

# Operačné zosilňovače

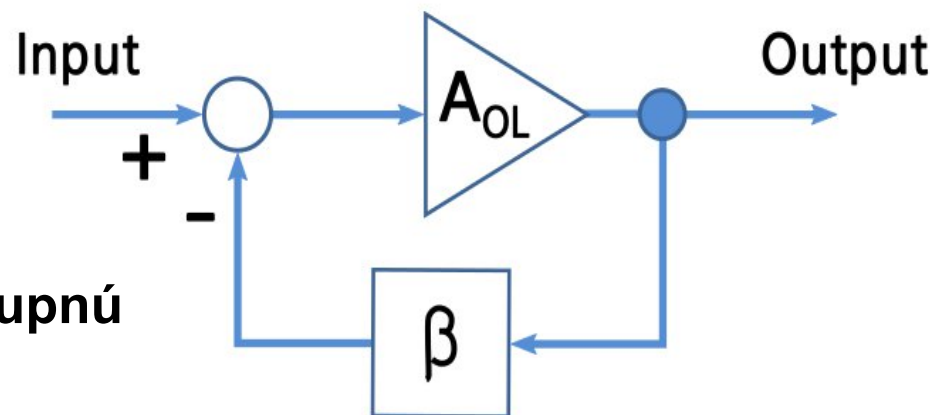
Richard Balogh, 2023



# 11. História

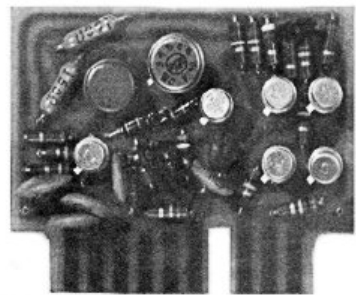
## Spätná väzba - feedback

- 👍 Zosilnenie obvodu je menej citlivé na zmeny hodnôt jednotlivých súčiastok
- 👍 Vplyv šumov je menší
- 👍 Dá sa znížiť nelineárne skreslenie
- 👍 Môžeme ovplyvniť vstupnú aj výstupnú impedanciu
- 👍 Môžeme rozšíriť šírku pásma zosilňovača

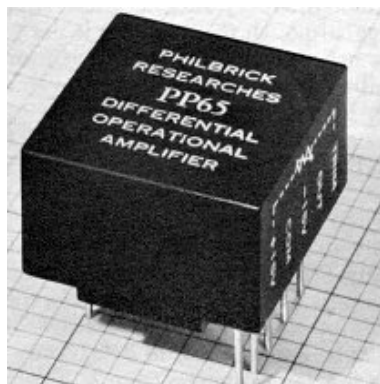


**DOBRA** spätná väzba môže byť aj **ZÁPORNÁ**

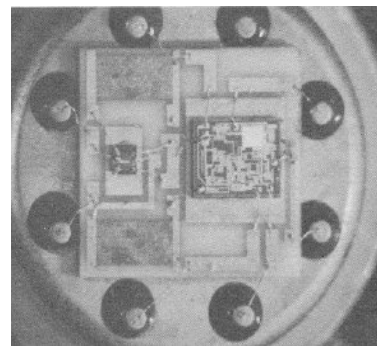
# 11. História Technology



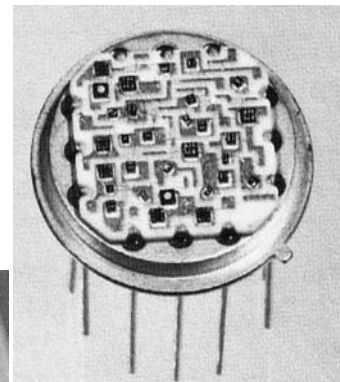
GAP/R's model P45: a solid-state, discrete op-amp (1961)



GAP/R's model PP65: a solid-state op-amp in a potted module (1962)



Early FET input AD op-amp (1970)



ADI's HOS-050: a high speed hybrid IC op-amp (1979)

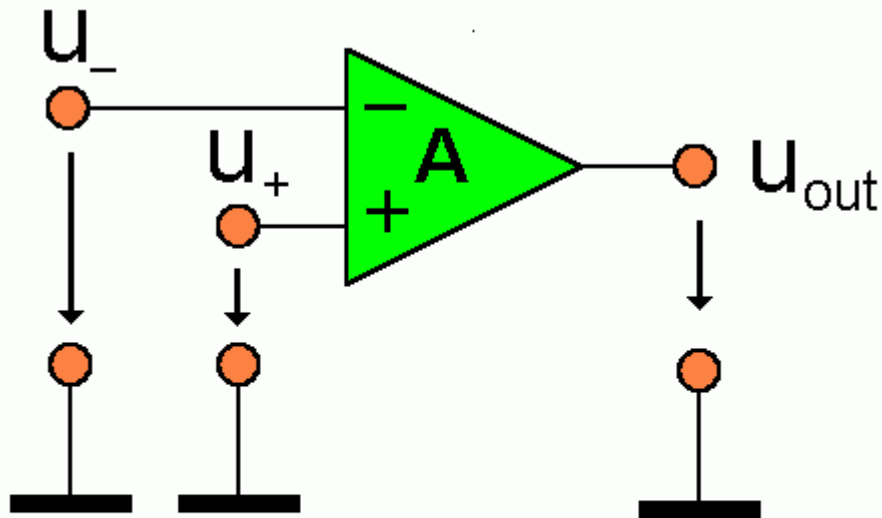


TI's OPA2188: first zero-drift, 36-V operational amplifier (2012)



# Operačný zosilňovač

operational amplifier, Op-Amp

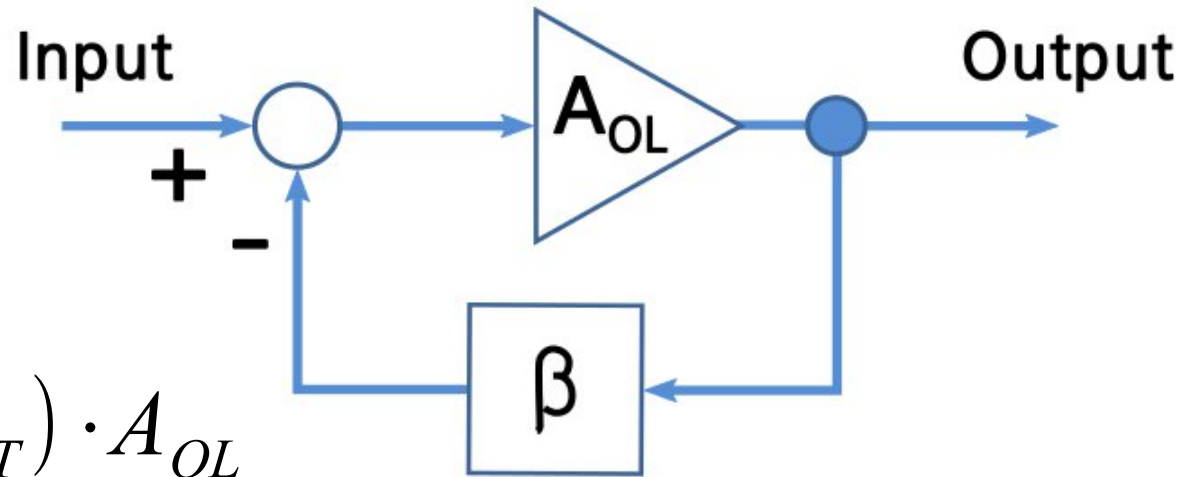


$$u_{out} = A (u_+ - u_-)$$

Ideálny zosilňovač:

- 1)  $A = \infty$
- 2)  $R_{vst} = \infty$
- 3)  $R_{výst} = 0$
- 4)  $f_{max} = \infty$
- 5)  $u_{out} = 0$  ak  $u_{diff} = 0$
- 6)  $u_{max} = \infty$

# Spättná väzba



$$u_{OUT} = (u_{INP} - \beta u_{OUT}) \cdot A_{OL}$$

$$u_{OUT} = u_{INP} A_{OL} - u_{OUT} \beta A_{OL}$$

$$u_{OUT} + u_{OUT} \beta A_{OL} = u_{INP} A_{OL}$$

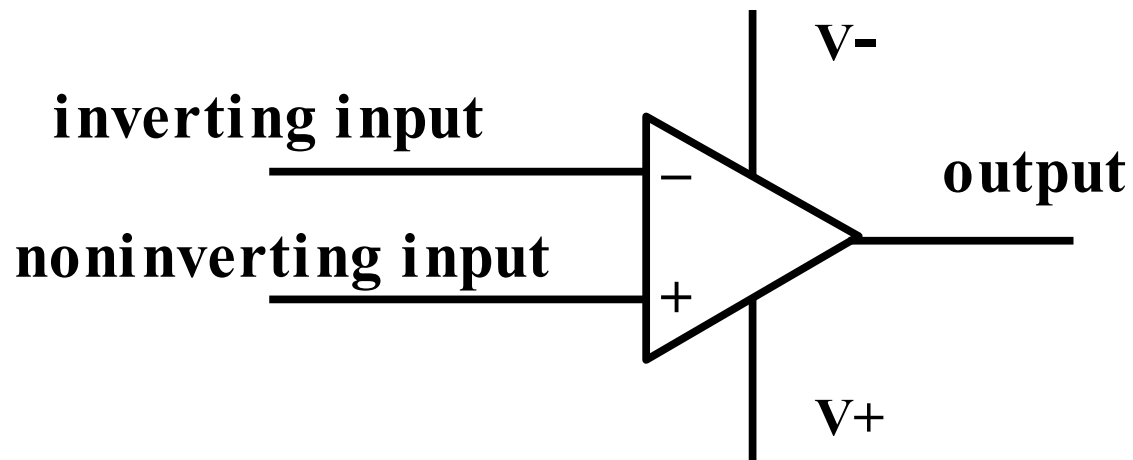
$$u_{OUT} (1 + \beta A_{OL}) = u_{INP} A_{OL}$$

$$u_{OUT} = u_{INP} \frac{A_{OL}}{(1 + \beta A_{OL})}$$

*ak platí  $A \gg 1$*

$$u_{OUT} = u_{INP} \frac{1}{\beta}$$

# Operačné zosilňovače

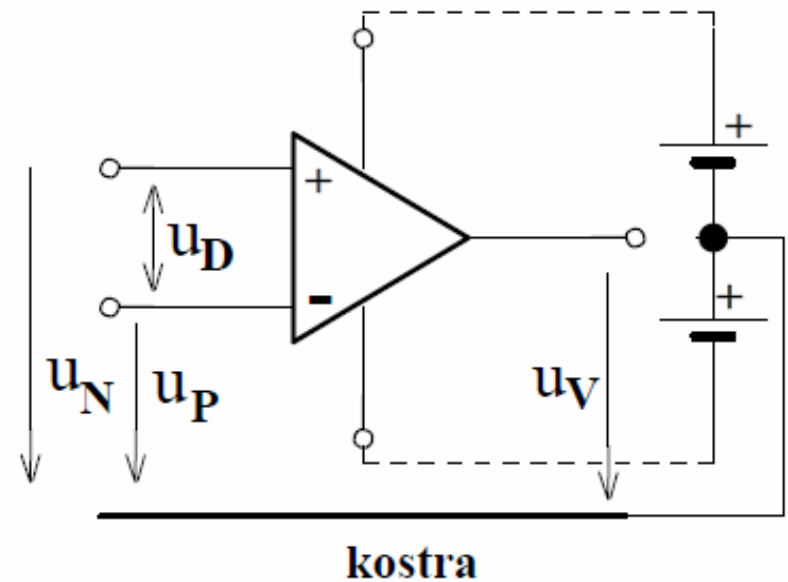


Operačný zosilňovač s napájaním.

