

# 11. OPERAČNÉ ZOSILŇOVAČE

## 11.1. Úvod

- ♦ vznik operačných zosilňovačov - 40 te roky
- ♦ vyvinuté firmou Bell - analógové počítače (odtiaľ názov *operačný zosilňovač - OZ* )
- ♦ prvé elektrónkové, v 50 tých rokoch tranzistorové
- ♦ 1960 - **monolitické** integrované formy
- ♦ skoro súčasne **hybridná technológia**

Definícia:

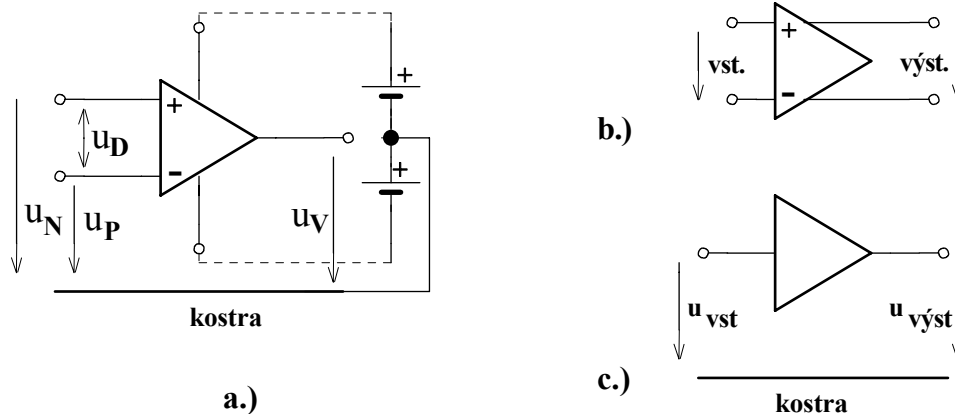
*Operačný zosilňovač je jednosmerný zosilňovač s veľkým zosilnením a malým vlastným rušením, schopný stabilne pracovať v uzavretej SV slučke.*

a.) symetrický vstup - asymetrický výstup

Poznámka: Je to najbežnejšie použitie a zapojenie OZ

b.) symetrický vstup - symetrický výstup

c.) asymetrický vstup - asymetr. výstup



Obr.129.

## 11.2. ZÁKLADNÉ VLASTNOSTI

### 11.2.1. Jednosmerné zosilnenie

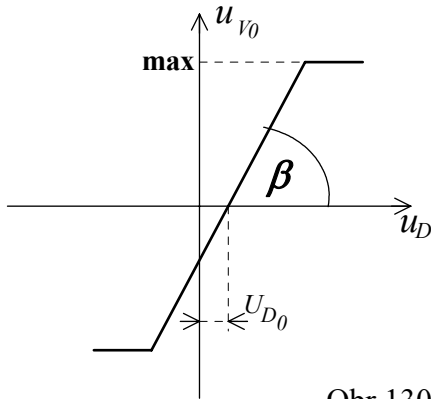
- súhlasné (súfázne)
- rozdielové

- ideálny :  $u_{V_0} = A_0 \cdot u_D$  ( $u_D = u_N - u_P$ )

*A<sub>0</sub> je jednosmerné rozdielové zosilnenie naprázdno. (Ideál A<sub>0</sub> = ∞)*

$$A_0 = \frac{\Delta u_{v0}}{\Delta u_D} = \operatorname{tg} \beta$$

$U_{D0}$  je vstupná napäťová nesymetria (tiež napäťový ofset -  $U_{D0}$  je potrebné do vstupu na  $U_{v0} = 0$ )



Obr.130.

Reálny zos. zosilňuje i súhlasné  $u_{CM}$ : 
$$u_{CM} = \frac{u_N + u_P}{2}$$

$B_0$  jednosmerné súhlasné zosilnenie : 
$$u_{v0} = A_0 \cdot u_D + B_0 \cdot u_{CM}$$

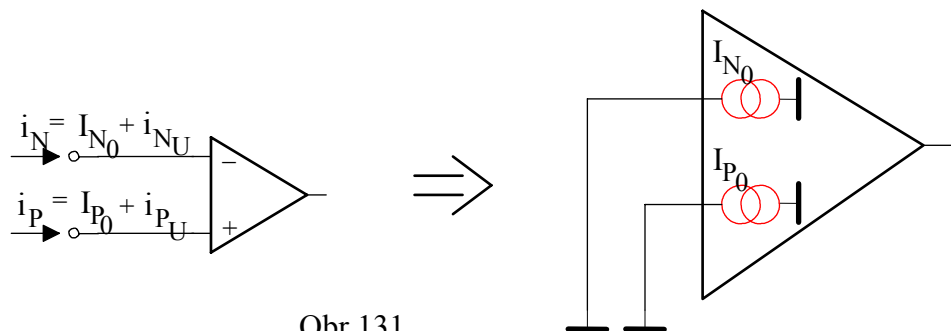
- kvalitný zosilňovač  $\rightarrow B_0 \ll A_0$ .
- činiteľ potlačenia súhlasného napätia CMRR (Common Mode Rejection Ratio), resp. CMR

$$\text{CMRR} = A_0 / B_0$$

Poznámka: V katalógoch tiež ako diskriminačný súčiniteľ  $k_d$ . Reálne býva  $10^4 \div 10^7$ , resp. v dB : 80 ÷ 100 dB.

