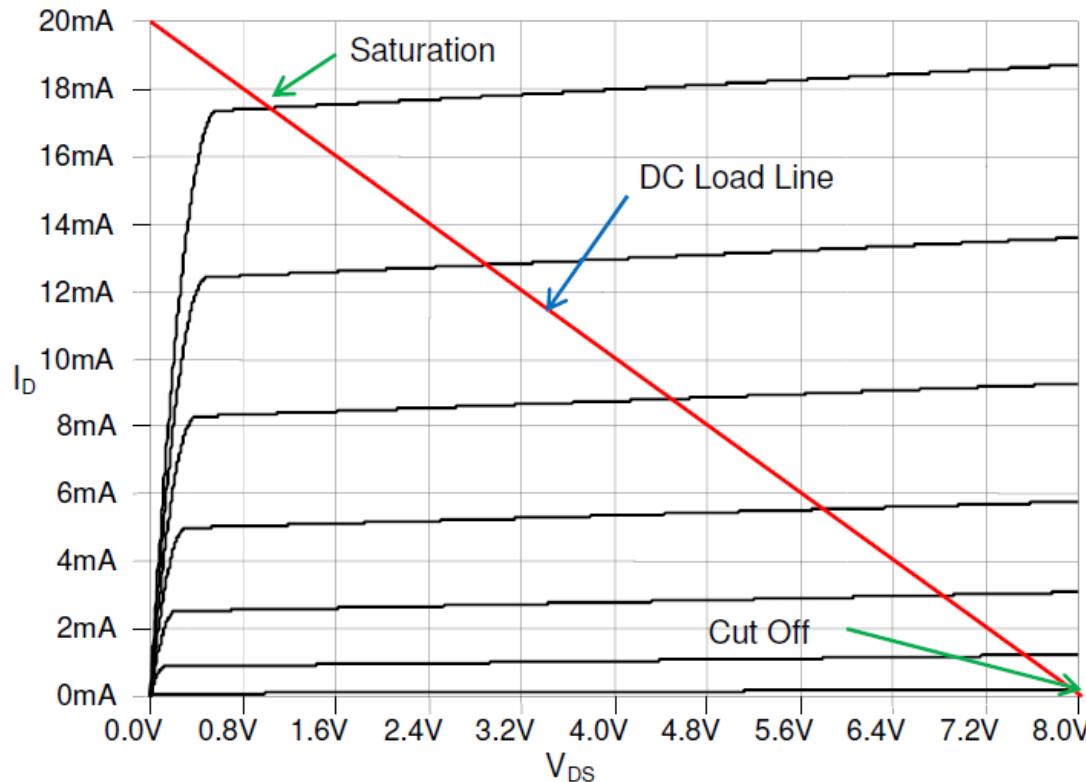


Na dosiahnutie maximálneho rozkmitu na výstupe zosilňovača, musíme jeho pracovný bod umiestniť do stredu.

Zosilňuje AC signál privedený na vstup, pričom jednosmerná zložka resp. offset AC signálu nastavuje **pracovný bod** zosilňovača.

# Zosilňovač so spoločným emitorom

## ■ Nastavenie pracovného bodu



**Pracovný bod** zosilňovača nastavujeme rezistorom  $RL$  a DC hodnotou napäťia na jeho vstupe

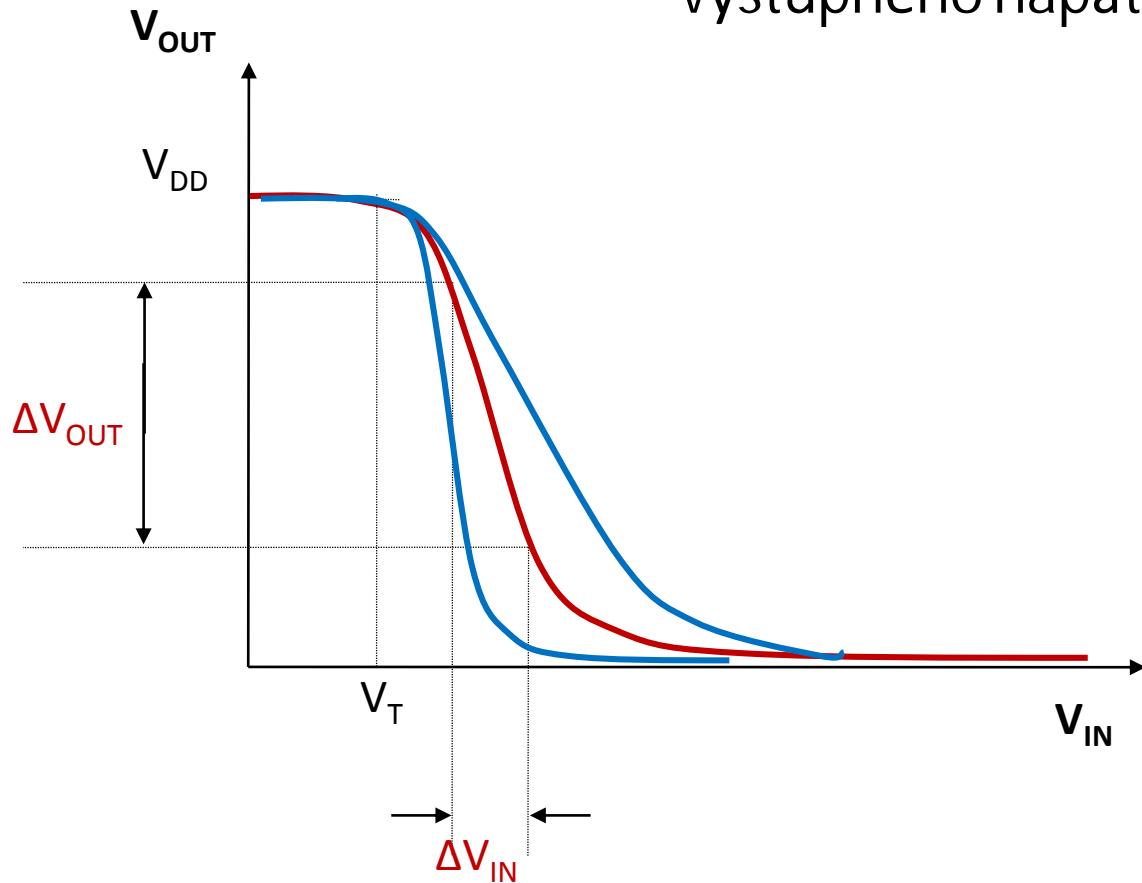
### Príklad nastavenia pracovného bodu:

Ak napájacie napätie zosilňovača je 5 V, potom DC napätie na jeho vstupe musí byť 2,5 V.

Od pracovného bodu závisí aj  $g_m$

# Prevodová charakteristika a zosilnenie

Prevodová charakteristika zosilňovača vyjadruje závislosť výstupného napäcia  $V_{OUT}$  od vstupného napäcia  $V_{IN}$



*Zosilnenie zosilňovača*

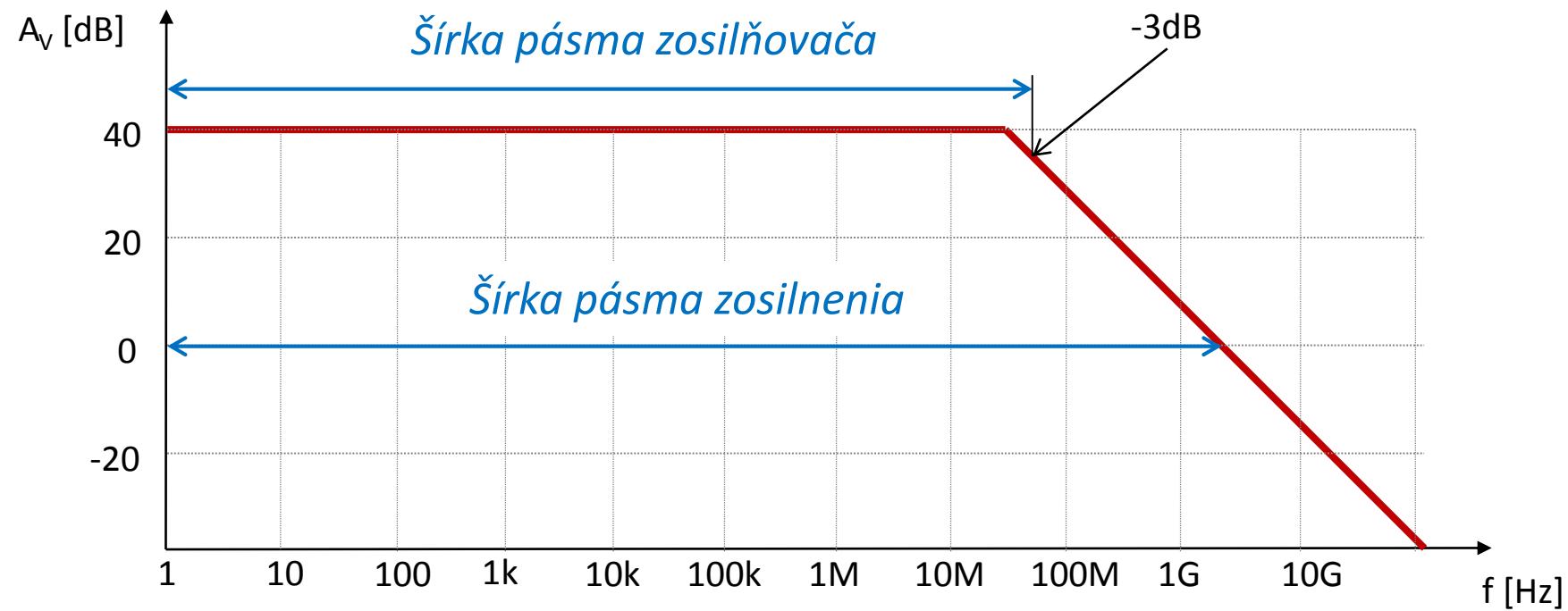
$$A_v = \frac{\partial V_{OUT}}{\partial V_{IN}}$$

