

# Vážení zákazníci,

dovolujeme si Vás upozornit, že na tuto ukázkou knihy se vztahují autorská práva, tzv. copyright.

To znamená, že ukáзка má sloužit výhradně pro osobní potřebu potenciálního kupujícího (aby čtenář viděl, jakým způsobem je titul zpracován a mohl se také podle tohoto, jako jednoho z parametrů, rozhodnout, zda titul koupí či ne).

Z toho vyplývá, že není dovoleno tuto ukázkou jakýmkoliv způsobem dále šířit, veřejně či neveřejně např. umístováním na datová média, na jiné internetové stránky (ani prostřednictvím odkazů) apod.

*redakce nakladatelství BEN – technická literatura*  
[redakce@ben.cz](mailto:redakce@ben.cz)



V uzlu U platí první Kirchhoffův zákon  $\sum i = 0$ , takže lze psát:  $i_1 + i_2 = 0$ . Pro jednotlivá vstupní napětí platí:

$$u_{11} = R_{11} \cdot i_1 + u_1$$

$$u_{12} = R_{12} \cdot i_2 + u_1$$

odkud oba proudy jsou:

$$i_1 = \frac{u_{11} - u_1}{R_{11}}$$

$$i_2 = \frac{u_{12} - u_1}{R_{12}}$$

takže po dosazení do rovnice  $i_1 + i_2 = 0$  bude:

$$\frac{u_{11} - u_1}{R_{11}} + \frac{u_{12} - u_1}{R_{12}} = 0$$

a pro shodné velikosti odporů  $R_{ij}$

$$\frac{u_{11} - u_1}{R} + \frac{u_{12} - u_1}{R} = 0$$

$$u_{11} + u_{12} - 2 \cdot u_1 = 0$$

$$2 \cdot u_1 = u_{11} + u_{12}$$

$$u_1 = \frac{1}{2} \cdot (u_{11} + u_{12})$$

pro dva vstupy. Pro obecně: N vstupů pak bude

$$u_1 = \frac{1}{N} \sum_{n=1}^{n=N} u_{1n}$$

takže výstupní napětí  $u_2$  je

$$u_2 = \left(1 + \frac{R_2}{R_1}\right) u_1 = \left(1 + \frac{R_2}{R_1}\right) \cdot \frac{1}{N} \sum_{n=1}^{n=N} u_{1n}$$

tedy dáno součtem napětí vstupních, který je vynásoben zesílením neinvertujícího zesilovače.

Zvolí-li se například pro  $N=2$  shodná velikost odporů (zpětnovazební síť obklopující operační zesilovač) tj.  $R_1 = R_2$ , bude:

$$u_2 = \left(1 + \frac{R_2}{R_1}\right) \cdot \frac{1}{N} \sum_{n=1}^{n=N} u_{1n} = \left(1 + \frac{R}{R}\right) \cdot \frac{1}{2} \cdot \sum_{n=1}^{n=2} u_{1n} = 2 \cdot \frac{1}{2} \cdot (u_{11} + u_{12}) = u_{11} + u_{12}$$

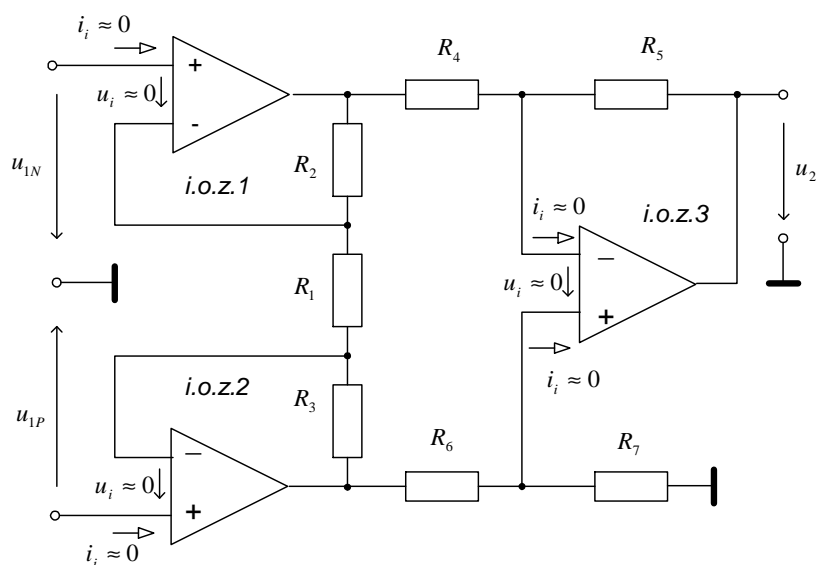
a tedy výstupní napětí je dáno součtem napětí vstupních.