### Vstupný ofset

- nežiadúce signály na vstupe  $\rightarrow$  v konečnom dôsledku na výstupe OZ
  - napäťový ( $U_{D0}$ )
  - prúdový



Obr.131.

- $i_{NU}$  a  $i_{PU}$  od vst. napätia ( žiadané )
- $I_{N0}$ ,  $I_{P0}$  parazitné „kľudové prúdy“

Priemerný vst. kľudový prúd:

$$I_0 = \frac{I_{N0} + I_{P0}}{2}$$

Prúdová nesúmernosť (asymetria) : (čo najmenšia)

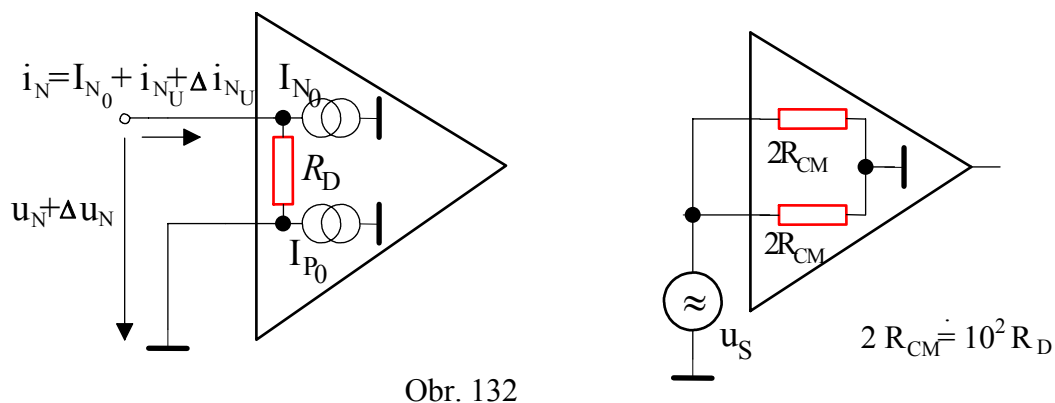
$$I_{0Z} = I_{N0} - I_{P0}$$

**Kolísanie offsetu - drift** - časový, teplotný, napájací

## 11.2.2. Vstupný a výstupný odpor

### Vstupný odpor

$$R_D = \frac{\Delta u_N}{\Delta i_{NU}} \quad \text{pre } u_P = 0 \quad \text{resp.} \quad R_D = \frac{\Delta u_P}{\Delta i_{PU}} \quad \text{pre } u_N = 0$$

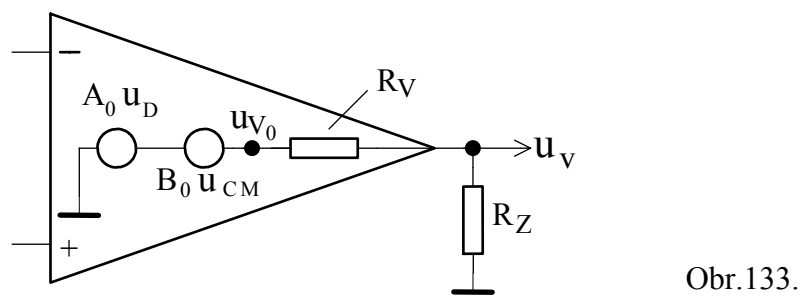


Obr. 132

$R_D$  - rozdielový (diferenčný) vst. odpor (teoreticky  $\infty$ , reálne  $M\Omega$ )

$R_{CM}$  - súhlasný (súfázny) odpor - paralelne  $2 R_{CM}$

### Výstupný odpor



Obr.133.