*Zosilnenie zosilovača a CS*

$$A_v = -g_m R_L$$

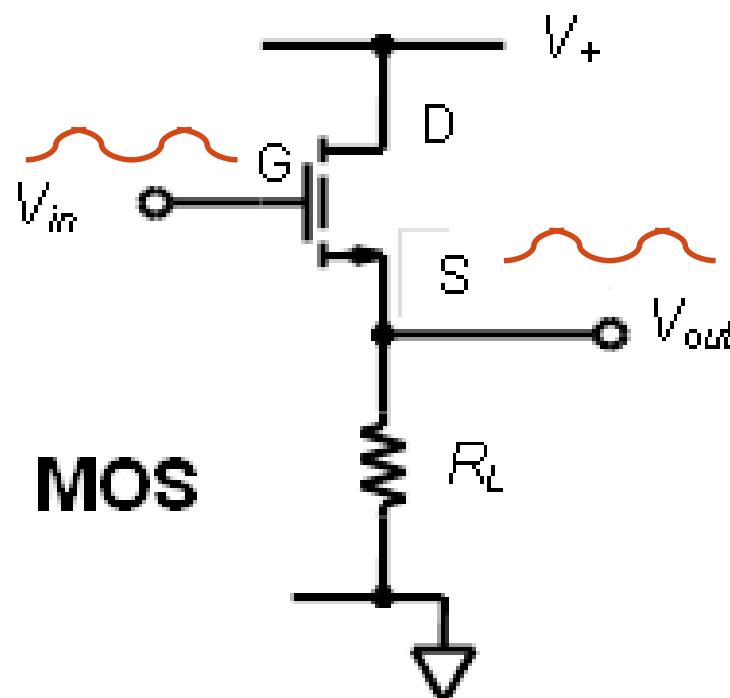
# Frekvenčná charakteristika zosilňovača

$$A_v [dB] = 20 \cdot \log(-g_m R_L)$$



# Zosilňovač so spoločným kolektorem (CD)

- Požíva sa na sledovanie signálu – **napäťový (emitorový) sledovač**



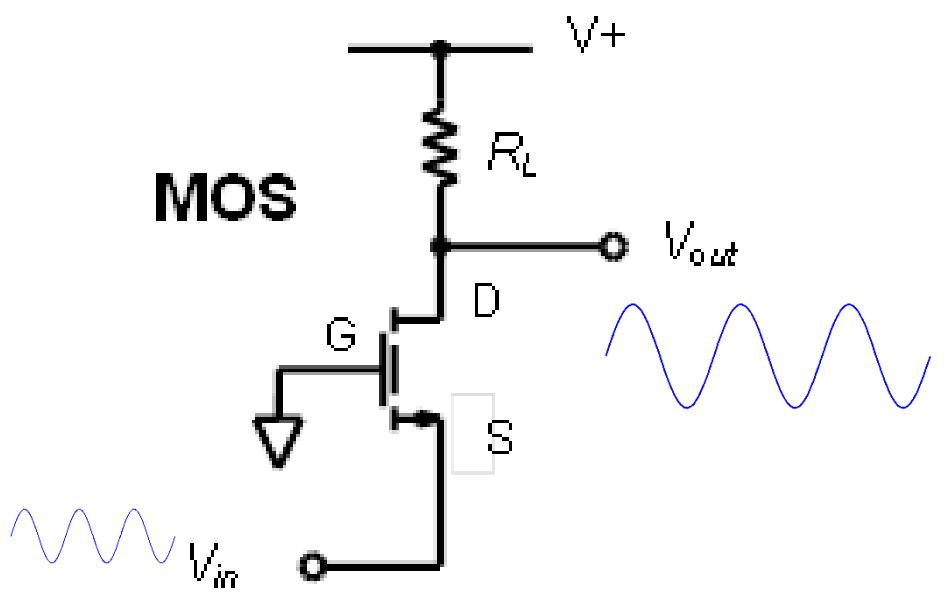
- Spoločný terminál pre vstup a výstup je D
- R<sub>L</sub> predstavuje záťaž zosilňovača (nastavenie pracovného bodu)
- Neinvertujúci zosilňovač – fáza na výstupe je rovnaká ako fáza na vstupe
- Používa sa ako sledovač napätia – v prípadoch keď je potrebné dodat väčší prúd do záťaže



**Zosilnenie je rovné 1**

# Zosilňovač so spoločným hradlom (CG)

- Používa sa na **zvýšenie zosilnenia** zosilňovača so spoločným emitorom



- Spoločný terminál pre vstup a výstup je G
- $R_L$  predstavuje záťaž zosilňovača (nastavenie pracovného bodu)
- Neinvertujúci zosilňovač
- Používa sa na zvýšenie zosilnenia zosilňovača



**Zosilnenie** približne rovnaké ako pri zosilňovači so spoločným emitorom  $g_m R_L$

# Operačný zosilňovač (OZ)

- Základný stavebný blok zložitejších analógových obvodov
- Názov *“operačný zosilňovač”* je odvodené od jeho použitia na realizáciu matematických operácií



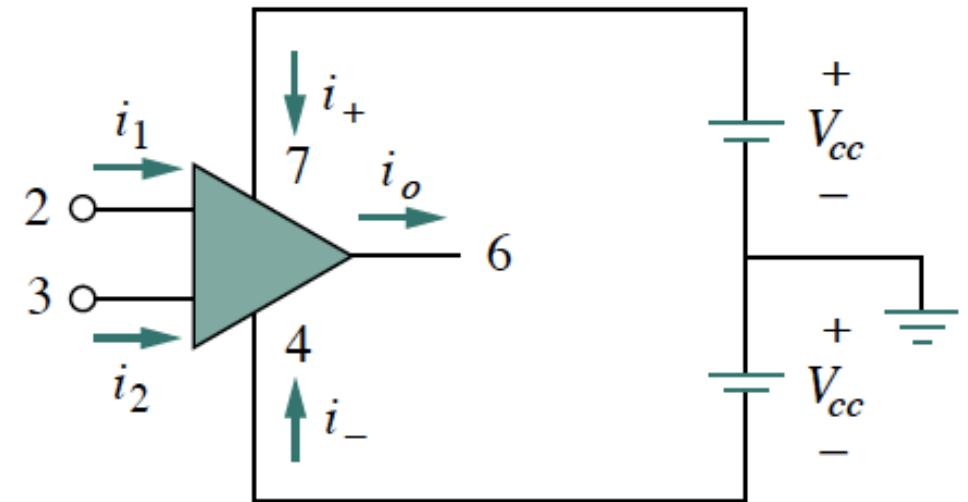
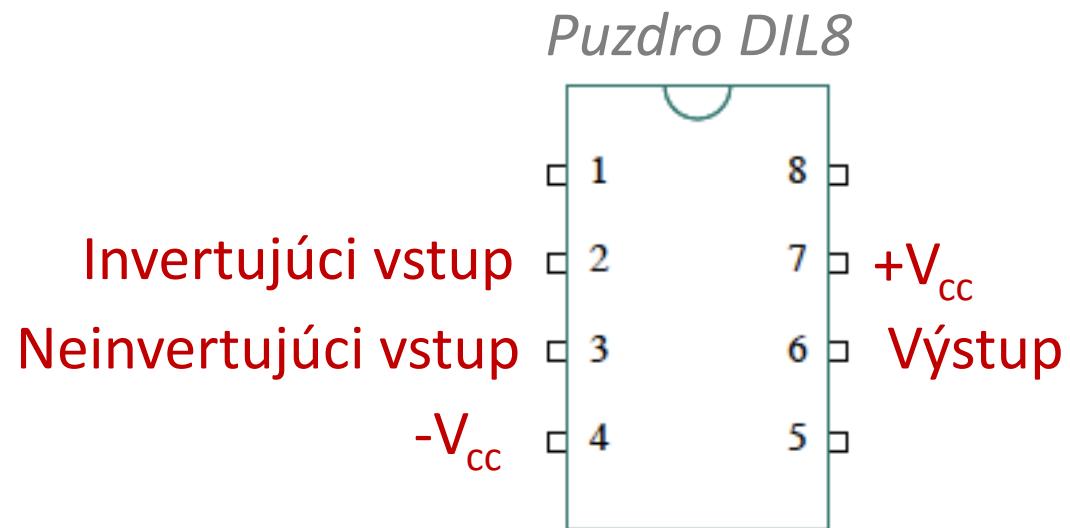
**Operačný zosilňovač** je elektronický obvod realizujúci funkcie **zosilnenia, sčítania, odčítania, násobenia, delenia a pod.**