a.) symetrický vstup - asymetrický výstup

*Poznámka:*

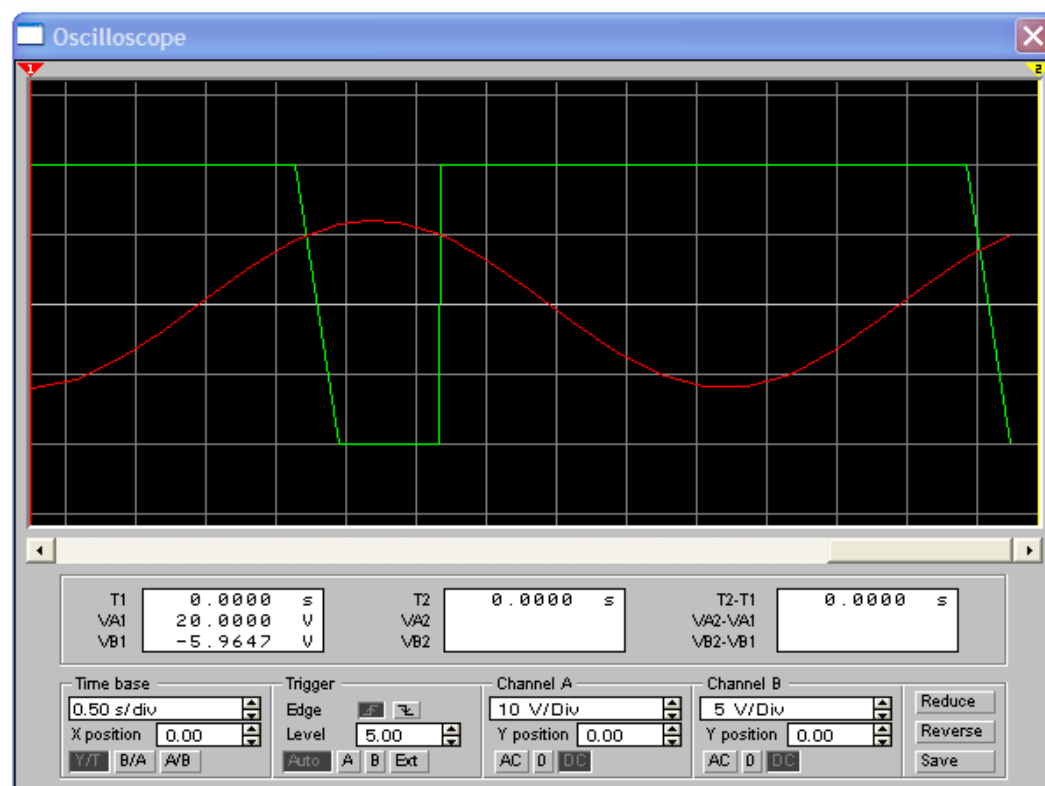
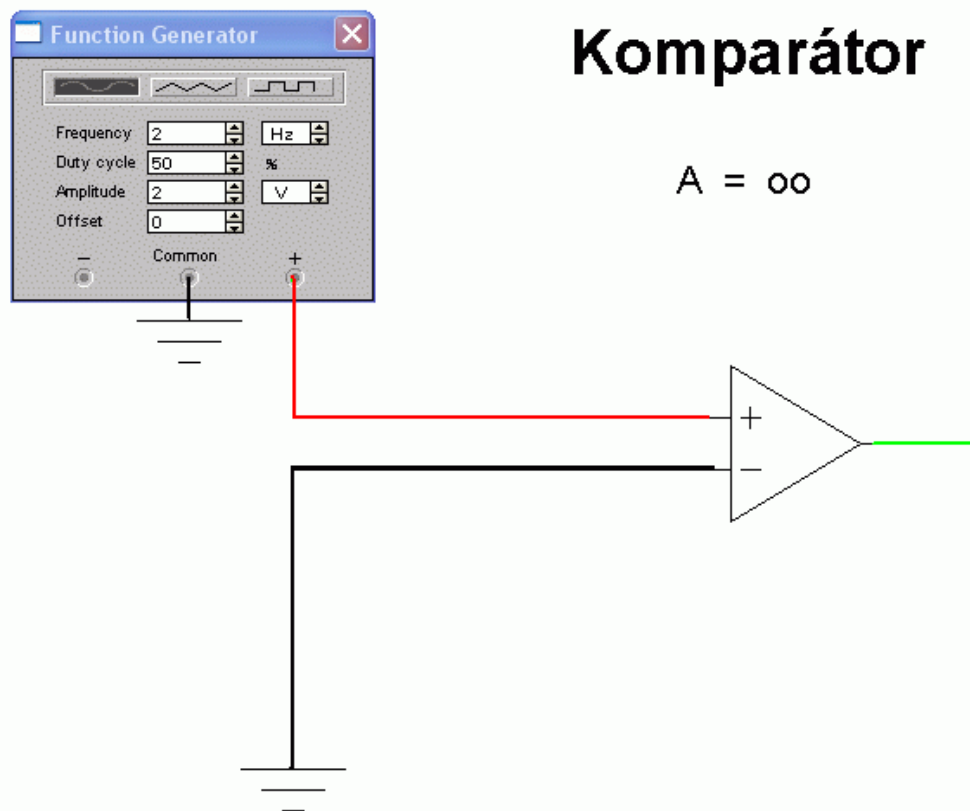
*Je to najbežnejšie použitie a zapojenie OZ*



# Operačné zosilňovače

## Komparátor

$$A = \infty$$



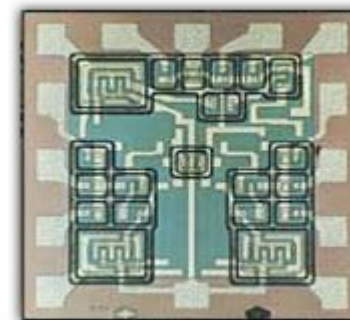


# Operačné zosilňovače

## Základné druhy

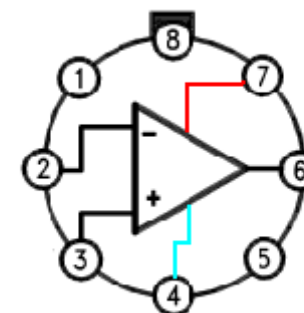
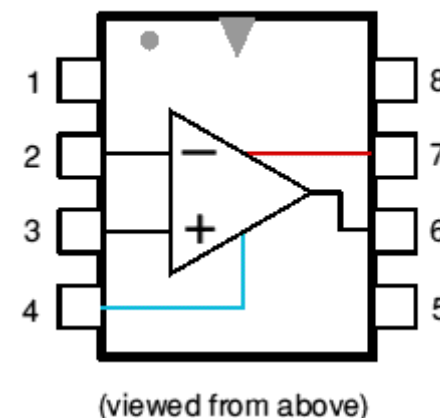
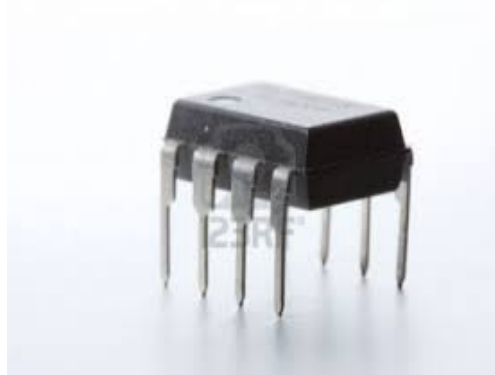
### Technológia

- monolitické
- hybridné



### Prevedenie

- kovové diskové púzdro TO ( 8 vývodov)
- plastové radové púzdro DIL
- plastové púzdro SMD