### 2.10.3.5 Rozdílový zesilovač

Schéma zapojení rozdílového (nebo-li diferenčního) zesilovače ukazuje obr.2.64. Pro napětí:  $u$  (na rezistoru:  $R_4$ ) platí (vzhledem k tomu, že napětí:  $u_i$  mezi vstupy operačního zesilovače je nulové) vztah:  $u = i \cdot R_4$ , protože proud:  $i$  je protlačován napětím:  $u_{1P}$  ve smyčce



Protože neinvertující zesilovače s i.o.z.1 a i.o.z.2 jsou vázány, má tento obvod pro souhlasné napětí při:  $R_2=R_3$  a  $R_4=R_5=R_6=R_7$  jednotkový přenos napětí, pro napětí rozdílové však přenos (zesílení) napětí je:  $\left(1 + \frac{2 \cdot R_2}{R_1}\right)$ .



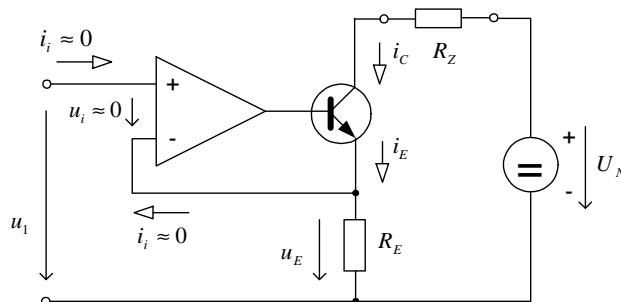
Obr.2.65 Schéma zapojení přístrojového zesilovače

### 2.10.3.7 Zdroj proudu řízený napětím

Jednoduchý zdroj proudu z obr.2.66 využívá operačního zesilovače ke zlepšení vlastností klasického zdroje proudu s tranzistorem. Zesilovač (se stoprocentní zápornou zpětnou vazbou) zaručuje, že výstupní napětí:  $u_E$  na emitorovém rezistoru:  $R_E$  se s dobrou přibližností rovná vstupnímu napětí:  $u_1$  a proto zátěží:  $R$  teče proud:

$$i_c \approx i_E \approx \frac{u_1}{R_E}$$

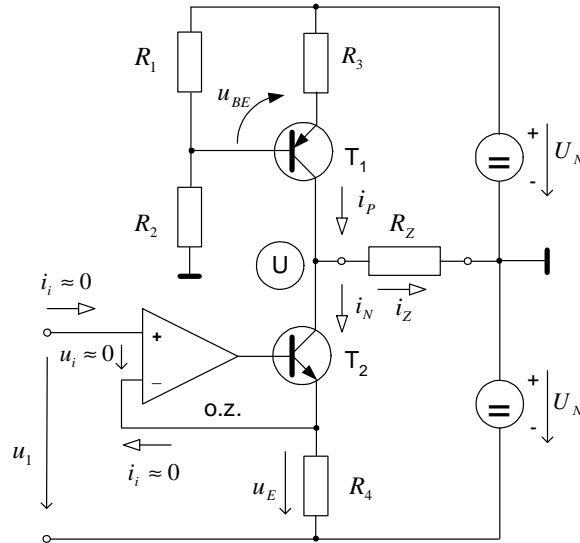
Popsaný zdroj proudu je však schopen dodávat pouze jen proud jediného směru, a to pro tranzistor NPN do kolektoru.