- OZ obsahuje tranzistory, rezistory, kondenzátory...
- Dostupný ako integrovaný obvod



# Operačný zosilňovač (OZ)

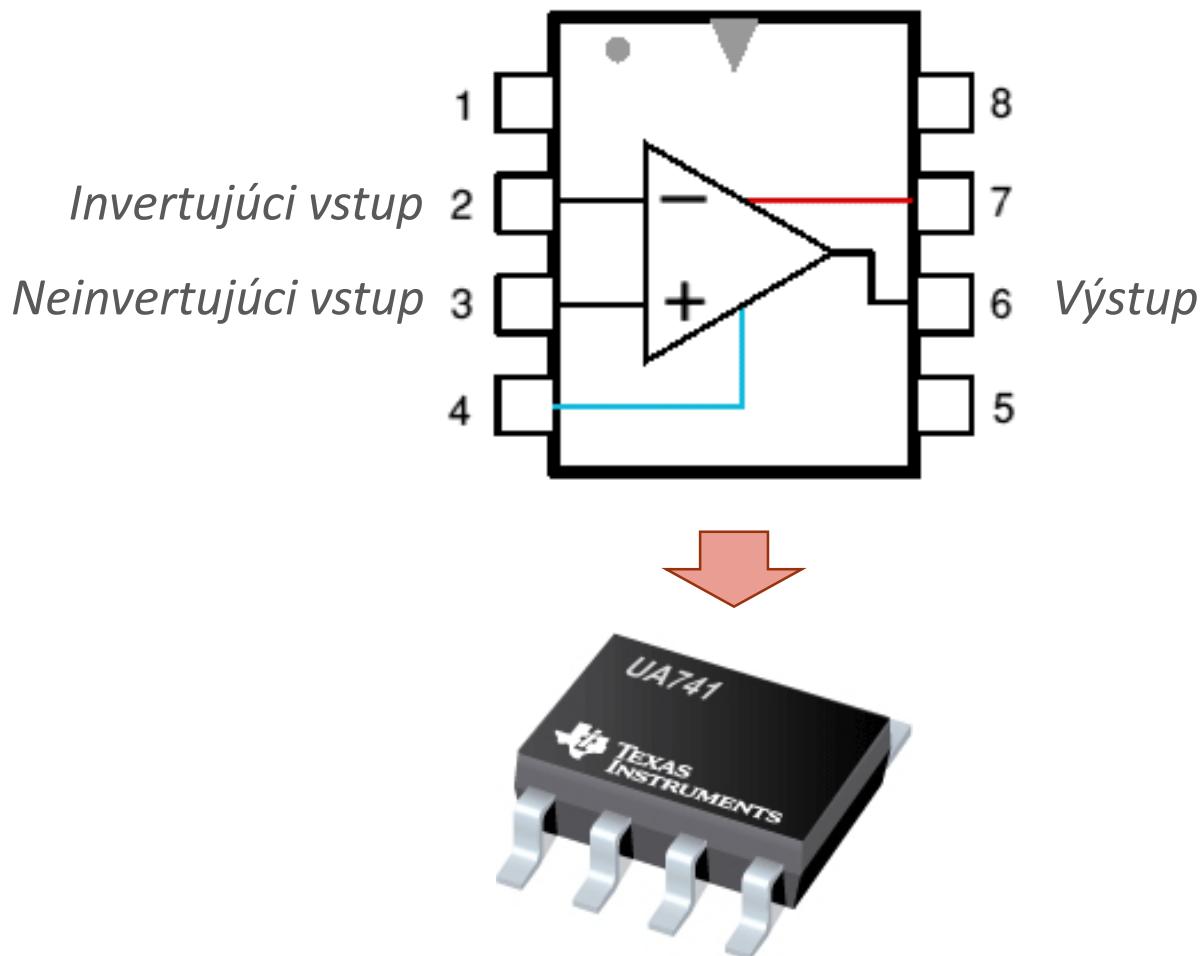
- Schematická značka a terminál



**Tri signálové terminály:** invertujúci a neinvertujúci vstup, a výstup

# Operačný zosilňovač (OZ)

## ■ Terminály OZ

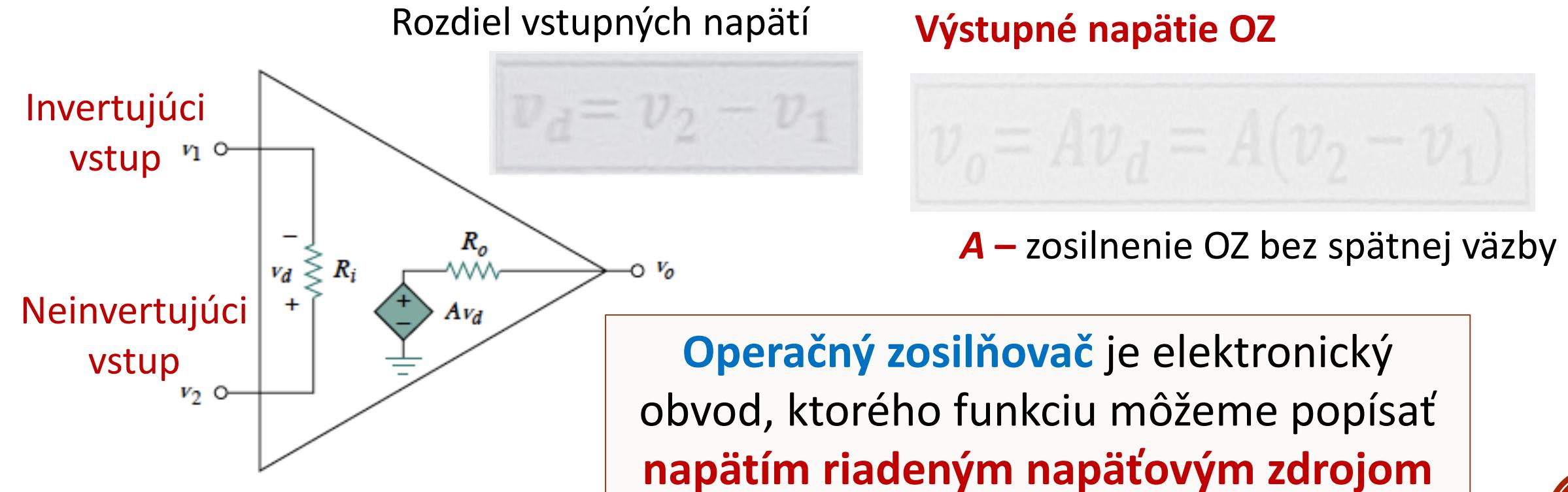


- **Invertujúci vstup** – ak na invertujúci vstup pivedieme AC signál a na neinvertujúcim vstupe je konštantná DC hodnota napäťia, potom na výstupe OZ bude fáza signálu otočená o  $180^\circ$  = **invertovaný vstupný signál**

- **Neinvertujúci vstup** – neinvertuje vstupný signál

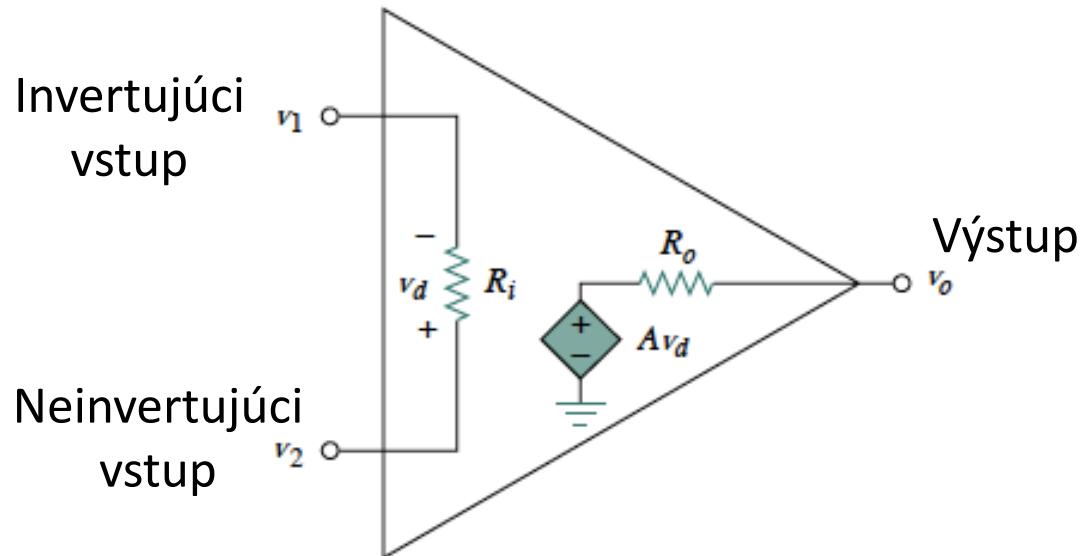
# Operačný zosilňovač (OZ)