# Operačné zosilňovače

## Napájanie

### Súmerné

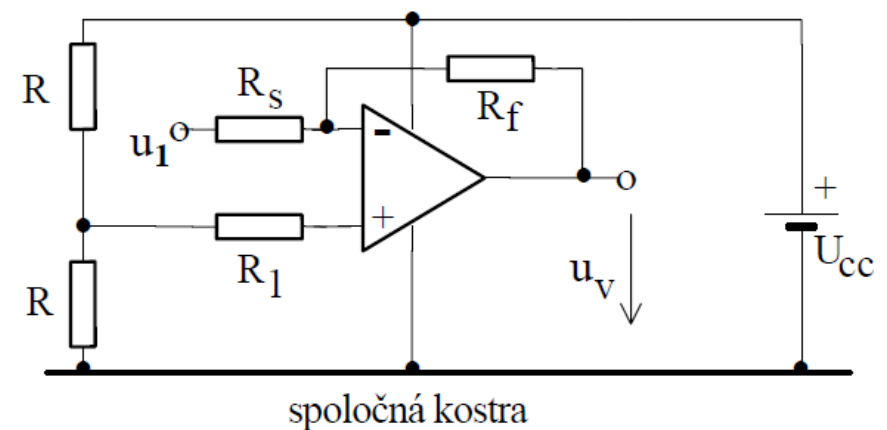
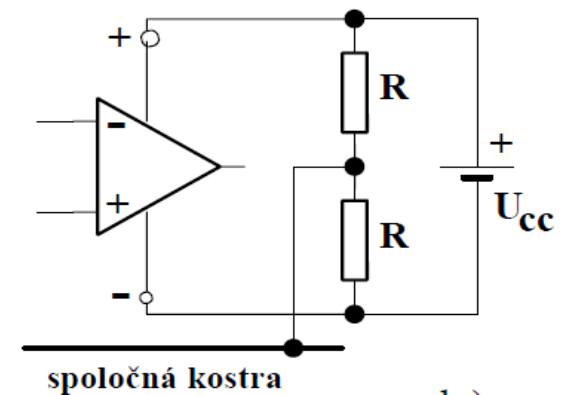
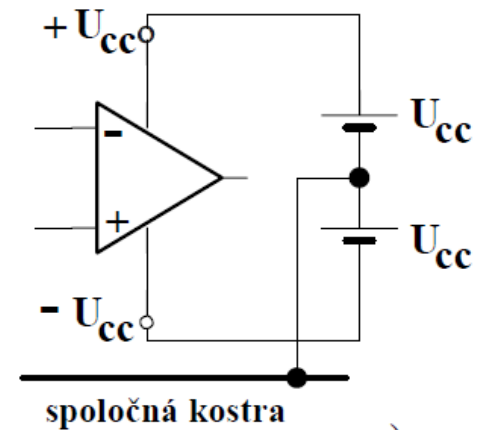
- súmerný  $\pm U_{cc}$
- súmerný s jedným zdrojom umelý stred

### Nesúmerné

- jeden zdroj
  - vhodnejšie pre  $\sim$  signál (oddelený kondenzátorom)
  - odpory R a R1 posúvajú prac. bod do stredu  $U_{cc}$
  - nulová úroveň vstupu i výstupu je potom  $0,5U_{cc}$
  - $u_v$  - len kladné hodnoty

Poznámka:

*Lepšie výsledky dávajú OZ priamo určené pre jeden napájací zdroj (presnejšie, menšie drifty)*



# Operačné zosilňovače

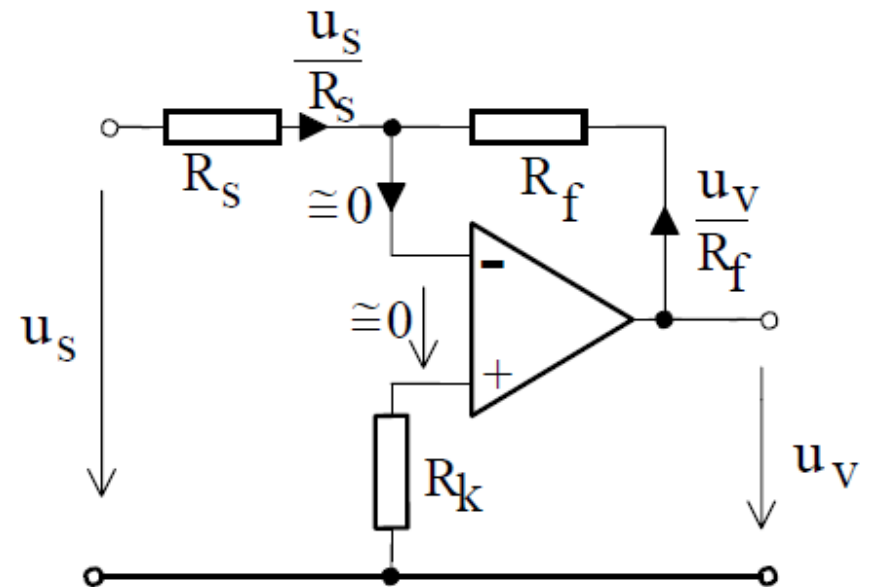
## Invertujúci zosilňovač

$$\frac{u_s}{R_s} = -\frac{R_f}{R_s} u_s$$

$$R_k = \frac{R_f R_s}{R_f + R_s}$$

$$R_{vst} \simeq R_s \quad a \quad R_{výst} \simeq \frac{R_v}{\beta A_0}$$

- platí  $A_{sv} \ll A_0$  ( $A_{sv} < 0,01 A_0$ )
- pre odpory platí  
veľké – prúdy zrovnateľné s  $I_{N0}$   
malé – prúdy  $< I_{vmax}$



$$u_v = -\frac{R_f}{R_s} \cdot u_s$$

# Operačné zosilňovače

## Neinvertujúci zosilňovač

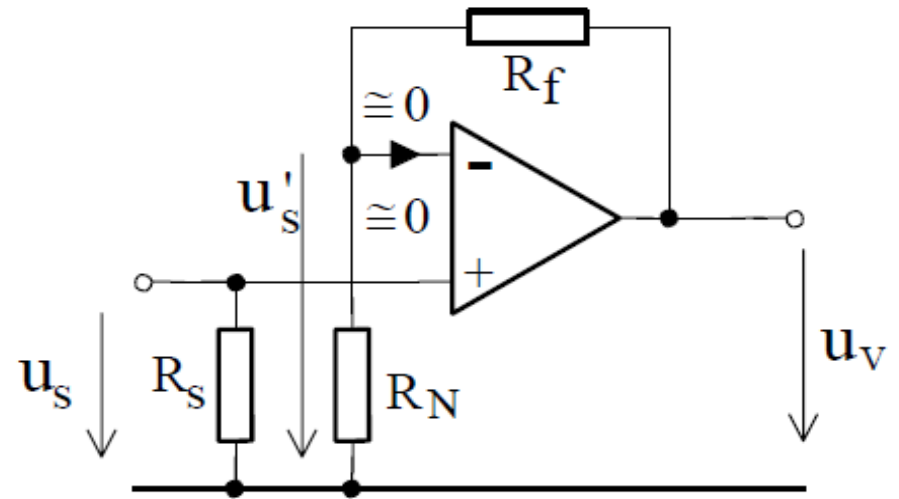
$$u'_s = \beta u_v = \left( \frac{R_N}{R_N + R_f} \right) u_v$$