$R_{výst} \rightarrow 10 \Omega \div 1 \text{ k}\Omega$

- katalóg - výst. prúd OZ  $i_{V_{max}}$   $\rightarrow$  záťažný odpor  $R_{Zmin}$

$$u_V = u_{V0} \frac{R_Z}{R_Z + R_V} \quad R_V = \frac{u_{V0} - u_V}{i_V} \quad R_{Zmin} = \frac{u_{V_{ma}}}{i_{V_{ma}}}$$

### 11.2.3. Druhy operačných zosilňovačov

Technológia:

- ♦ monolitické
- ♦ hybridné

Vstup:

- súmerný
- nesúmerný
- ♦ vstup bipolárny
- ♦ vstup FET

Prevedenie:

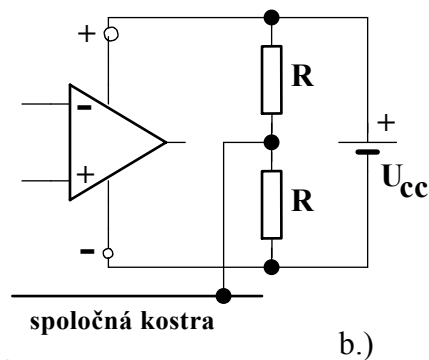
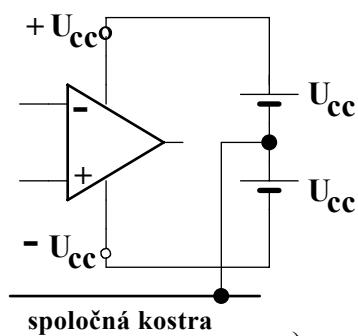
- kovové diskové púzdro TO ( 8 vývodov)
- plastové radové púzdro DIL

Podľa určenia:

- ♦ univerzálne (monolitické)
- ♦ prístrojové (malé  $U_{Do}$ , drift, veľké  $A_0$ , veľké CMMR ...)
- ♦ elektrometrické (malé  $I_0$ , veľké  $R_{vst}$ )
- ♦ izolačné
- ♦ rýchle (širokopásmové, impulzné)

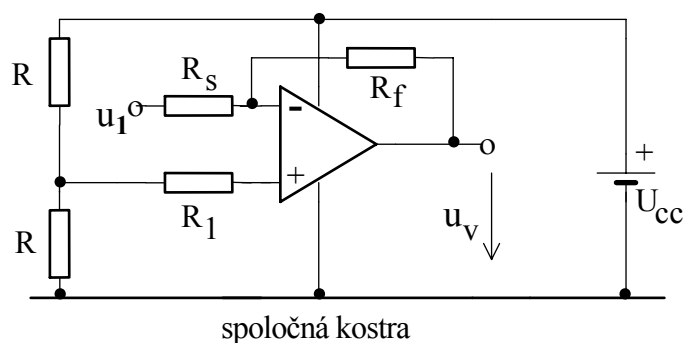
#### 11.2.4. Napájanie OZ

- ♦ väčšinou súmerné napájanie  $\pm U_{cc}$
- ♦ stred - spoločná kostra (obr.134a.)



Obr.134.

- ♦ **Jeden (neuzemnený) zdroj:**  
- „umelý stred“
- ♦ **Jeden (uzemnený) zdroj:**  
- riešenia sú obmedzené



Obr.135.

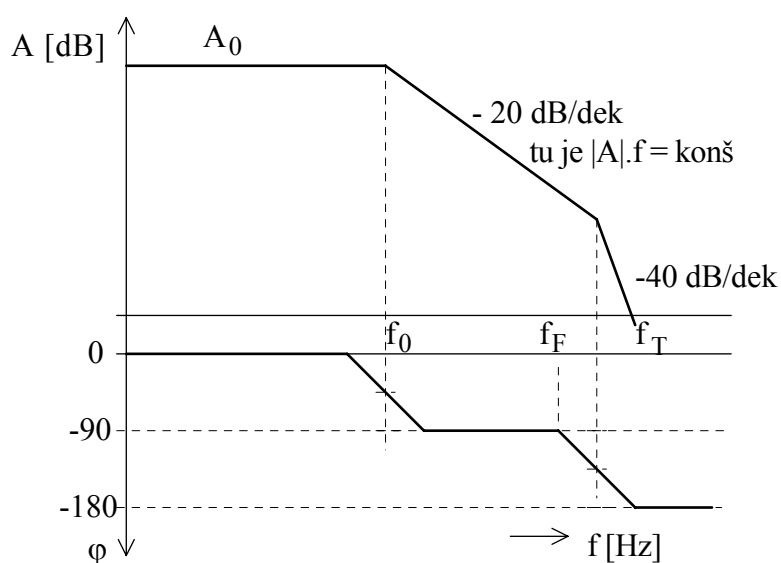
- vhodnejšie pre  $\sim$  signál (oddelený kondenzátorom)
- odpory R a  $R_1$  posúvajú prac. bod do stredu  $U_{cc}$
- nulová úroveň vstupu i výstupu je potom  $0,5U_{cc}$
- $u_v$  - len kladné hodnoty

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

### 11.2.5. Striedavý signál v obvodoch OZ

- reálny OZ  $\rightarrow$  obmedzenia v oblasti vf
- prenos  $\rightarrow$  ALFCH
- sústava 2. rádu, pri veľkom zjednodušení 1. rádu