**Operačný zosilňovač** zosilňuje rozdiel napäti medzi jeho invertujúcim a neinvertujúcim vstupom



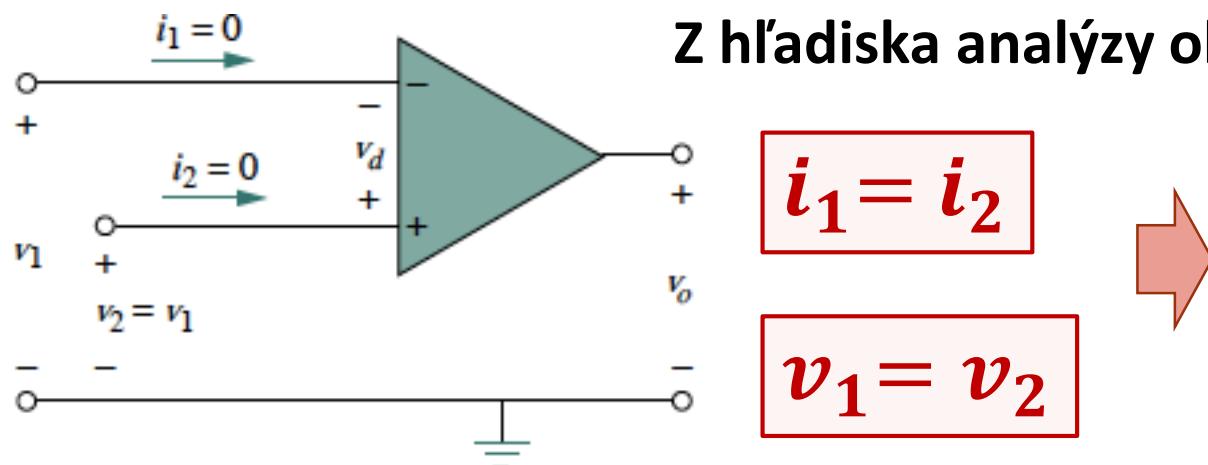
# Ideálny OZ

- Model OZ – napäťím riadený napäťový zdroj + vstupný a výstupný odpor



Ideálny OZ

- Zosilnenie bez spätej väzby:  $A \rightarrow \infty$
- Vstupný odpor:  $R_i \rightarrow \infty$
- Výstupný odpor:  $R_o \rightarrow 0$

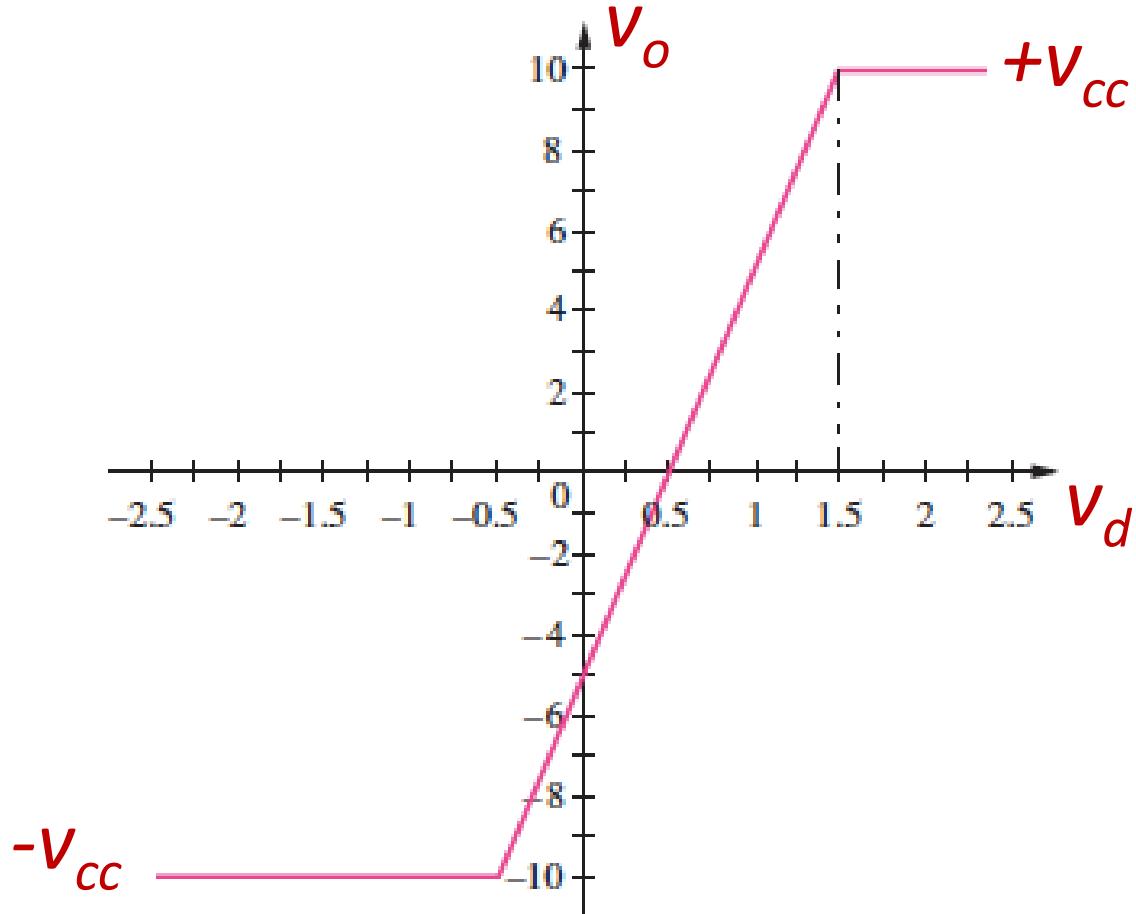


Z hľadiska analýzy obvodov platí:

1. Prúd do oboch terminálov je nulový
2. Napätie medzi vstupnými terminálmi je nulové

# Operačný zosilňovač

## ■ Prevodová charakteristika a zosilnenie OZ



**Zosilnenie OZ**

$$A_v = \frac{\partial v_o}{\partial v_d}$$

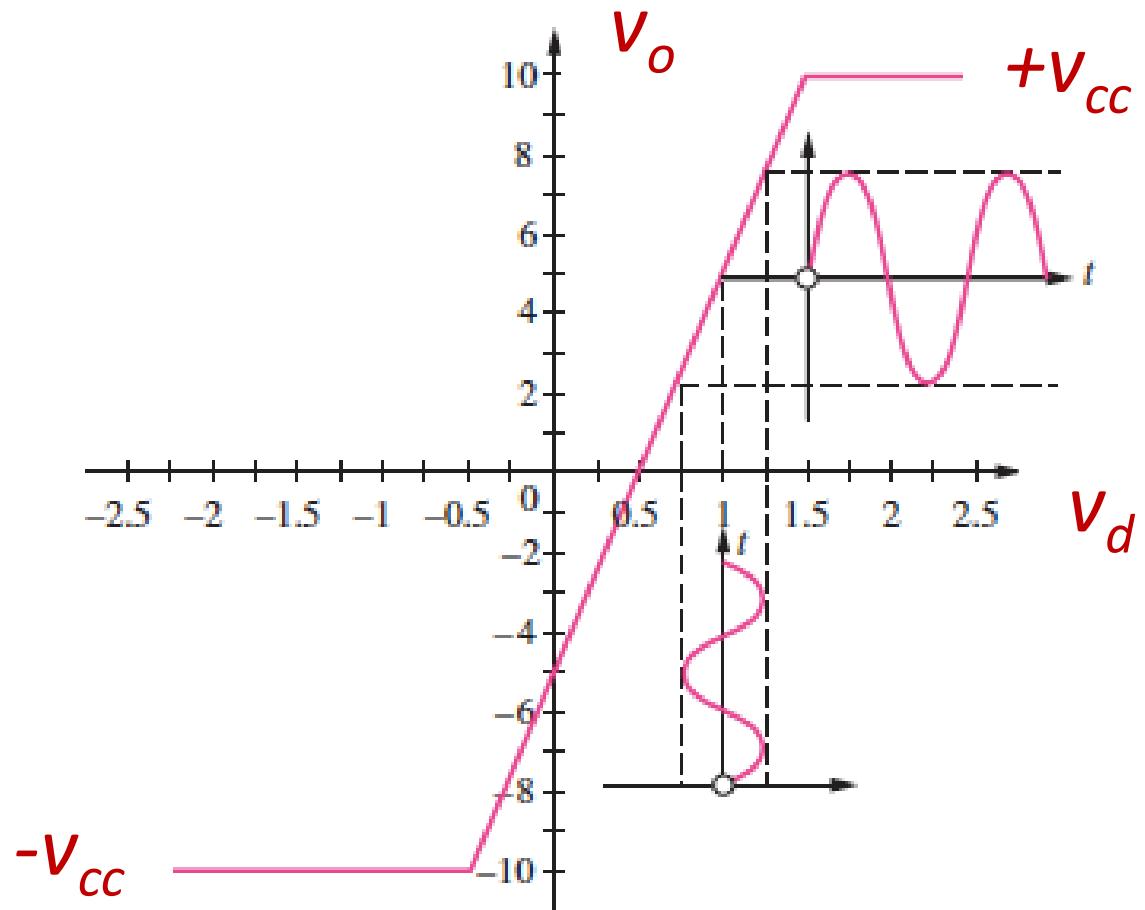
Príklad: Určite zosilnenie OZ z uvedenej prevodovej charakteristiky:

$$A_v = \frac{\partial v_o}{\partial v_d} = \frac{10 - 0}{1.5 - 0.5} = 10$$

$$A_v [dB] = 20 \cdot \log(10) = 20 \text{ dB}$$

# Operačný zosilňovač

## ■ Prevodová charakteristika a zosilnenie OZ



Príklad:

Z prevodovej charakteristiky odčítajte zosilnenie OZ.