$\beta$  – činiteľ spätnej väzby

$$R_{vst} \approx R_{CM} \quad \text{resp.} \quad R_{vst} = \frac{R_D}{1 + \beta A_0}$$

$$R_{výst} \approx \frac{R_v}{\beta A_c}$$

$$R_S = \frac{R_f R_N}{R_f + R_N}$$



$$u_v = \left( \frac{R_f}{R_N} + 1 \right) \cdot u_s$$

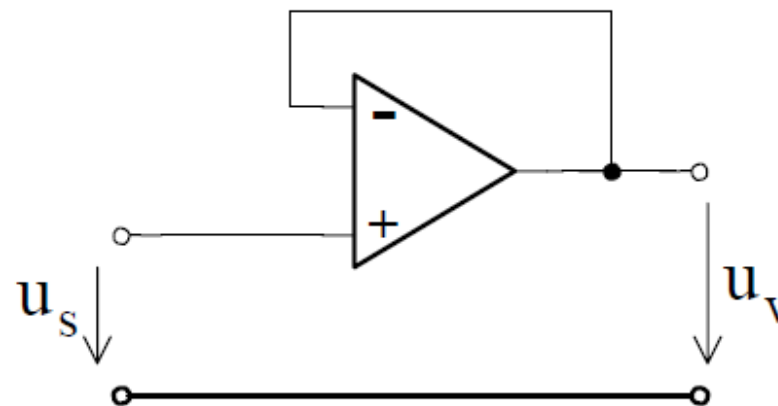
ak :  $u_s \cong u'_s$

# Operačné zosilňovače

## Napät'ový sledovač

### Neinvertujúci zosilňovač s $A=1$

- $A_u$  je 1 , teda  $u_s = u_v$
- $R_{vst} \approx 10^9 \Omega$  ,  $R_{výst} \approx 10^{-3} \Omega$   
(pre bipolár. vstupy)
- impedančný prevodník



# Operačné zosilňovače

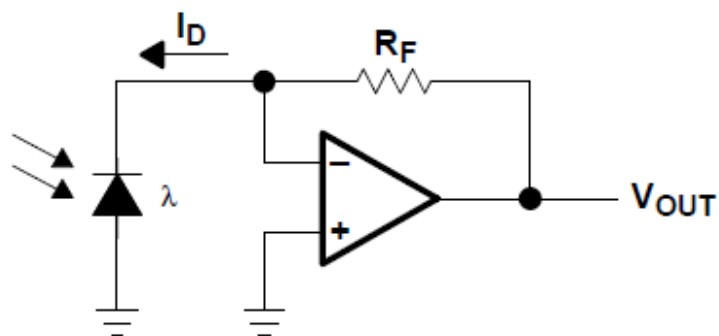
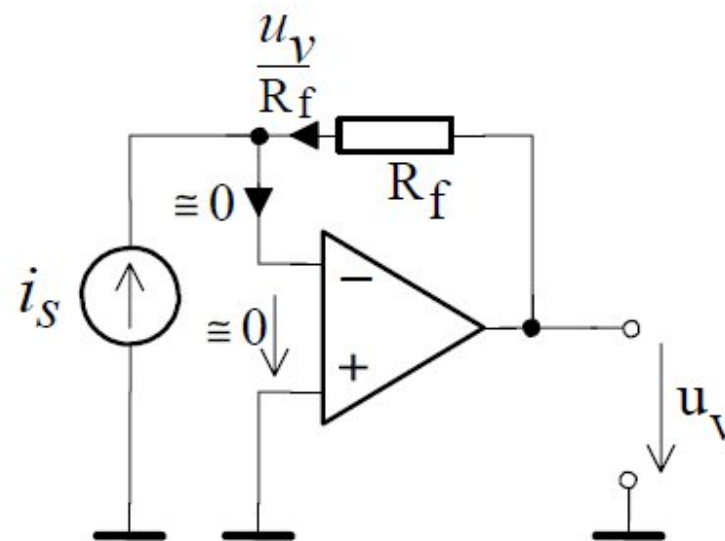
## Prevodník $I \rightarrow U$

Paralelná sieť z napät'ového výstupu

Riešenie:  $u_D \cong 0$ ,  $i_{vst} \cong 0$

$R_{vst} \rightarrow 0$  a  $R_{výst} \rightarrow 0$  (nulové sú pre ideálny OZ)

$$i_s = \frac{u_v}{R_f}$$



$$u_v = -i_s \cdot R_f$$

# Operačné zosilňovače

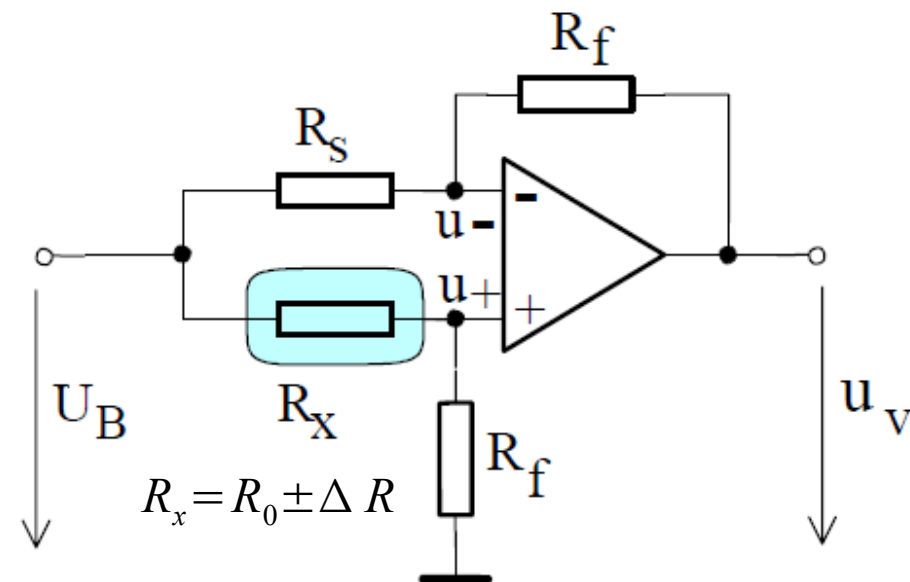
## Aktívny mostík

Časť mostíka tvoria SV obvody zosilňovača

Riešenie:

$$\frac{R_f}{R_s} + 1 \gg \Delta R \Rightarrow u_v \approx -U_B \frac{R_f}{R_s} \frac{\pm \Delta R}{\frac{R_f}{R_s} + 1}$$

- ☺ menej súčiastok
- ☺ linearita
- ☺  $u_v$  nezávisí od pomeru  $R_f/R_s$
- ☺ ľahšie vyváženie obvodu  $R_s$
  
