

## 10 Spätná väzba v zosilňovačoch

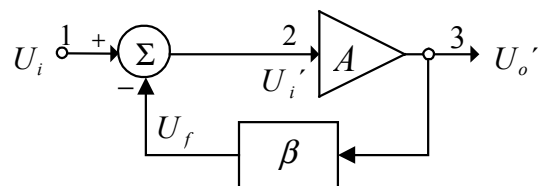
**Cieľ kapitoly:** Definícia a vysvetlenie základných pojmov, ktoré sa používajú pri kladnej, alebo zápornej spätnej väzbe v zosilňovačoch pomocou vhodných príkladov.

### Úvod

Spätná väzba hrá dôležitú úlohu takmer vo všetkých elektronických obvodoch. Pomocou zápornej spätnej väzby môžeme realizovať napríklad zosilňovač signálu s presne nastaveným a stabilným zosilnením. Pomocou kladnej spätnej väzby môžeme zas urobiť zo zosilňovača oscilátor periodického signálu. Výhody spätnej väzby vyniknú hlavne pri použití zosilňovačov v integrovanej podobe, ktoré vykazujú dostatok zosilnenia. Vysvetlíme základné funkcie a výhody spätnej väzby. V procese spätnej väzby odoberáme časť výstupného signálu zosilňovača a sčítavame ho so vstupným signálom. Výsledný signál, tzv. chybový signál vedieme na vstup zosilňovača. Ak je celý obvod so spätnou väzbou stabilný, potom sú celkové vlastnosti zosilňovača určené aj charakterom spätnoväzbového obvodu a spôsobom jeho prepojenia so zosilňovačom.

### 10.1 Zosilňovač so spätnou väzbou

Ako prvý ukážeme vplyv spätnej väzby na zosilnenie zosilňovača. Neskôr ukážeme vplyv spätnej väzby na ďalšie charakteristiky zosilňovača. Zosilňovač budeme uvažovať všeobecne ako „black box“ reprezentovaný trojuholníkovým symbolom podľa obrázku 10.1. Nie sú potrebné znalosti o jeho podrobnej vnútornej štruktúre. Blokový diagram ilustruje výber a spätný prenos signálu v systéme spätnej väzby. Časť výstupného napätia sa prenáša obvodom  $\beta$  a má hodnotu  $U_f$ . Spätnoväzbové napätie  $U_f$  sa odčíta od vstupného napätia  $U_i$  v sumačnom bode  $\Sigma$ . Chybový signál  $U_i'$  pôsobí na vstupnom porte vlastného zosilňovača. V aplikáciách negatívnej spätnej väzby chceme obvykle výstupné napätie tvarovo priblížiť k vstupnému napätiu. Systémy takejto spätnej väzby sú navrhované tak, aby bol rozdielový signál blízky nule.

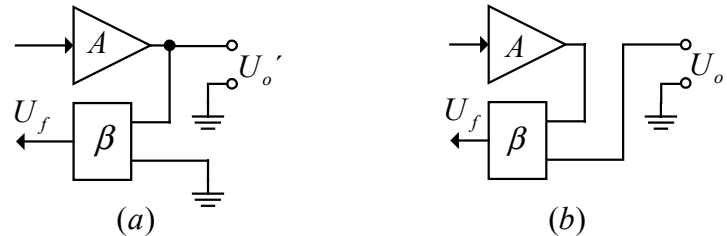


Obr. 10.1 Spätná väzba v zosilňovači

Od obvodu spätnej väzby  $\beta$  obvykle požadujeme:

1. Obvod  $\beta$  nezaťažuje výstupný a vstupný obvod zosilňovača.
2. Vstupný signál je prenášaný len v smere šípok, t.j. zo vstupu na výstup zosilňovača.
3. Spätnoväzbový signál je prenášaný z výstupu do vstupu iba cez  $\beta$  obvod, v smere šípky. Budeme teda uvažovať, že zosilňovač aj obvod spätnej väzby vedú signál iba jedným smerom (su to unilaterálne bloky). Nedodržanie týchto predpokladov môže znamenať zníženie presnosti ďalej odvodených vzťahov.

Napätie spätnej väzby  $U_f$  môže byť proporcionálne napätiu na záťaži alebo prúdu cez záťaž ako je ukázané na obrázku 10.2. Obvod  $\beta$  je navrhnutý pre nulový alebo  $180^\circ$  fázový posuv v pracovnom frekvenčnom rozsahu. Odporový delič napätia je jeden z vhodných  $\beta$  obvodov.