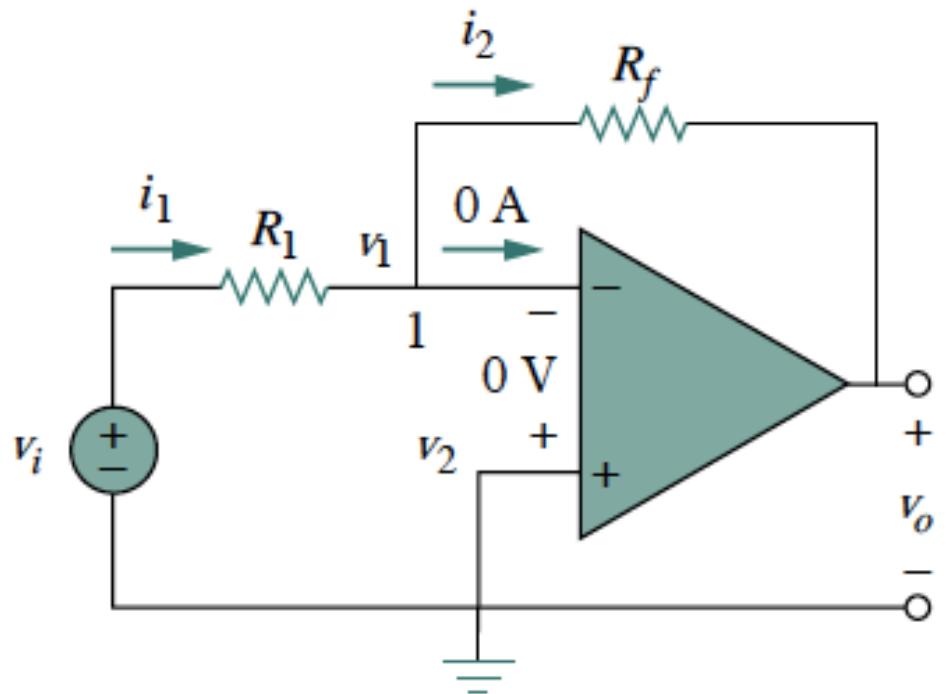
$$A_v = \frac{\partial V_o}{\partial V_d} = \frac{8 - 2}{1.25 - 0.75} = 8$$

$$A_v[dB] = 20 \cdot \log(8) = 18 dB$$

# Invertujúci OZ

**Inverzujúci OZ** otáča fázu vstupného signálu a zosilňuje ho

- Zapojenie invertujúceho OZ



- Neinvertujúci vstup je pripojený na zem
- Vstupné napätie  $V_i$  je privedené na invertujúci vstup OZ cez rezistor  $R_1$
- Výstup OZ je pripojený na invertujúci vstup cez spätno-väzobný rezistor  $R_f$

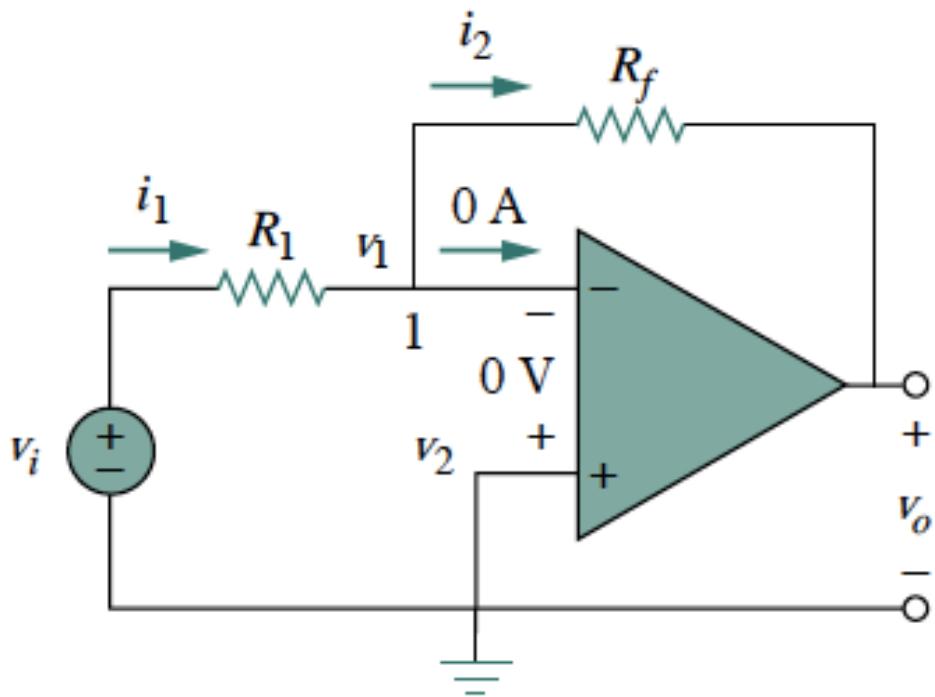
# Invertujúci OZ

Otázka: Ako je definované zosilnenie invertujúceho zosilňovača?

Pre invertujúci OZ platí:

$$i_1 = i_2$$

$$v_1 = v_2 = 0$$



Musíme vyjadriť  $v_o/v_i$

$$\frac{v_i - v_1}{R_1} = \frac{v_1 - v_o}{R_f} \quad \rightarrow \quad \frac{v_i}{R_1} = -\frac{v_o}{R_f}$$

$$A_v = \frac{v_o}{v_i} = -\frac{R_f}{R_1}$$

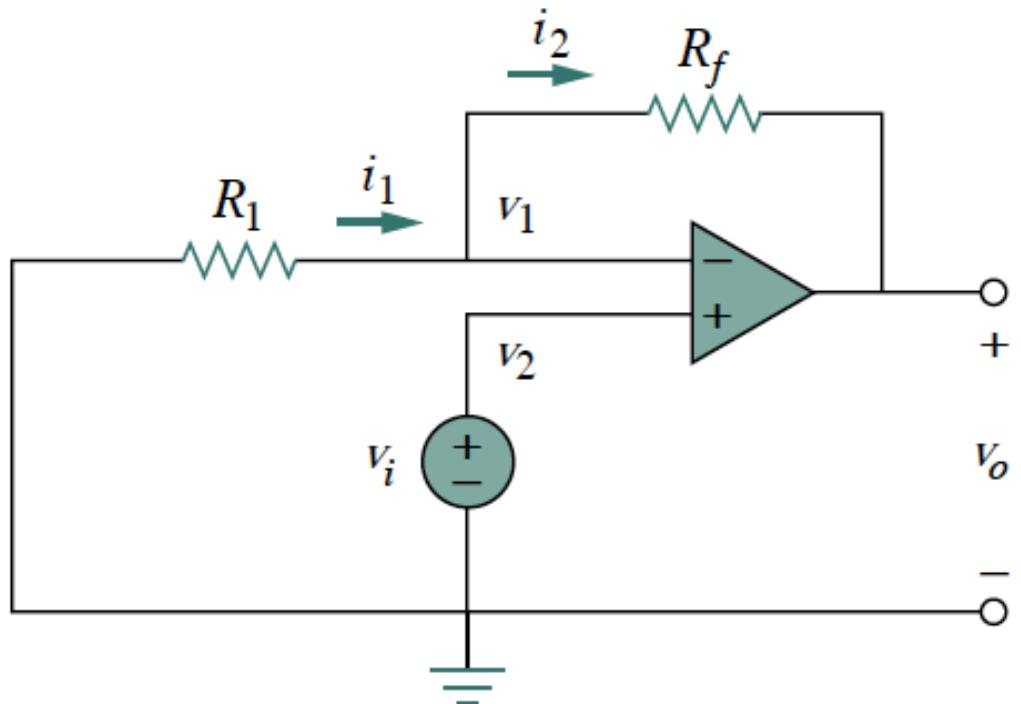
Invertujúci OZ

- Znamienko minus hovorí o fáze
- Zosilnenie je dané pomerom rezistorov  $R_f/R_1$

# Neinvertujúci OZ

**Neinverzujúci OZ** navrhnutý tak aby mal kladné zosilnenie  
(neotáča fázu)

- Schéma neinverzujúceho OZ



- Vstupné napätie  $V_i$  je privedené na neinvertujúci vstup OZ
- Invertujúci vstup je pripojený na zem cez rezistor  $R_1$
- Výstup OZ je pripojený na invertujúci vstup cez spätno-väzobný rezistor  $R_f$