- ☹ treba kvalitný OZ s veľkým CMRR,  $A_0$  a malými  $I_{No}$



a ak zvolíme pomer odporov  $\frac{R_f}{R_s} \gg 1$

$$u_v \approx -(\pm \Delta R_x) U_B$$

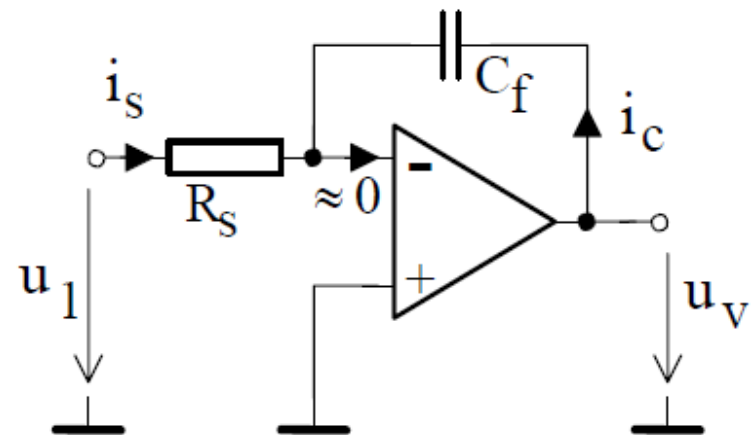
# Operačné zosilňovače

## Integrátor

Prúd do OZ  $\approx 0 \rightarrow -i_c = i_s$

$$i_s = \frac{u_1}{R_s}; \quad i_c = C_f \frac{du_v}{dt}$$

$$\frac{u_1}{R_s} = -C_f \frac{du_v}{dt}$$



$$u_v = -\frac{1}{R_s C_f} \int u_1 dt$$

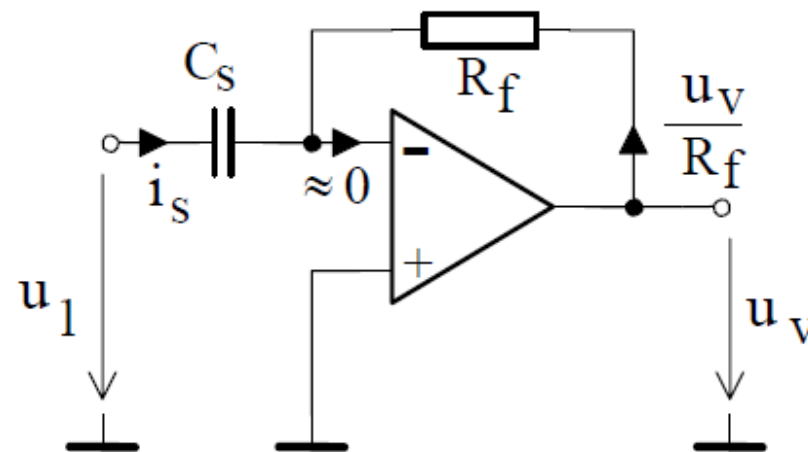
Poznámka: Kondenzátor - kvalitné dielektrikum, aby zvodové prúdy neboli na úrovni kľudových prúdov. Nie sú vhodné elektrolyty.



# Operačné zosilňovače

## Derivátor

Pre vstupný uzol (-) na obr. platí



$$i_s = - \frac{u_v}{R_f}$$

$$C_s \frac{du_1}{dt} + \frac{u_v}{R_f} = 0 \Rightarrow$$

$$u_v = -R_f C_s \frac{du_1}{dt}$$

Poznámka: Kondenzátor - kvalitné dielektrikum, aby zvodové prúdy neboli na úrovni kludových prúdov. Nie sú vhodné elektrolyty.

# Operačné zosilňovače

Richard Balogh, 2023



# 11. História

## Spätná väzba - feedback

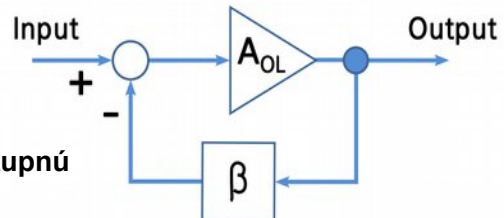
👍 Zosilnenie obvodu je menej citlivé na zmeny hodnôt jednotlivých súčiastok

👍 Vplyv šumov je menší

👍 Dá sa znížiť nelineárne skreslenie

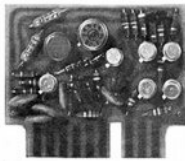
👍 Môžeme ovplyvniť vstupnú aj výstupnú impedanciu

👍 Môžeme rozšíriť šírku pásma zosilňovača

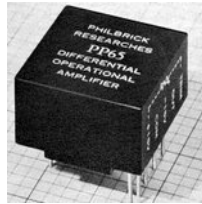


**DOBRA** spätná väzba môže byť aj **ZÁPORNÁ**

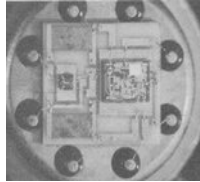
# 11. História Technology



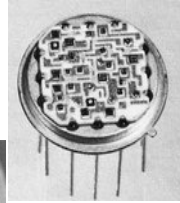
GAP/R's model P45: a solid-state, discrete op-amp (1961)



GAP/R's model PP65: a solid-state op-amp in a potted module (1962)



Early FET input AD op-amp (1970)



ADI's HOS-050: a high speed hybrid IC op-amp (1979)

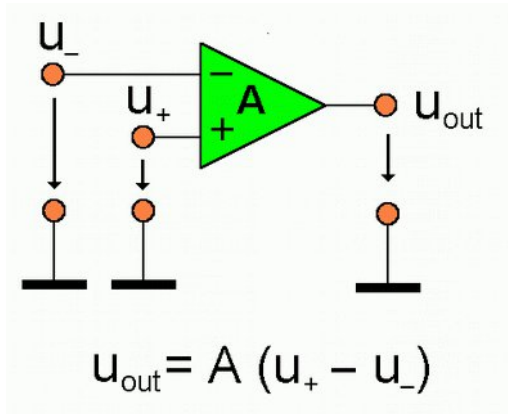


TI's OPA2188: first zero-drift, 36-V operational amplifier (2012)



# Operačný zosilňovač

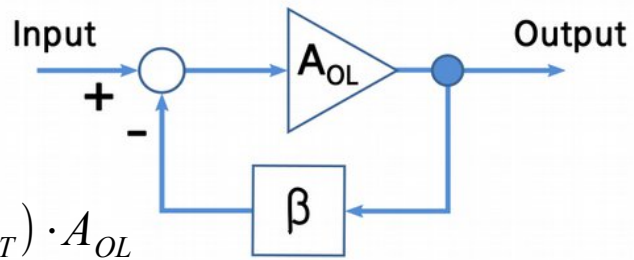
operational amplifier, Op-Amp



Ideálny zosilňovač:

- 1)  $A = \infty$
- 2)  $R_{vst} = \infty$
- 3)  $R_{výst} = 0$
- 4)  $f_{max} = \infty$
- 5)  $u_{out} = 0$  ak  $u_{diff} = 0$
- 6)  $u_{max} = \infty$

## Spätná väzba



$$u_{OUT} = (u_{INP} - \beta u_{OUT}) \cdot A_{OL}$$

$$u_{OUT} = u_{INP} A_{OL} - u_{OUT} \beta A_{OL}$$

$$u_{OUT} + u_{OUT} \beta A_{OL} = u_{INP} A_{OL}$$

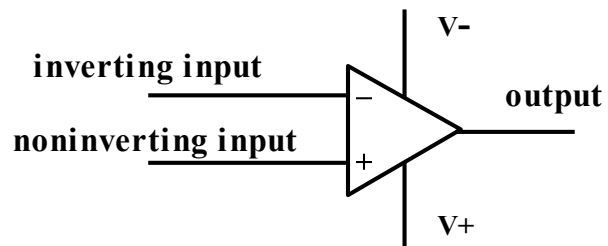
$$u_{OUT} (1 + \beta A_{OL}) = u_{INP} A_{OL}$$

$$u_{OUT} = u_{INP} \frac{A_{OL}}{(1 + \beta A_{OL})}$$

ak platí  $A \gg 1$

$$u_{OUT} = u_{INP} \frac{1}{\beta}$$

# Operačné zosilňovače

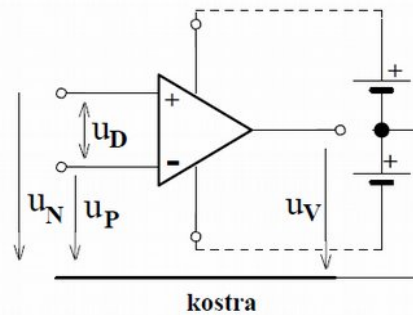


Operačný zosilňovač s napájaním.

a.) symetrický vstup - asymetrický výstup

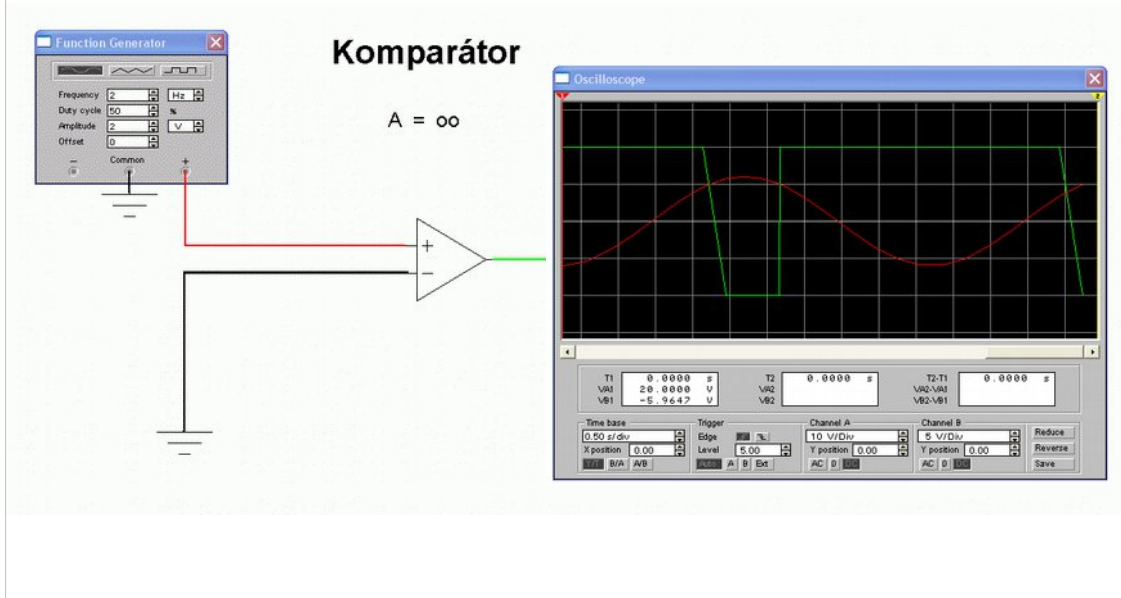
*Poznámka:*

*Je to najbežnejšie použitie a zapojenie OZ*





# Operačné zosilňovače

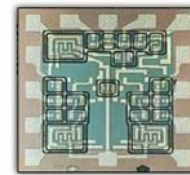


# Operačné zosilňovače

## Základné druhy

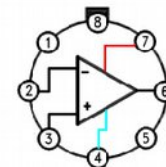
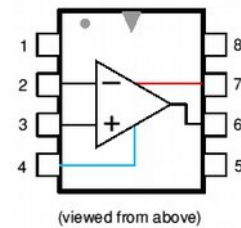
### Technológia

- monolitické
- hybridné



### Prevedenie

- kovové diskové púzdro TO ( 8 vývodov)
- plastové radové púzdro DIL
- plastové púzdro SMD



# Operačné zosilňovače

## Napájanie

### Súmerné

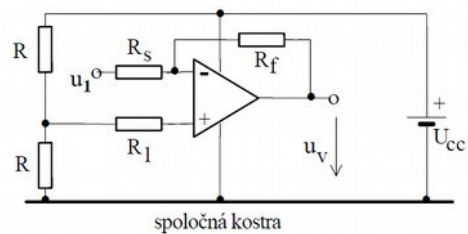
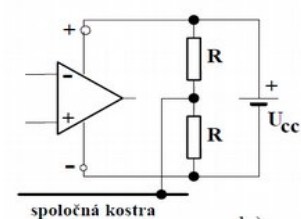
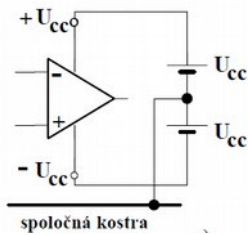
- súmerný  $\pm U_{cc}$
- súmerný s jedným zdrojom umelý stred

### Nesúmerné

- jeden zdroj
  - vhodnejšie pre  $\sim$  signál (oddelený kondenzátorom)
  - odpory R a R1 posúvajú prac. bod do stredu  $U_{cc}$
  - nulová úroveň vstupu i výstupu je potom  $0,5U_{cc}$
  - $u_V$  - len kladné hodnoty

Poznámka:

*Lepšie výsledky dávajú OZ priamo určené pre jeden napájací zdroj (presnejšie, menšie drifty)*