Obr. 10.2 Spätnej väzba : (a) napätiová, (b) prúdová

Vlastné zosilnenie zosilňovača, z portu 2 do portu 3, je  $A = \frac{U'_o}{U'_i}$  (10.1)

Napätie na výstupe spätoväzbového obvodu je:  $U_f = \beta U'_o$  (10.2)

Pre negatívnu spätú väzbu je toto napätie odčítané v sumačnom člene  $\Sigma$ , ako je to naznačené indikátorom polarity. Sumácia signálu môže byť uskutočnená v sérii so vstupným signálom, alebo paralelne. Na vstupe zosilovača je:

$$U'_f = U_i - U_f = U_i - \beta U'_o \quad (10.3)$$

Toto je chybový signál, reprezentujúci rozdiel medzi vstupným signálom a výstupnou vzorkou. Z rovn. 10.1 máme ďalej,  $AU'_i = U'_o$  takže  $AU_i = (1 + A\beta)U'_o$ .

Celkové zosilnenie pre systém spätnej väzby z portu 1 do portu 2 je

$$A' = \frac{U'_o}{U_i} = \frac{A}{1 + A\beta} \quad (10.4)$$

Toto je všeobecná rovnica spätnej väzby. Pretože zosilnenie je merané so spätou väzbou,  $A'$  sa nazýva zosilnenie s uzavretou slučkou spätnej väzby. Tato rovnica platí rovnako dobre aj pre prúdové zosilnenie.

V obrázku 10.1 je napätie spätnej väzby  $U_f$  odčítané od vstupného napätia  $U_i$ .

Výsledkom rovnice 10.4 je:

$$|A'| < |A| \quad (10.5)$$

Toto platí pre **negatívnu spätú väzbu**. Celkové zosilnenie so spätou väzbou je menšie než vnútorné zosilnenie zosilňovača. Ak je vnútorné zosilnenie  $-A$ , zmenou polarity  $U_f$  v obvode urobíme  $\beta$  negatívne. Potom máme rovn. 10.2 v tvare:

$$U_f = (-\beta)(-U'_o) = \beta U'_o$$

Rovnica 10.3 si teda môže zachovať svoj tvar. Napätie spätnej väzby  $U_f$  sa môže z dôvodu fázového posuvu  $A$ , alebo  $\beta$  aj pripočítať k  $U_i$  v sumačnom bode.

Narastanie  $U'_o$  potom spôsobuje stúpanie  $U'_i$  a ďalšie narastanie výstupného signálu. Zistili sme, že:

$$|A'| > |A| \quad (10.6)$$

Toto je **pozitívna (kladná) spätná väzba**. Pozitívna spätná väzba zvyšuje narastanie celkového zisku a elektrický obvod (zosilňovač) sa stáva regeneratívnym.

Kladná spätná väzba spôsobuje zvýšenie nestability zosilnenia, keď sa nachádza v oblasti blízko bodu  $A\beta = -1$ , v ktorom sa celkové zosilnenie stáva nekonečným. Vtedy bude mať zosilňovač na výstupe signál aj bez prítomnosti vstupného signálu, teda **zo zosilňovača sa stáva oscilátor**. Vo všeobecnosti je  $A\beta$  komplexným číslom. Obvykle sa snažíme udržať ho ako kladné alebo záporné reálne číslo a vyhneme sa oblasti blízkej k bodu  $A\beta = -1$ .

Základný signál je násobený  $A$  krát v zosilňovači a potom  $\beta$  krát v obrátenom smere cez spätnoväzbový obvod. Rozdiel medzi základným signálom a  $-A\beta$  sa nazýva **spätný rozdiel** ( $1 + A\beta$ ).

Tento termín budeme používať aj v ďalšom výklade spätnej väzby.

Veľkosť spätnej väzby v zosilňovači môžeme vyjadriť aj v dB.

$$\text{Spätná väzba v dB} = 20 \log \left| \frac{A}{A'} \right| \quad (10.7)$$

Použitím rovn. 10.4, to môže byť napísané spolu s použitím spätného rozdielu ako

$$\text{Spätná väzba v dB} = 20 \log |1 + A\beta| \quad (10.8)$$

Tieto hodnoty reprezentujú redukciu v zosilnení spôsobenú spätnou väzbou.

Z dôvodu zníženia celkového zosilnenia zápornou spätnou väzbou, musí byť vstupné napätie  $U_i$  zväčšené ak má zostať rovnaké výstupné napätie. V našom označení

$$U'_o = A'U_i$$

$$U'_o = AU'_i$$

Pre rovnakú úroveň na výstupe musí platiť:

$$U_i = \frac{A}{A'} U'_i = (1 + A\beta) U'_i \quad (10.9)$$

Vstupný signál musí teda vzrásť  $(1 + A\beta)$  krát, ak je spätná väzba realizovaná.