Obr.2.66 Schéma zapojení zdroje proudu řízeného napětím

Jednoduchý zdroj proudu pro obě polarity je na obr.2.67. V něm se kompenzuje střední hodnota proudu neřízeného zdroje:  $i_P$  s tranzistorem:  $T_1$  stejně velkým proudem:  $i_N$  opačné polarity, tekoucí tranzistorem:  $T_2$  zdroje řízeného.

Výstupní proud:  $i_Z$  je roven součtu obou proudů působících spolu na výstup, a proto bude podle jejich vzájemné velikosti převažovat na výstupu proud jedné nebo druhé polarity.



Obr.2.67 Schéma zapojení zdroje proudu obojí polarity

Proudový zdroj neřízený s PNP tranzistorem:  $T_1$  dodává do výstupní svorky konstantní proud o velikosti:

$$i_p = \frac{\frac{U_N \cdot R_1}{R_1 + R_2} - u_{BE}}{R_3 \cdot \left(1 + \frac{1}{h_{21e}}\right)}$$

a proudový zdroj řízený s NPN tranzistorem  $T$  dodává do výstupní svorky záporný nastavitelný proud:

$$i_N = -\frac{U_N - u_1}{R_4 \cdot \left(1 + \frac{1}{h_{21e}}\right)}$$

a výstupní proud  $i$  je dán součtem obou těchto proudů v uzlu  $U$

$$i_Z = i_p + i_N = \left[ \frac{u_1}{R_4} + U_N \cdot \left( \frac{R_1}{R_3 \cdot (R_1 + R_2)} - \frac{1}{R_4} \right) - \frac{u_{BE}}{R_3} \right] \cdot \frac{1}{1 + \frac{1}{h_{21e}}}$$

### 2.10.3.8 Proudový posilovač

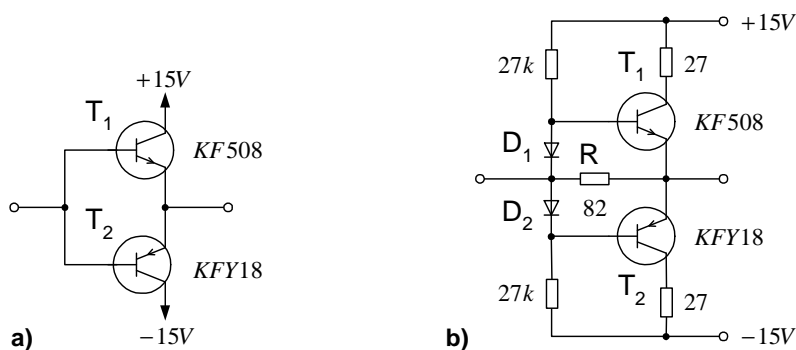
Nestačí-li velikost výstupního proudu: 5 mA, může se tato hodnota zvýšit zapojením tzv. proudového posilovače, jejichž schéma zapojení je na obr.2.68.

V případě zapojení podle obr.2.68a je nelinearita v okolí nulového výstupního proudu značná, a aby se neuplatnila, zapojí se takovýto posilovač do přímé větve ale ve zpětnovazební smyčce, takže velké zesílení operačního zesilovače zapojeného do zpětnovazební smyčky tuto nelinearitu potlačí.

Proudový posilovač zapojený podle obr.2.68b má pak dvě výrazné oblasti činnosti, charakterizované velikostí a polaritou napěťového úbytku na sériovém rezistoru:  $R$ :

Při nízkém výstupním proudu (nacházejícím se v intervalu:  $-\frac{u_{EB}}{R} < i < +\frac{u_{BE}}{R}$ ) jsou oba tranzistory (ještě) nevybuzeny a veškerý zatěžovací proud do zátěže dodává předřazený operační zesilovač.