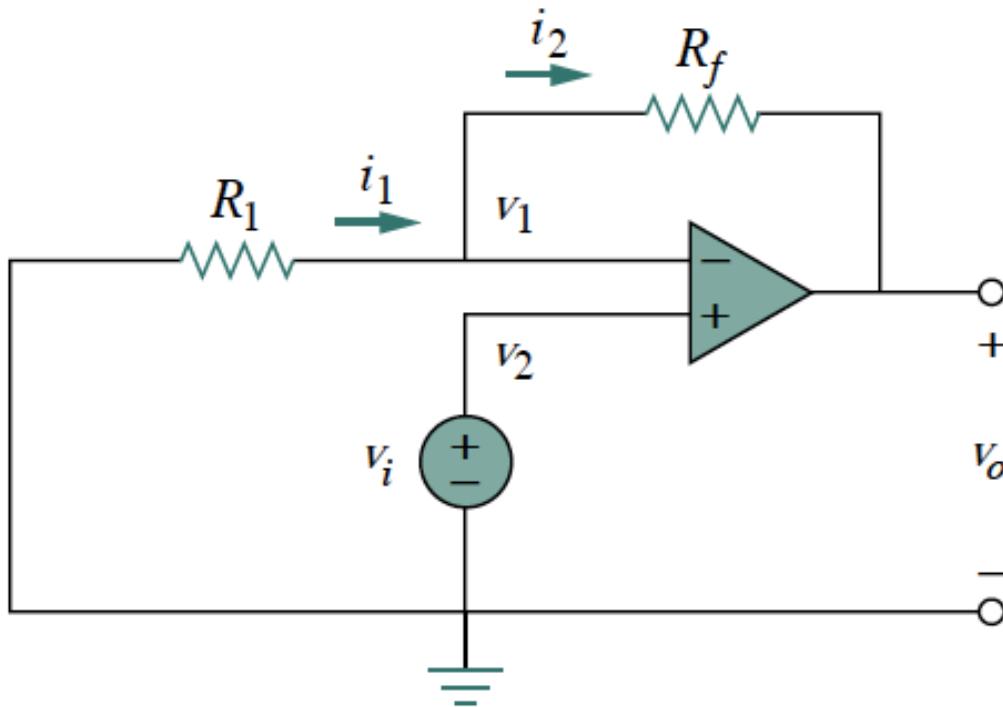
# Neinvertujúci OZ

- Otázka: Ako je definované zosilnenie neinvertujúceho zosilňovača?

Pre neinvertujúci OZ platí:

$$i_1 = i_2$$

$$v_1 = v_2 = v_i$$



Musíme vyjadriť  $v_o/v_i$

$$\frac{0 - v_1}{R_1} = \frac{v_1 - v_o}{R_f} \quad \rightarrow \quad -\frac{v_i}{R_1} = \frac{v_i - v_o}{R_f}$$

$$A_v = \frac{v_o}{v_i} = 1 + \frac{R_f}{R_1}$$

Neinvertujúci OZ

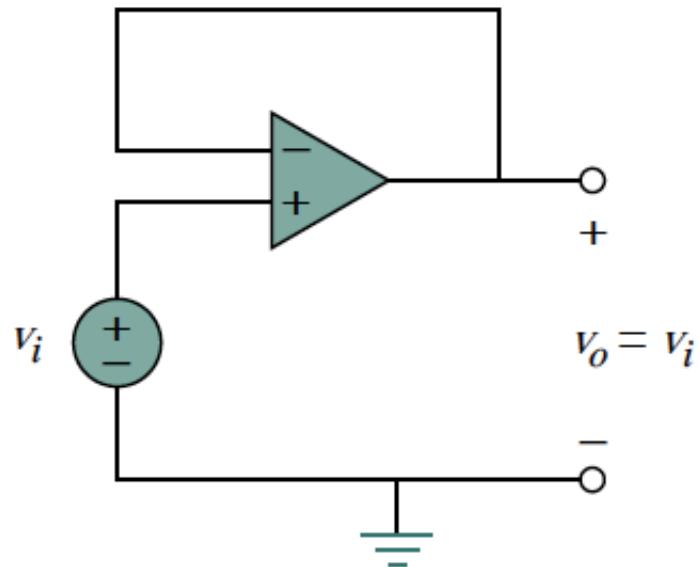
- Znamienko plus hovorí o fáze (výstup vo fáze)
- Zosilnenie je dané pomerom rezistorov  $R_f/R_1$

# Napäťový sledovač

- Ak v prípade neinvertujúceho OZ je  $R_f=0$  alebo  $R_1 = \text{nekonečno}$ , získame **napäťový sledovač**



**Napäťový sledovač alebo zosilňovač s jednotkovým zosilnením  
je obvod, ktorý sleduje vstupný signál**



- Výstupné napätie sleduje vstupné
- Zosilnenie je rovné 1 ( $A_v = 1$ )

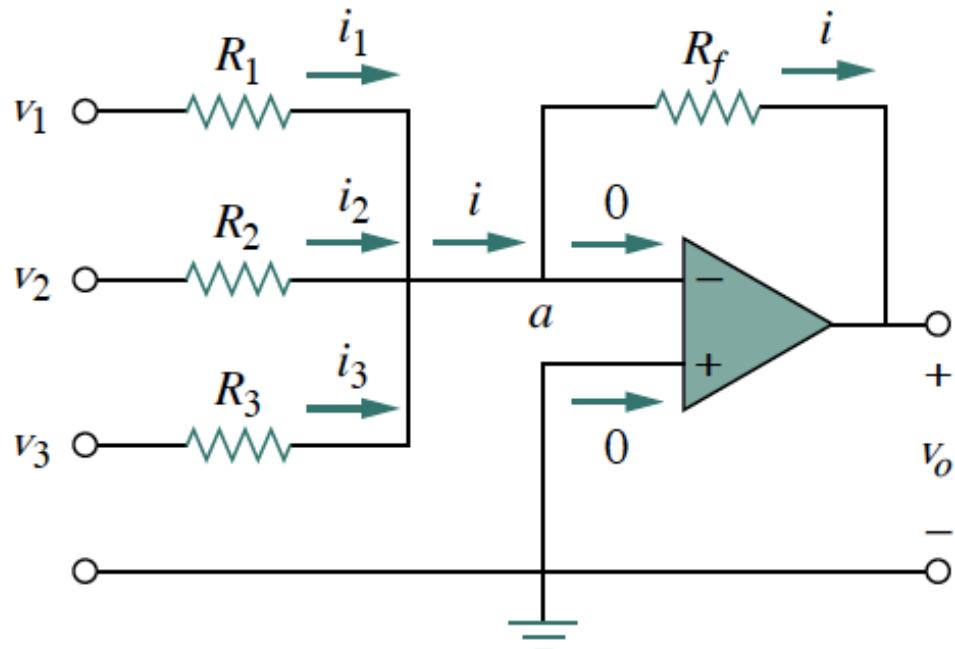
Použitie: na oddelenie obvodov zapojených za sebou

# Sumačný zosilňovač

- OZ môžeme použiť aj na sčítanie alebo odčítanie signálov



Sumačný zosilňovač je obvod používaný na sčítanie vstupných a výstupných signálov na základe váh. Váhy su definované rezistormi.



- Založený na princípe invertujúceho OZ
- Využíva výhodu viacerých vstupov
- Výstupné napätie je dané súčtom vstupných napätií, ktoré sú váhované vstupnými rezistormi

# Sumačný zosilňovač

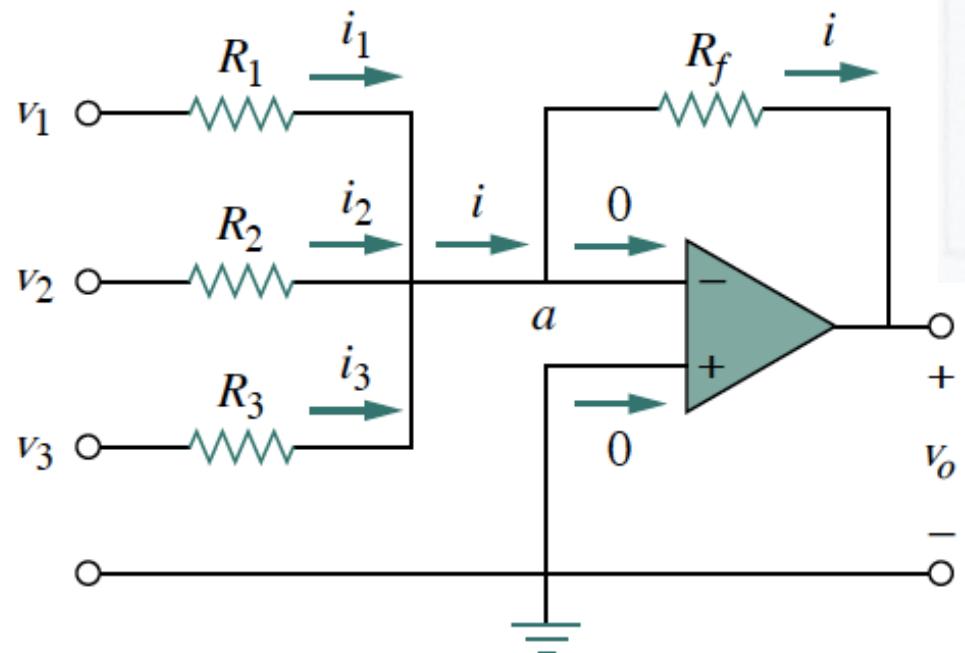
Otázka: Ako je definované výstupné napätie sumačného zosilňovača?