**Príklad 1.** Zosilňovač má zosilnenie  $A = -120$  a vstupné napätie  $U_i = 50\text{mV}$ . Činiteľ spätnej väzby  $\beta = -0.1$  a  $A\beta = (-120)(-0.1) = 12$ . Zosilnenie uzavretého obvodu je

$$A' = \frac{A}{1 + A\beta} = -\frac{120}{1 + 12} = -9.2$$

Vstupné napätie so spätnou väzbou sa musí zvýšiť na hodnotu:

$$U_i = (1 + A\beta)U'_i = 13 \times 0.05 = 0.65\text{V}$$

Výstupné napätie bez spätnej väzby je

$$U_o = AU_i = -120 \times 0.05 = -6.0\text{V}$$

So spätnou väzbou a zvýšeným vstupným napätím  $U_i$  máme:

$$U'_o = A'U'_i = -9.2 \times 0.65 = -6.0\text{V}$$

Napätia na vstupe zosilňovača so spätnou väzbou je:

$$U'_i = U_i - \beta U'_o = 0.65 - (-0.1)(-6.0) = 50\text{mV}$$

So zápornou spätnou väzbou, musí byť  $U_i = 0,65V$ , ale  $0,60V$  sa vracia cez  $\beta$  obvod, takže  $U_i' = 50mV$ . Vo vnútri slučky pracuje zosilňovač v rovnakých podmienkach ako bez spätnej väzby. Uvedená spätná väzba má v dB vyjadrenú veľkosť:  
 spätná väzba v  $dB = 20 \log(1 + A\beta) = 20 \times (1.11) = 22,2dB$

## 10.2 Stabilizácia zosilnenia pri zápornej spätnej väzbe.

Zosilnenie zosilňovača s polovodičovými súčiastkami je ovplyvnené zmenou teploty, zmenou napájacieho napätia, alebo zmenou parametrov tranzistorov pri výmene. Jeden z požadovaných efektov použitia negatívnej spätnej väzby je zlepšenie stability v zosilnení zosilňovača.

Percentuálna zmena zosilnenia so spätnou väzbou,  $dA/A' = S'$ , sa môže vzťahovať k percentuálnej zmene zosilnenia bez spätnej väzby  $dA/A = S$ , deriváciou rovn. 10.4 dostaneme

$$S' = \frac{dA'}{A'} = \frac{1}{1 + A\beta} \frac{dA}{A} = \frac{1}{1 + A\beta} S \quad (10.10)$$

$dA'/A'$  predstavuje citlivosť zosilnenia zosilňovača. Ako sa ukázalo, stabilita zosilnenia je zlepšená negatívnou spätnou väzbou. V súčasnosti je jednoduché pridať zosilnenie obvodovými technikami integrovaných obvodov a používaním veľkých hodnôt vnútorného zosilnenia  $A$ , môžeme navrhnúť zosilnenie systému takmer úplne nezávislé od vnútorného zosilnenia.

Napr. ak máme  $A > 10^4$ , tak  
 $A\beta \gg 1$

Potom z rovn. 10.4 platí:

$$A' = \frac{A}{1 + A\beta} \cong \frac{1}{\beta} \quad (10.11)$$

Zosilnenie je potom celkom závislé od systému spätnej väzby. Ak systém potrebuje obsahovať iba stabilne pasívne komponenty, získaná stabilita môže byť veľmi vysoká. Ak je  $A$  veľké, nezaujímame sa o jeho skutočnú hodnotu a zisk je závislý iba od  $\beta$ .

**Príklad 2.** Pri výrobe zosilňovača so zosilnením 100 je očakávaná odchýlka o 20% percent. Ako môže byť táto odchýlka zosilnenia znížená na 1% ?

Ak potrebujeme zosilnenie 100, mali by sme vytvoriť zosilňovač so spätnou väzbou. Platí:

$$A' = 100 = \frac{A}{1 + A\beta}$$

Pre odchýlku  $S=0.20$  podľa rovn. 10.10 platí:

$$S' = \frac{S}{1 + A\beta} \quad 0.01 = \frac{0.20}{1 + A\beta} \quad 1 + A\beta = 20$$

Pomocou tohto výsledku môžeme z rovnice 10.4 nájsť potrebné vnútorné zosilnenie zosilovača ako :

$$A = A'(1 + A\beta) = 100 \times 20 = 2000$$

S hodnotou  $A\beta = 19$ , je potom  $\beta = 0.0095$ , a zisk so spätnou väzbou je naozaj

$$A' = \frac{2000}{1 + 19} = 100$$

ako bol požadovaný. Tento zisk, je stabilizovaný s chybou do 1%. Musíme použiť zosilňovač so ziskom 2000 z cieľom zníženia chyby zosilnenia menej ako 1% pri zisku 100.