$f_T$  - tranzitná frekvencia (ALFCH prechádza cez 0)



Obr.136.

$$A_0 \cdot f_0 = f_T$$

pričom platí:

$$A(f = f_T) = 1 \text{ (0 dB)}$$

$f_F$  - hranica, keď začína stúpať fáza od  $-90^\circ$

Veľké signály  $\rightarrow$  medzná rýchlosť prebehu - strmosť  $S$  [V/ $\mu$ s]

**Medzná výkonová frekvencia  $f_M$**  - ešte plný napäťový rozkmit ( $U_{vm}$  je od nuly)

$$u_v = U_{vm} \cdot \sin(2\pi f_M \cdot t)$$

po derivovaní rýchlosť zmeny na výstupe

$$\frac{du_v}{dt} = 2\pi f_M \cdot U_{vm} \cdot \cos(2\pi f_M \cdot t)$$

kde  $2\pi f_M U_{vm} = S$  maximálna strmosť {pre  $\cos(2\pi f_M \cdot t) = 1$ }

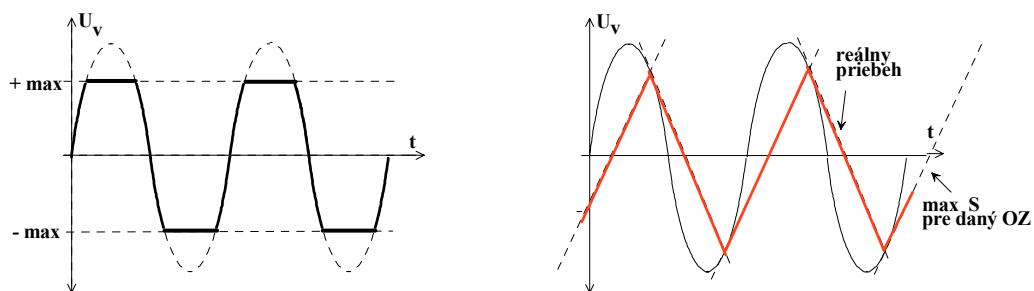
- $S$  býva  $0,5 \div 50$  V/ $\mu$ s
- u nových  $300 \div 900$  V/ $\mu$ s  $\rightarrow f_T = 100 \div 300$  MHz
- u rýchlych až  $1000 \div 4000$  V/ $\mu$ s  $\rightarrow f_T =$  do 400 MHz

medzná výkonová frekvencia:

$$f_M = \frac{S}{2\pi U_{vm}} \quad [MHz; V/\mu s; V]$$

### Skreslenia OZ

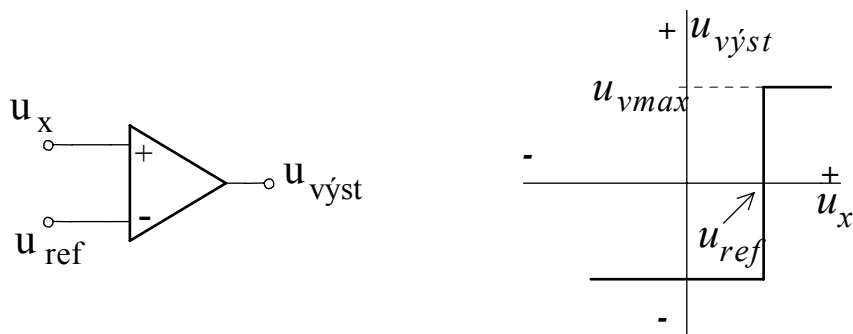
- a.) veľký rozkmit
- b.) obmedzenie od  $S$



Obr. 137.

### 11.3. Použitie OZ

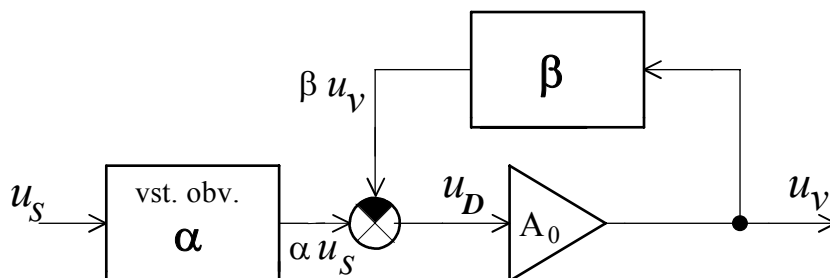
#### 11.3.1. Bez spätnej väzby



Obr. 138.

#### 11.3.2. V spätnoväzbovej slučke

Bloková schéma pre zápornú SV je na obr. 139.



Obr.139.