Mimo tento rozsah je vždy (jen) jeden z obou tranzistorů aktivní a do výstupního proudu přispívá složkou, o kterou přesahuje okamžitý výstupní proud nad nastavenou mez  $\frac{u_{BE}}{R}$ . Tranzistory jsou navíc doplněny diodami, které urychlují jejich otevření. Kolektorové rezistory snižují sice proudovou schopnost posilovače, ale zastávají funkci pojistky.



Obr.2.68 Schéma zapojení proudových posilovačů

## 2.10.4 Základní zapojení nelineárních obvodů s operačními zesilovači

### 2.10.4.1 Logaritmický převodník

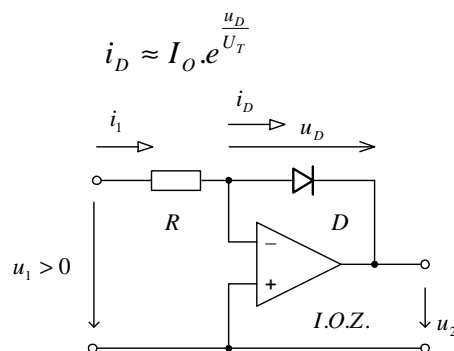
Vhodným nelineárním prvkem ke konstrukci obvodů s logaritmickou převodní charakteristikou je polovodičová dioda, nejjednodušší možné schéma logaritmujícího převodníku s diodou je na obr.2.69.

Pro proud tekoucí diodou platí v širokém rozmezí (až několika dekád tj. desetinásobků proudů) vztah:

$$i_D = I_0 \cdot (e^{\frac{q}{kT} \cdot u_D} - 1)$$

kde:  $I_0$  je nasycený proud,  $q$  velikost náboje elektronu ( $1,602 \cdot 10^{-19}$  C),  $k$  je tzv. Boltzmanova konstanta ( $1,38 \cdot 10^{-23}$  J/C),  $T$  je teplota v Kelvinech a:  $u_D$  je napětí na diodě. Při pokojové teplotě 296 K má tedy činitel:  $U_T$  přibližnou hodnotu:  $U_T = \frac{kT}{q} = 25,5mV$

Protože pro napětí nad: 100 mV převládá ve vztahu pro:  $i_D$  exponenciální člen, lze výše uvedenou rovnici přepsat do tvaru:



Obr.2.69 Schéma logaritmického převodníku s diodou

Logaritmováním rovnice:

$$\frac{i_D}{I_0} \approx e^{\frac{u_D}{U_T}}$$

bude:

$$\ln \frac{i_D}{I_0} \approx \frac{u_D}{U_T}$$

odkud již:

$$u_D \approx U_T \ln \frac{i_D}{I_0}$$

Protože v obvodu jehož schéma zapojení je na obr.2.62 platí:  $i_1 \approx i_D$ ,  $u_2 \approx -u_D$  bude:

$$i_1 \approx i_D = \frac{u_1}{R}$$

takže po dosazení je:

$$u_2 \approx -U_T \ln \frac{i_D}{I_0} = -U_T \cdot \ln \frac{u_1}{R \cdot I_0}$$

kde znaménko je záporné, neboť čítací šipka výstupního napětí jde proti čítací šipce proudu diodou.

Z výsledného vztahu je patrné, že výstupní napětí je dáno logaritmem napětí vstupního.

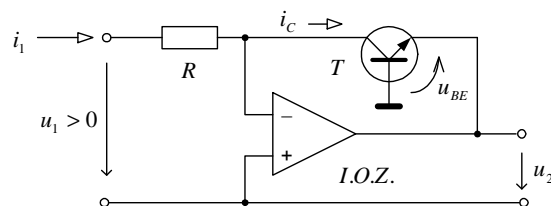
Pro přesný logaritmický převod je výhodnější používat tranzistoru bipolárního v zapojení na obr.2.70. Připojí-li se báze tranzistoru na nulové napětí, je kolektorový proud dán rovnicí:

$$i_C \approx h_{21B} \cdot I_{ES} \cdot \left( e^{\frac{q}{k \cdot T} \cdot u_{BE}} - 1 \right)$$

kde:  $h_{21B}$  je proudový zesilovací činitel v zapojení se společnou bází,  $I_{ES}$  je zpětný emitorový saturační proud a:  $u_{BE}$  napětí mezi bází a emitorem tranzistoru.