**Príklad 3.** Zosilňovač je navrhovaný s  $A=4000$ . Výberom  $\beta = 0.04$  máme

$$A\beta = 4000 \times 0.04 = 160$$

Teda: 
$$A' = \frac{4000}{1+160} = 24.84$$

Predpokladajme, že vnútorný zisk sa zdvojnásobí na 8000. Pre túto hodnotu je:

$$A\beta = 8000 \times 0.04 = 320$$

$$A' = \frac{8000}{1+320} = 24.92$$

Tento príklad ukazuje, že s veľkým  $A$  môže byť zisk so spätnou väzbou udržiavaný na hodnote veľmi blízkej k číslu

$$A' = \frac{1}{\beta} = \frac{1}{0.04} = 25$$

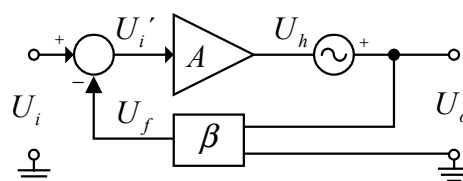
bez ohľadu na veľmi veľké zmeny vnútorného zisku  $A$ .

### 10.3 Zníženie nelineárneho skreslenia pomocou zápornej spätnej väzby

Ak pracuje zosilňovač s veľkým rozkmitom napätia, ktoré je porovnateľné s napájacím napätím je v dôsledku nelinearity prevodovej charakteristiky, výstupný signál výkonového zosilňovača obohatený o vyššie harmonické zložky. V zodpovedajúcom obrázku 10.3 predpokladáme, že zisk zosilňovača  $A$  je konštantný a vyššie harmonické zložky spôsobujúce skreslenie sú zvlášť generované v sériovom generátore  $U_h$ . Negatívna spätná väzba je realizovaná  $\beta$  obvodom.

S odpojenou slučkou spätnej väzby ( $U_f = 0$ ), je na výstupe zosilňovača napätie:

$$U_o = AU_i' + U_h \quad (10.12)$$



Obr. 10.3 Skresľujúci signál  $U_h$  v spätnej väzbe zosilňovača

So zapojenou spätnou väzbou platí:  $U_i' = U_i - U_f$

a výstupné napätie má hodnotu  $U_o' = AU_i' + U_h$  (10.13)

Použitím rovn.  $U_o' = A\{(1 + A\beta)U_i' - \beta U_o'\} + U_h$  10.7 pre  $U_i$  so spätnou väzbou, a s  $U_f = \beta U_o'$  dostaneme:

$$U_o' = AU_i' + \frac{U_h}{1 + A\beta} \quad (10.14)$$

Nelineárne skreslenie je funkciou výstupnej amplitúdy, a preto budeme uvažovať rovnaké výstupné napätie vo vzťahoch 10.12 a 10.14 ( $U_o = U_o'$ ). Porovnaním uvedených rovníc vidíme, že použitie spätnej väzby znížilo harmonické skreslenie faktorom  $1/(1+\beta A)$ .

$$D' = \frac{D}{1 + A\beta} \quad (10.15)$$

Tento výsledok je veľmi dôležitý pre konštruovanie vysoko – kvalitných výkonových audio zosilňovačov.

Generátor  $U_h$  môže reprezentovať taktiež šum generovaný v zosilňovači. Šum bude redukovaný na výstupe podľa rovn. 10.15 za predpokladu, že vstupný signál má zanedbateľnú vlastnú šumovú zložku. Ľubovoľný šum, ktorý je súčasťou vstupného signálu je spracovaný ako dodatočný vstupný signál a nie je sp. väzbou potlačený.

**Príklad 4.** Zosilňovač s  $A=500$  vykazuje 11% nelineárne skreslenie pri plnom výstupnom signáli. Aká hodnota  $\beta$  je potrebná pre redukciiu skreslenia na 1% ?

Zo vzťahu pre nelin. skreslenie:

$$D' = \frac{D}{1 + A\beta} \quad I = \frac{11}{1 + A\beta}$$

z čoho vyplýva  $A\beta = 10$

Zosilnenie so spätnou väzbou je redukované na hodnotu

$$A' = \frac{A}{1 + A\beta} = \frac{500}{1 + 10} = 45.5$$

Redukcia zisku z 500 na 45 je cenou za zníženie nelin. skreslenia.