- ♦ kladná SV - pričítava sa k  $\alpha \cdot u_s$
- ♦ záporná SV - odčítava sa od  $\alpha \cdot u_s$

Poznámka: Kladná SV sa používa menej (oscilátory, prekl. obvody)

### Záporná SV

Podľa obr.139 môžeme písať vzťahy:

$$u_D = \alpha u_s - \beta u_v \Rightarrow \frac{u_D}{u_v} = \alpha \frac{u_s}{u_v} - \beta$$

resp.

$$\frac{1}{A_0} = \alpha \frac{1}{A_{SV}} - \beta \quad \text{a teda}$$

$$A_{SV} = A_0 \frac{\alpha}{1 \pm \beta A_0}$$

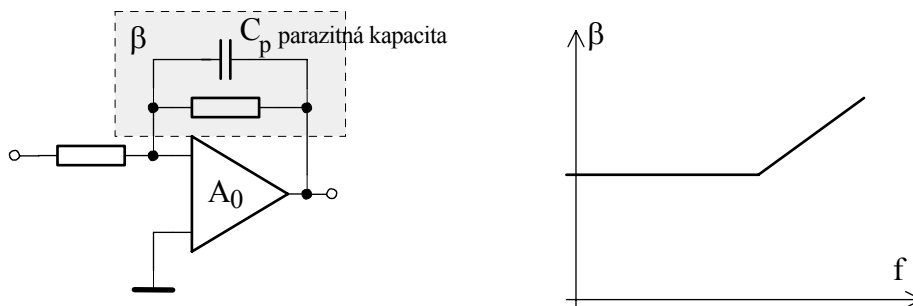
- ♦ ZSV +
- ♦ KSV -

Ak:  $\beta A_0 \gg 1$  ( dá sa dosiahnuť vysokým  $A_0$  )

potom  $A_{SV} = \frac{\alpha}{\beta}$  a závisí len od vstupných a SV obvodov

Poznámka: Predpokladaná ZSV nesmie prejsť na KSV pre žiadnu frekvenciu, lebo by nastalo vlastné kmitanie zapojenia, z ktorého by sa stal oscilátor.

### 11.3.3. Frekvenčné korekčné (kompenzačné) obvody



Obr.140.

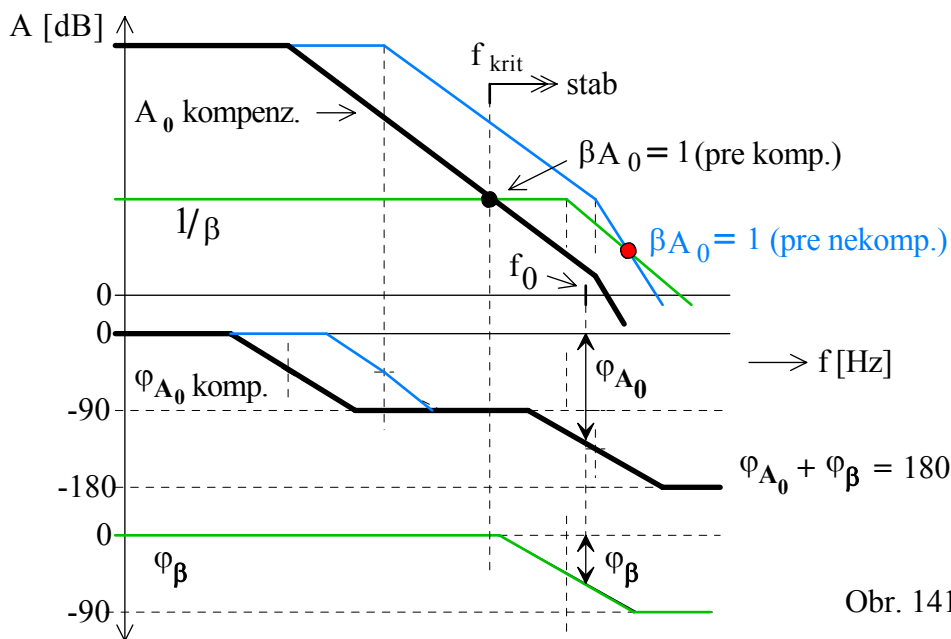
Kmitanie :

1.  $\varphi$  je  $0^\circ$ , resp. k-krát  $360^\circ$
2.  $\beta A_0 \geq 1$

- ♦ ZSV  $\rightarrow$  fázový posun  $180^\circ$
- ♦ ak  $\varphi_{A_0} + \varphi_\beta \rightarrow 180^\circ \Rightarrow$  krit. stav ( $180 + 180 = 360$ )  $\rightarrow$  kmitanie

Korekcie :

- zmenou  $A_0$ , zmenou  $\beta$



Obr. 141.