Pre sumačný zosilňovač platí:

$$\textcolor{red}{i = i_1 + i_2 + i_3}$$

$$i_1 = \frac{v_1 - v_a}{R_1} \quad i_2 = \frac{v_2 - v_a}{R_2} \quad i_3 = \frac{v_3 - v_a}{R_3} \quad i = \frac{v_a - v_o}{R_f}$$

$$\textcolor{red}{v_a = 0}$$

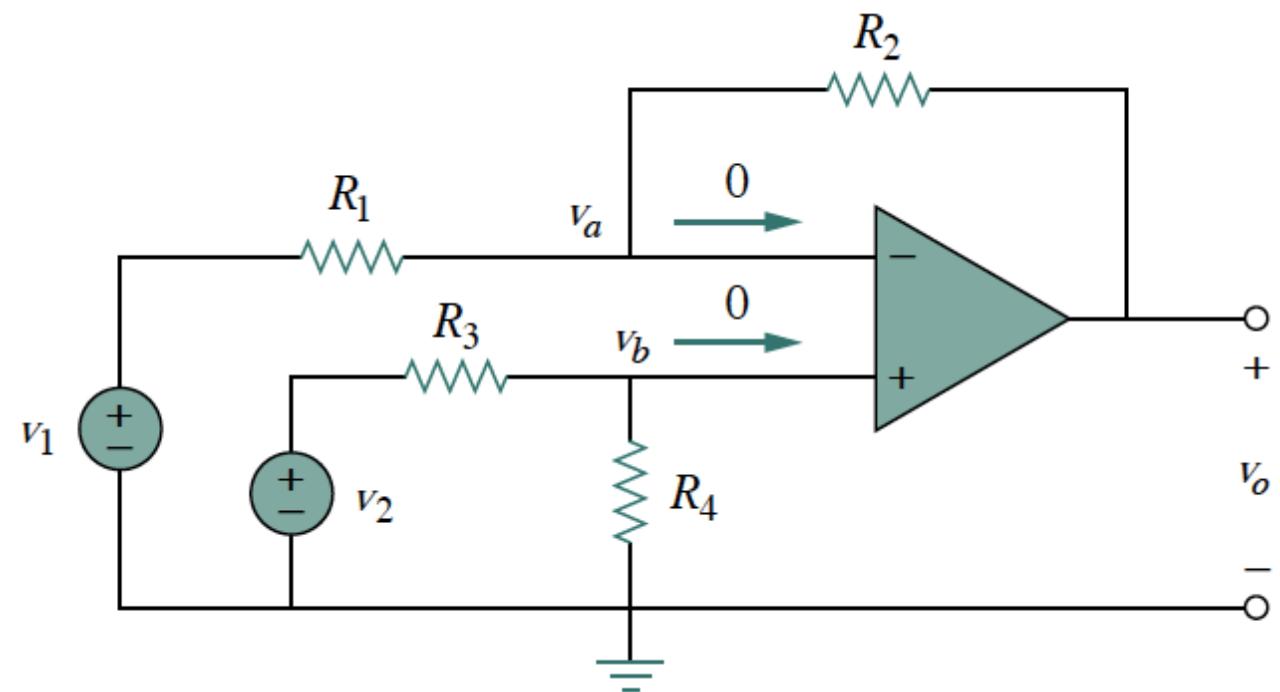


$$v_o = -\left( \frac{R_f}{R_1} v_1 + \frac{R_f}{R_2} v_2 + \frac{R_f}{R_3} v_3 \right)$$

- Znamienko plus hovorí o fáze
- Výstupné napätie je dané súčtom váhovaných vstupných napätí = **sumátor**

# Rozdielový zosilňovač

**Rozdielový zosilňovač** je obvod, ktorý **zosilňuje rozdiel** medzi dvoma vstupmi, ale **potláča a rovnaké signály** na jeho vstupoch



- Signály sú privádzané na oba vstupy
- Na invertujúci vstup sú pripojené rezistory  $R_1$  a  $R_2$
- Na neinvertujúci vstup je signál privádzaný cez **napäťový delič**, ktorý tvoria rezistory  $R_3$  a  $R_4$

# Aktívne filtre

## Pasívne filtre

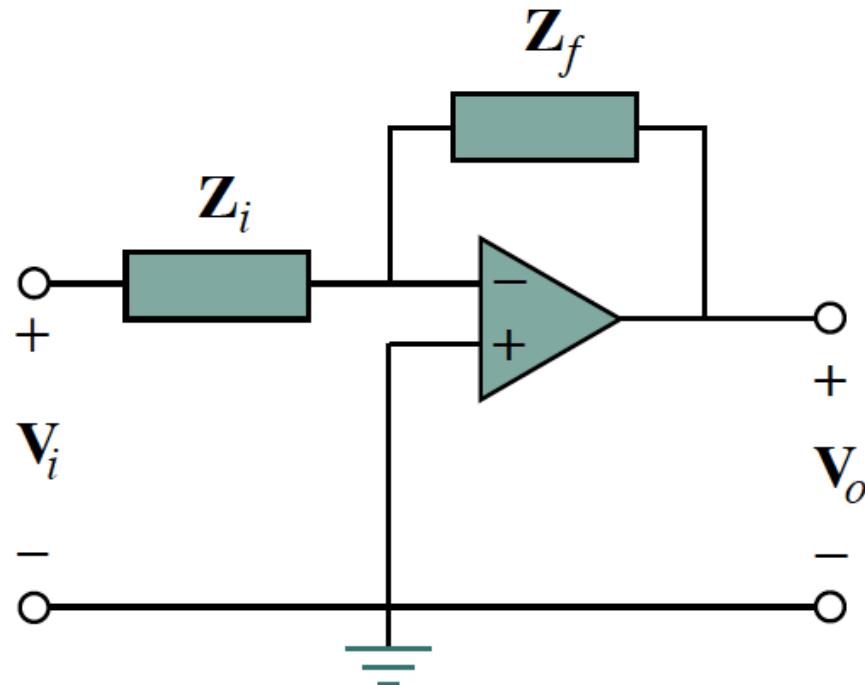
- Nemajú zosilnenie – zosilnenie je rovné 1
  - Často používajú cievky, ktoré sú príliš drahé
  - Výhodne iba pre vysoko-frekvenčné obvody
  - Pre nízke frekvencie – plošné náročné

**Aktívne filtre majú zosilnenie väčšie ako 1,  
sú lacnejšie a používajú sa iba rezistory, kondenzátory a OZ**

Môžeme ich realizovať v integrovanej forme

# Aktívne filtre

- Prenosovú funkciu môžeme odvodiť ako v prípade pasívnych filtrov pomocou impedancií
- Všeobecné zapojenie aktívneho filtra pomocou OZ



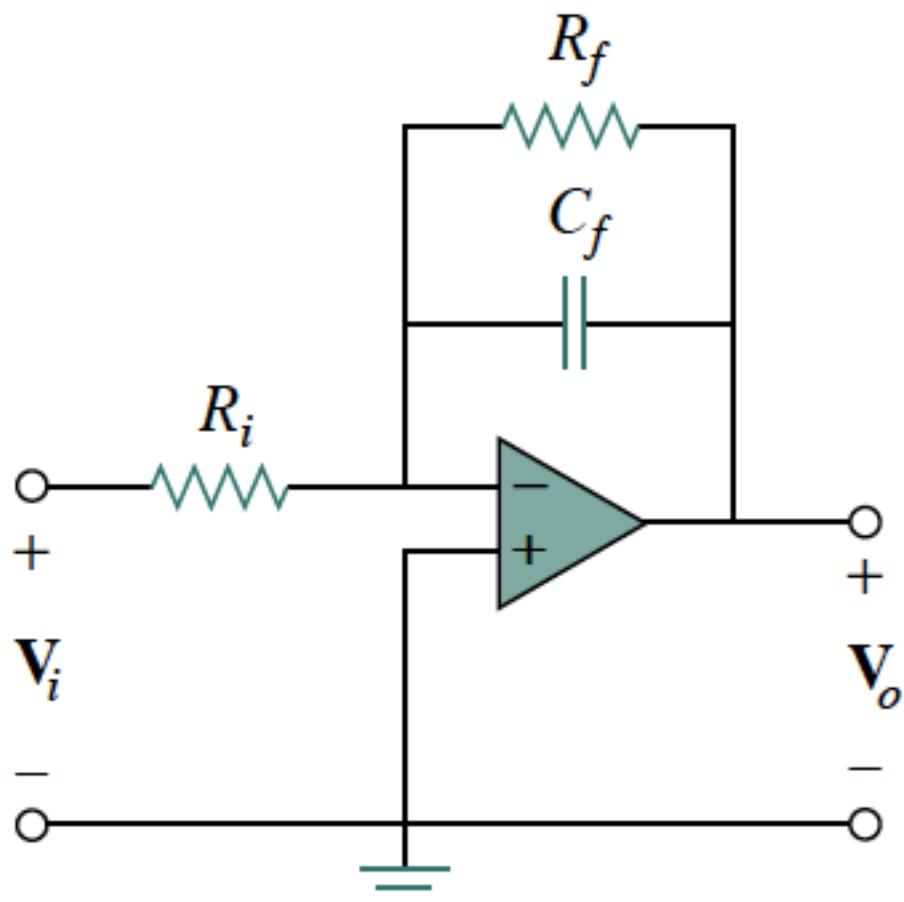
*Pre aktívny filter všeobecne platí:*

$$H(\omega) = \frac{V_o}{V_i} = -\frac{Z_f}{Z_i}$$

Výber pasívnych súčiastok pre  $Z_f$  a  $Z_i$  definuje či filter bude DP alebo HP