## Operačné zosilňovače

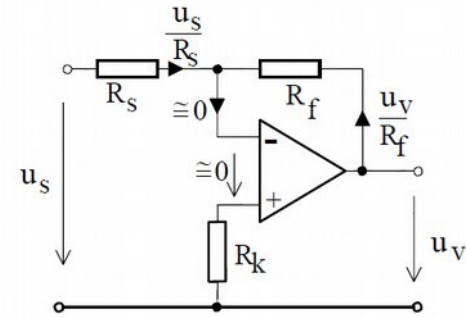
### Invertujúci zosilňovač

$$\frac{u_s}{R_s} = -\frac{R_f}{R_s} u_s$$

$$R_k = \frac{R_f R_s}{R_f + R_s}$$

$$R_{vst} \approx R_s \quad a \quad R_{výst} \approx \frac{R_v}{\beta A_0}$$

- platí  $A_{sv} \ll A_0$  ( $A_{sv} < 0,01 A_0$ )
- pre odpory platí  
veľké – prúdy zrovnateľné s  $I_{No}$   
malé – prúdy  $< I_{vmax}$



$$u_v = -\frac{R_f}{R_s} \cdot u_s$$

# Operačné zosilňovače

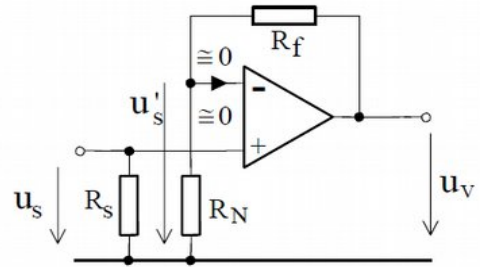
## Neinvertujúci zosilňovač

$$u'_s = \beta u_v = \left( \frac{R_N}{R_N + R_f} \right) u_v$$

$\beta$  – činiteľ spätnej väzby

$$R_{vst} \approx R_{CM} \quad \text{resp.} \quad R_{vst} = \frac{R_D}{1 + \beta A_0}$$

$$R_{vyst} \approx \frac{R_v}{\beta A_0} \quad R_S = \frac{R_f R_N}{R_f + R_N}$$



$$u_v = \left( \frac{R_f}{R_N} + 1 \right) \cdot u_s$$

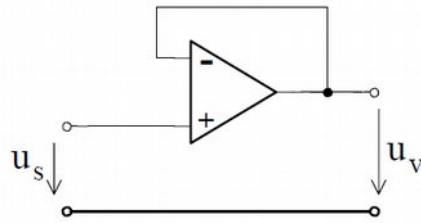
ak :  $u_s \cong u'_s$

# Operačné zosilňovače

## Napät'ový sledovač

### Neinvertujúci zosilňovač s $A=1$

- $A_u$  je 1 , teda  $u_s = u_v$
- $R_{vst} \approx 10^9 \Omega$  ,  $R_{výst} \approx 10^{-3} \Omega$   
(pre bipolár. vstupy)
- impedančný prevodník



# Operačné zosilňovače

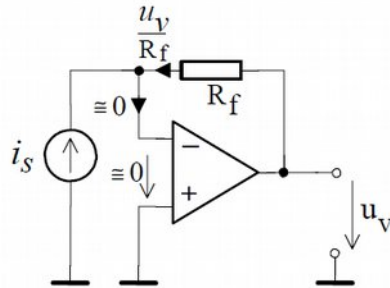
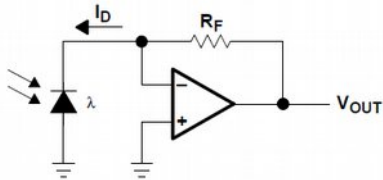
## Prevodník I → U

Paralelná sieť z napät'ového výstupu

Riešenie:  $u_D \cong 0$ ,  $i_{vst} \cong 0$

$R_{vst} \rightarrow 0$  a  $R_{výst} \rightarrow 0$  (nulové sú pre ideálny OZ)

$$i_s = \frac{u_v}{R_f}$$



$$u_v = -i_s \cdot R_f$$

# Operačné zosilňovače

## Aktívny mostík

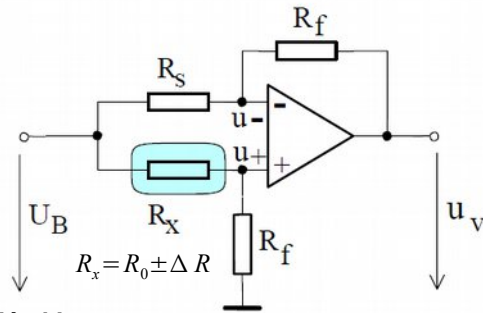
Časť mostíka tvoria SV obvody zosilňovača

Riešenie:

$$\frac{R_f}{R_s} + 1 \gg \Delta R \Rightarrow u_v \approx -U_B \frac{R_f}{R_s} \frac{\pm \Delta R}{\frac{R_f}{R_s} + 1}$$

- ☺ menej súčiastok
- ☺ linearita
- ☺  $u_v$  nezávisí od pomeru  $R_f/R_s$
- ☺ ľahšie vyváženie obvodu  $R_s$

⊗ treba kvalitný OZ s veľkým CMRR,  $A_0$  a malými  $I_{No}$



a ak zvolíme pomer odporov  $\frac{R_f}{R_s} \gg 1$

$$u_v \approx -(\pm \Delta R_x) U_B$$



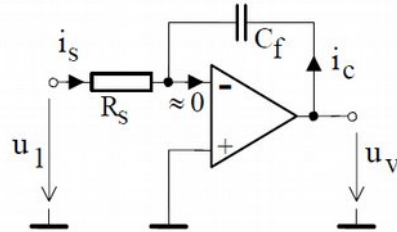
# Operačné zosilňovače

## Integrátor

Prúd do OZ  $\approx 0 \rightarrow -i_c = i_s$

$$i_s = \frac{u_1}{R_s}; \quad i_c = C_f \frac{du_v}{dt}$$

$$\frac{u_1}{R_s} = -C_f \frac{du_v}{dt}$$



$$u_v = -\frac{1}{R_s C_f} \int u_1 dt$$

Poznámka: Kondenzátor - kvalitné dielektrikum, aby zvodové prúdy neboli na úrovni kľudových prúdov. Nie sú vhodné elektrolyty.

# Operačné zosilňovače

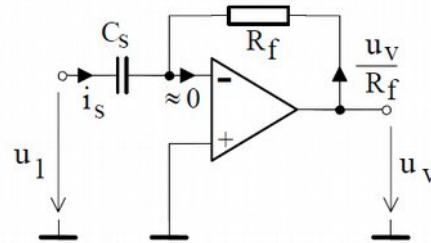
## Derivátor

Pre vstupný uzol (-) na obr. platí

$$i_s = -\frac{u_v}{R_f}$$

$$C_s \frac{du_1}{dt} + \frac{u_v}{R_f} = 0 \Rightarrow$$

$$u_v = -R_f C_s \frac{du_1}{dt}$$



Poznámka: Kondenzátor - kvalitné dielektrikum, aby zvodové prúdy neboli na úrovni kľudových prúdo. Nie sú vhodné elektrolyty.