- frekvenčné kompenzácie - nutnosť
- znižujú  $f_{\text{homé}}$
- **kritickejšie sú malé zosilnenia** (napäťový sledovač)

### Vstavané frekvenčné kompenzácie

- súčasť zapojenia
- zjednodušujú použitie
- čiastočne "prekompenzované"
- väčšie obmedzenia pre  $f_{\text{homé}}$

Pre vyššie  $f$  :

- ♦ nekompenzovaný OZ + kompenz. obvody "na mieru"

### Podkorigovaný OZ

- vstavané frekvenčné kompenzácie
- stabilný až pre určité (väčšie) zosilnenia, napr 5, 10

- lepšie frekvenčné vlastnosti, (ale nemožné napr. pre napät'ový sledovač)

### Ďalšie kritériá pre SV

Napät'ová SV - odvodená od  $U_{\text{výst}}$  :

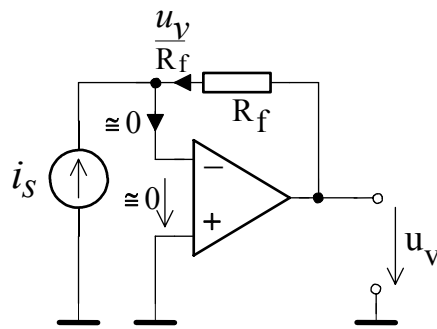
- ♦ sériová - na vstupe sčítavanie napätí
- ♦ paralelná - na vstupe sčítavanie prúdov

Prúdová SV - odvodená od  $I_{\text{výst}}$  , sériová, alebo paralelná

## 11.4. Druhy operačných sietí a ich vlastnosti v aplikáciách

### 11.4.1. Prevodník $I \rightarrow U$ (Paralelná sieť z napät'ového výstupu)

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

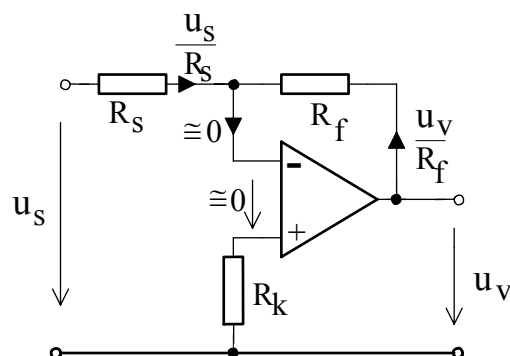


$$i_S = -\frac{u_V}{R_f}$$

Obr.142.

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

### 11.4.2. Invertujúci zosilňovač (modifikácia paralelnej siete)



Obr.143.

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

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

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

kde:  $R_v$  je vlastný OZ (katalóg)

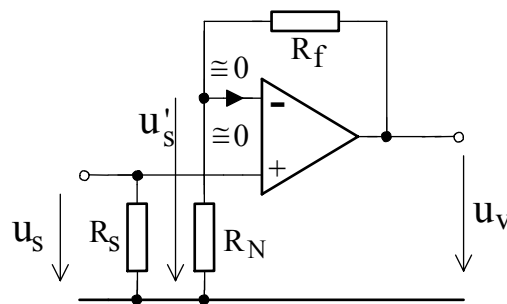
Platí:  $A_{sv} \ll A_0$  ( $A_{sv} < 0,01 A_0$ ).

Odpory v zapojení:

- ♦ veľké - prúdy zrovnateľné s  $I_{N0}$
- ♦ malé - prúdy nie väčšie ako  $I_{vmax}$ , (ešte i malý  $R_{vst}$ )

$1k\Omega \div 3M\Omega$ .

### 11.4.3. Neinvertujúci zosilňovač (sériová sieť z napäťového výstupu)



Obr.144.

$$u'_s = \beta u_v = \left( \frac{R_N}{R_N + R_f} \right) u_v \quad u_v = \left( \frac{R_f}{R_N} + 1 \right) u_s \quad \text{ak : } u_s \cong u'_s$$

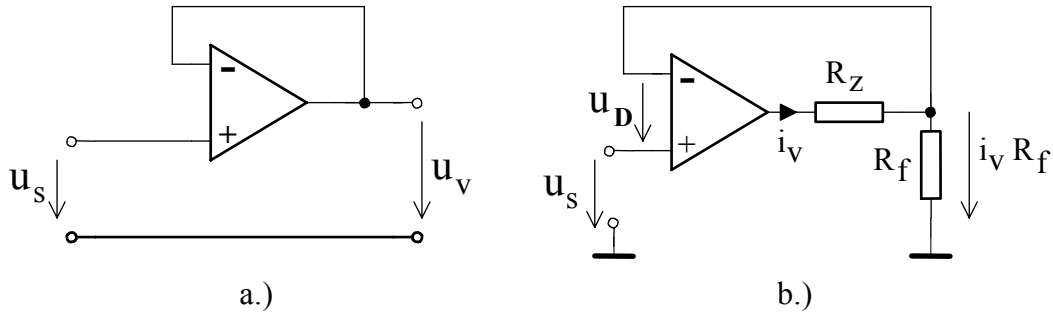
$$R_{vst} \approx R_{CM} \text{ resp. } R_{vst} = \frac{R_D}{1 + \beta A_0} \quad \text{a } R_{výst} \approx \frac{R_v}{\beta A_0} \quad R_s = \frac{R_f R_N}{R_f + R_N}$$

Napät'ový sledovač (obr. 145a.)