# Aktívny DP filter

## Schéma zapojenia



Prenosová funkcia aktívneho DP filtra:

$$Z_i = R_i$$

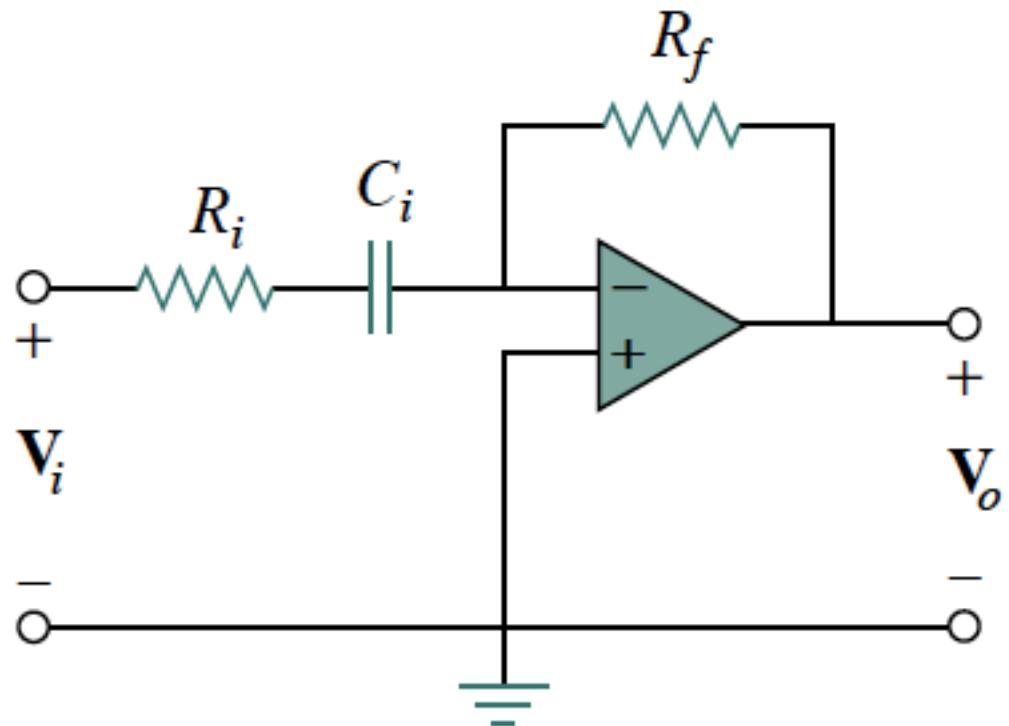
$$Z_f = R_f \parallel \frac{1}{j\omega C}$$

$$H(\omega) = -\frac{Z_f}{Z_i} = -\frac{R_f}{R_i} \frac{1}{1 + j\omega R_f C_f}$$

- Zosilnenie je dané pomerom  $-R_f/R_i$
- Medzná frekvencia je rovnaká ako pri pasívnom DP filtri

# Aktívny HP filter

## Schéma zapojenia



Prenosová funkcia aktívneho HP filtra:

$$Z_i = R_i + \frac{1}{j\omega C}$$

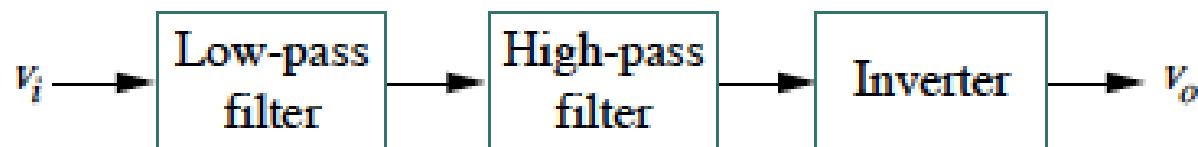
$$Z_f = R_f$$

$$H(\omega) = -\frac{R_f}{R_i} \frac{1}{1 + \frac{1}{j\omega R_i C_i}} = -\frac{j\omega R_f C_i}{1 + j\omega R_i C_i}$$

- Zosilnenie je dané pomerom  $-R_f/R_i$
- Medzná frekvencia je rovnaká ako pri pasívnom HP filtri

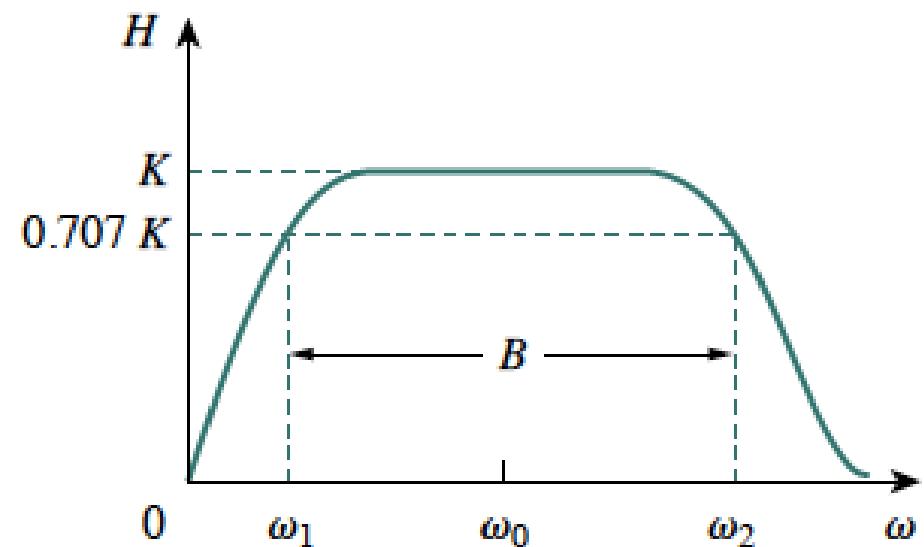
# Aktívny pásmový filter

- kaskádové zapojenie aktívneho DP a HP filtra



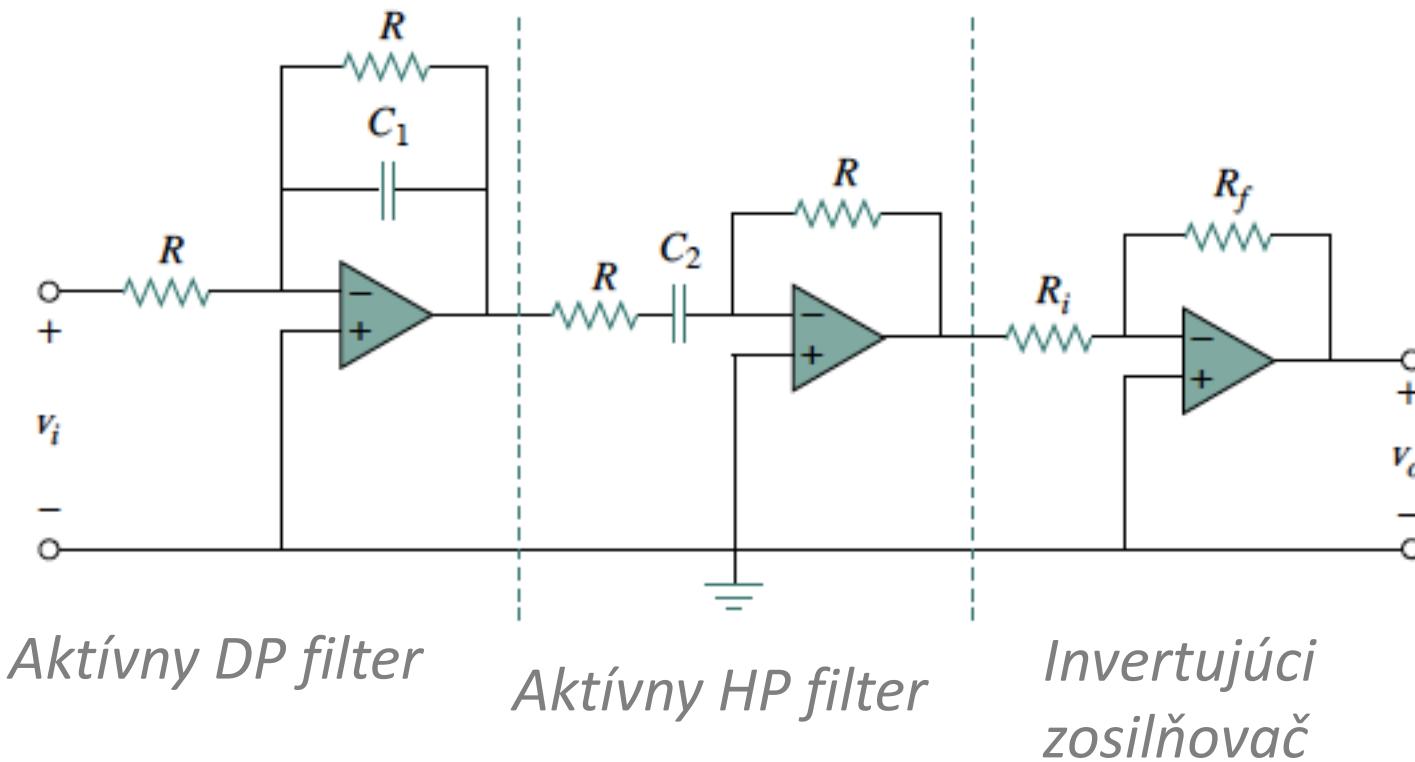
- DP a HP filter majú zosilnenie 1
- Signál je najprv odfiltrovaný a potom zosilnený

Frekvenčná charakteristika:



# Aktívny pásmový filter

- Schéma zapojenia



**Ďakujem za pozornosť.**