Protože pro napětí nad 100: mV převládá exponenciální člen, lze výše uvedenou rovnici přepsat do tvaru:

$$i_C \approx h_{21B} \cdot I_{ES} \cdot e^{\frac{q}{k \cdot T} \cdot u_{BE}} = h_{21B} \cdot I_{ES} \cdot e^{\frac{u_{BE}}{U_T}}$$



Obr.2.70 Schéma logaritmického převodníku s tranzistorem

odkud je po logaritmování:

$$u_{BE} \approx U_T \cdot \ln \frac{i_C}{h_{21B} \cdot I_{ES}}$$

a protože proud:  $i_C$  je při nulovém vstupním napětí:  $u_i$  operačního zesilovače:

$$i_C = \frac{u_1}{R}$$

pak výstupní napětí bude:

$$u_2 \approx -U_T \cdot \ln \frac{\frac{u_1}{R}}{h_{21B} \cdot I_{ES}} = -U_T \cdot \ln \frac{1}{h_{21B} \cdot I_{ES} \cdot R} \cdot u_1$$

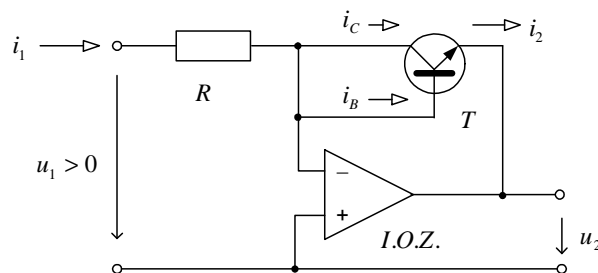
Logaritmický převodník znázorněný na obr.2.71 má bázi tranzistoru připojenou na (tzv.) virtuální zem operačního zesilovače, takže zpětnovazební proud je dán nyní vztahem:

$$i_2 = i_C + i_B = i_C + \frac{i_C}{h_{21E}} = i_C \cdot \left(1 + \frac{1}{h_{21E}}\right)$$

a výstupní napětí z převodníku je

$$u_2 \approx -U_T \cdot \ln \frac{1}{h_{21B} \cdot I_{ES} \cdot R \cdot \left(1 + \frac{1}{h_{21E}}\right)} \cdot u_1$$

Z tohoto vztahu plyne, že pro takovéto převodníky je nutno používat tranzistory s velkým proudovým zesilovacím činitelem  $h$ , který se nemá měnit v širokém rozmezí proudů. Takovouto vlastností se vyznačují křemíkové difuzní tranzistory plenárního typu, které převodníku poskytnou logaritmující schopnost v rozsahu až deseti dekad, zcela běžně lze realizovat převodníky pro šest dekad. Pro užití v těchto logaritmických převodnících byl určen speciálně tranzistor KC 810 a KC 811 (a nyní jejich ekvivalent).

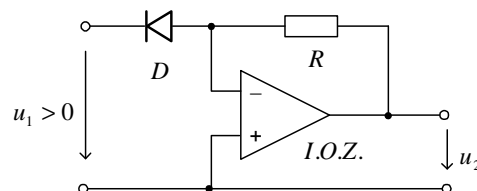


Obr.2.71 Jiné schéma logaritmického převodníku s tranzistorem

#### 2.10.4.2 Exponenciální převodník

Zamění-li se mezi sebou lineární a nelineární prvek v logaritmickém převodníku, vznikne převodník s exponenciální charakteristikou.

Tak na obr.2.72 je schéma zapojení převodníku s exponenciální charakteristikou, osazeného diodou a na obr.2.73 osazeného bipolárním tranzistorem.



Obr.2.72 Schéma exponenciálního převodníku s diodou

Pro převodník s diodou zjevně platí vztah:

$$u_2 \approx R \cdot I_0 \cdot e^{-\frac{u_1}{U_T}}, \quad u_1 < 0$$