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

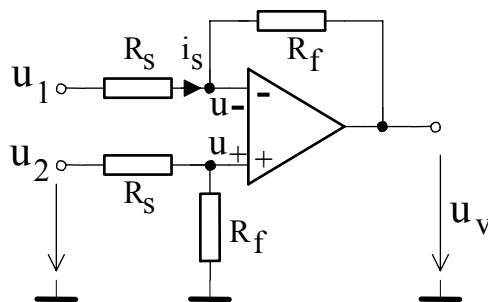
### 11.4.4. Zdroj konštantného prúdu (sériová sieť z prúdového výstupu, Obr.145b.)

$$u_D = u_s - i_v R_f \approx 0 \rightarrow \text{výst. prúd} \quad i_v = \frac{1}{R_f} u_s$$



Obr.145.

#### 11.4.5. Diferenčný zosilňovač (obr. 146)



Obr. 146.

#### Ovodenie prenosu - zosilnenia.

1. spôsob - určia sa  $u_+$ ,  $u_-$ , potom pre  $u_D = 0$  je  $u_+ = u_-$

$$u_+ = u_2 \frac{R_f}{R_f + R_s} \quad u_- = u_1 - R_s i_s \quad \text{ak } i_s = \frac{u_1 - u_v}{R_s + R_f} \Rightarrow u_- = u_1 - \frac{u_1 - u_v}{R_s + R_f} R_s$$

$$u_2 \frac{R_f}{R_f + R_s} = u_1 - \frac{u_1 - u_v}{R_s + R_f} R_s \quad \rightarrow \quad u_2 \frac{R_f}{R_f + R_s} = \frac{u_1(R_s + R_f) - u_1 R_s + u_v R_s}{R_s + R_f}$$

$$u_2 R_f = u_1 R_f + u_v R_s \quad \Rightarrow \quad u_v = (u_2 - u_1) \frac{R_f}{R_s}$$

2. spôsob - superpozícia : vplyv jedného vstupu, druhý je pritom na 0 potenciáli, t.j. na kostre (NIE vo "VZDUCHU"!!!!!!).

a.) vplyv od  $u_1$  ( $u_2 = 0$ )  $\rightarrow$  invertujúci zosilňovač  $u_{v1} = -u_1 \frac{R_f}{R_s}$

b.) vplyv od  $u_2$  ( $u_1 = 0$ )  $\rightarrow$  neinvertujúci zosilňovač  $u_{v2} = \left(\frac{R_f}{R_s} + 1\right) u_2 \frac{R_f}{R_f + R_s}$

Po úpravách :

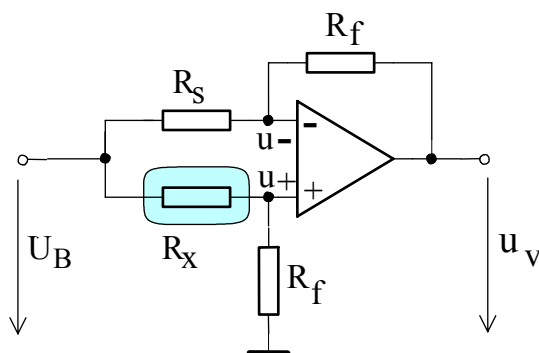
$$u_{v2} = \frac{R_f}{R_s} u_2 \Rightarrow u_v = u_{v1} + u_{v2} = -\frac{R_f}{R_s} u_1 + \frac{R_f}{R_s} u_2 = (u_2 - u_1) \frac{R_f}{R_s}$$

### Použitie

- ♦ zosilnenie malých napätí
- ♦ pri nasuperponovaných signáloch, napr. sieťový „brum“
- ♦ potlačenie súfázných zložiek (sú symetrické voči kostre)

### 11.4.6. Aktívny mostík (modifikácia diferencného zosilňovača)

Časť mostíka tvoria SV obvody operačného zosilňovača.



Obr.147.

$$\frac{R_f}{R_s} + 1 \gg \Delta R \Rightarrow u_v \approx -U_B \frac{R_f}{R_s} \frac{\pm \Delta R}{\frac{R_f}{R_s} + 1} \quad \text{a ak zvolíme pomer odporov } \frac{R_f}{R_s} \gg 1$$

potom :

$$u_v \approx - (\pm \Delta R) U_B \quad \text{kde } \Delta R \text{ je v jednotkách odporu} \quad \Delta R = \frac{R - R_{x0}}{R_{x0}}$$

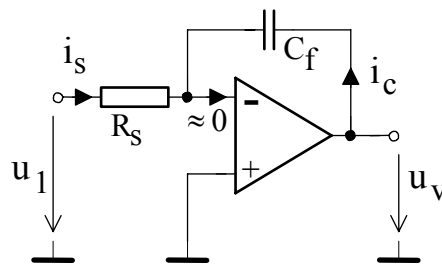
**Výhody :**

- menej súčiastok
- linearita ( ak  $R_s = R_{x0}$  a  $R_f \gg R_s$  )
- $u_v$  nezávisí od pomeru  $R_f/R_s$
- ľahšie vyváženie obvodu (odporom  $R_s$ )

**Nevýhody :** *treba použiť kvalitný OZ*

- s veľkým CMR ( potlačením súfáz signálu)
- s veľkým  $A_o$
- s malými  $I_{No}$  (kľudovými prúdmi)

**11.4.7. Integrátor (Obr. 148)**



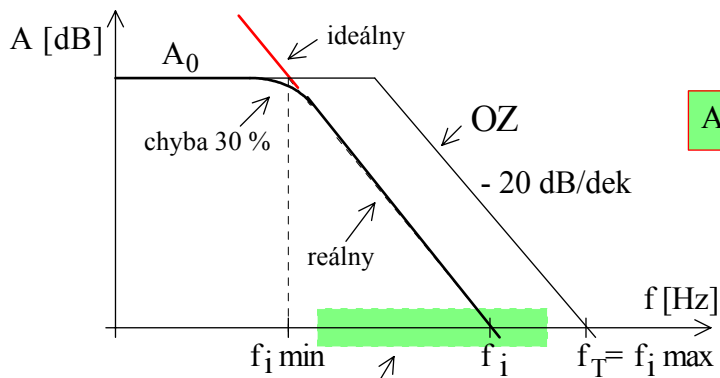
Obr.148.

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

$$i_s = \frac{u_1}{R_s}; \quad i_c = C_f \frac{du_v}{dt}; \quad \Rightarrow \quad \frac{u_1}{R_s} = -C_f \frac{du_v}{dt} \quad \Rightarrow \quad u_v = -\frac{1}{R_s C_f} \int_0^t u_1$$

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

**Odozva integrátora na harmonický priebeh (predstava ako filter 1. rádu)**



$$A_0 \cdot f_i \text{ min} = f_i$$

pásma použiteľných frekvencií pre určitú presnosť

Obr.149.

Vst. signál  $u_1 = U_1 \sin \omega t \rightarrow u_v = \int U_1 \sin \omega t$ , presnejšie pre ideálny integrátor :

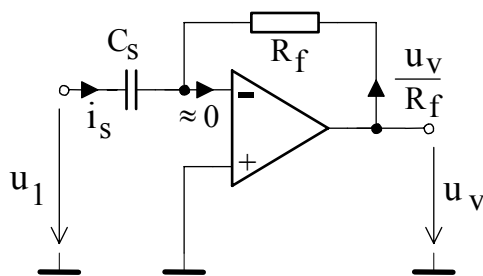
$$u_v = \frac{U_1}{\omega R_s C_f} (\cos \omega t)$$

Tranzitná frekvencia integrátora  $f_i$  je pre zosilnenie  $A_u = 1$

$$A_u = \frac{U_1}{\omega R_s C_f} = 1 \Rightarrow f_i = \frac{1}{2\pi R_s C_f} = \frac{1}{2\pi \tau_i}$$

### 11.4.8. Derivátor (Obr. 150)

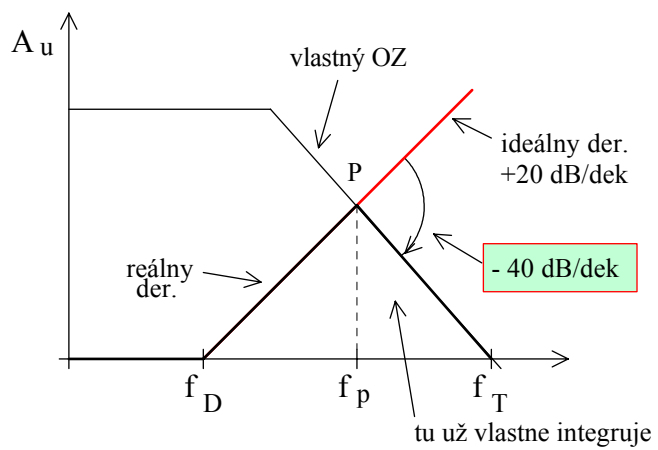
Pre vst. uzol (-) na obr. platí :  $i_s = - \frac{u_v}{R_f}$



Obr.150.



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



Obr. 151.