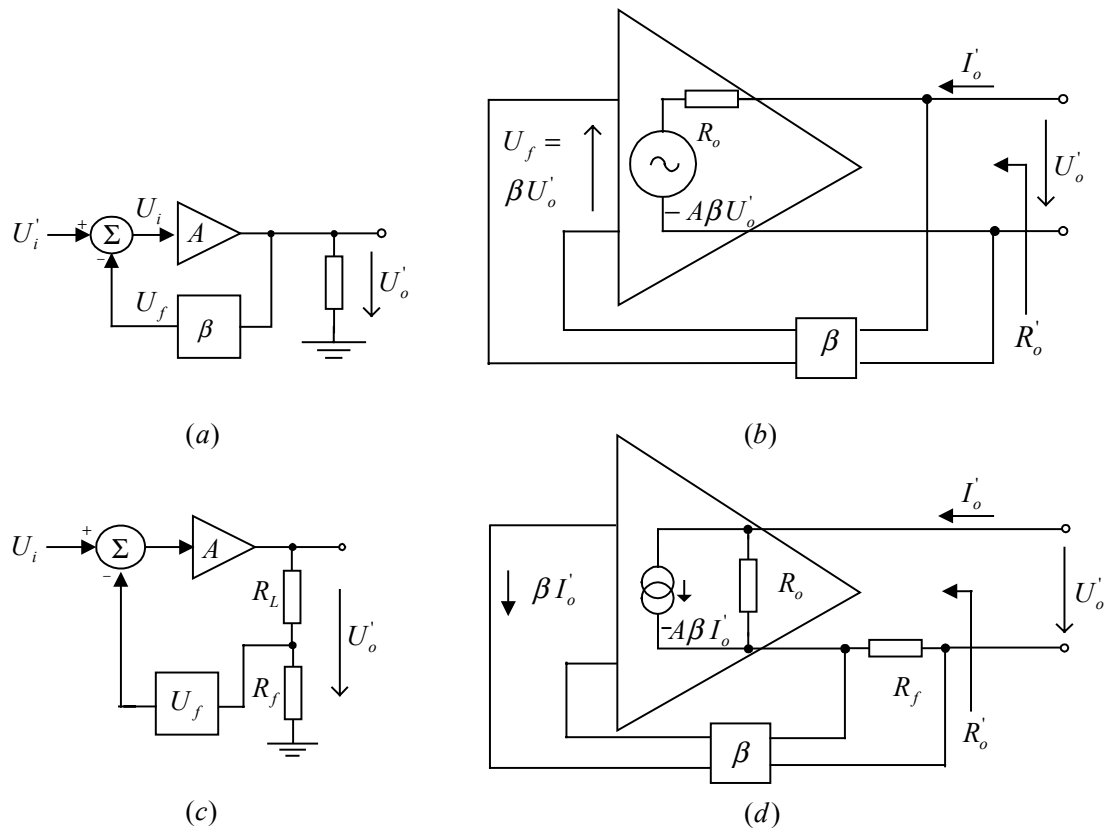
#### 10.4 Vplyv spätnej väzby na výstupný odpor zosilňovača

Spätnoväzbové napätie, ktoré privádzame na vstup môže byť odvodené buď od výstupného prúdu tečúceho cez záťaž zosilňovača, alebo od výstupného napätia na záťaži. Spätnoväzbové napätie úmerné výstupnému napätiu má pri zápornej spätnej väzbe snahu udržovať toto výstupné napätie konštantné - výsledkom je zníženie výstupného odporu zosilňovača. Takáto napäťová spätna väzba je blokovo znázornená na obr. 10. 4 a, b. Výstupný odpor vypočítame (alebo odmeriame) tak, že položíme (skratujeme) vstupné napätie  $U_i$  rovné nule. Podľa obr. 10.4 potom platí vo výstupnej slučke rovnica,

$$U_o' - R_o I_o' + A\beta U_o' = 0$$

Pre výstupný odpor so spätnou väzbou potom platí  $R_o' = \frac{U_o'}{I_o'} = \frac{R_o}{1 + A\beta}$  (10.16)

Výstupný odpor zosilňovača s napäťovou spätnou väzbou je zmenšený úmerne veľkosti spätneho rozdielu. Pri spätnoväzbovom napätí úmernom zaťažovaciemu prúdu sa spätná väzba "snaží" udržať na výstupe konštantný prúd - dochádza k zväčšeniu výstupného odporu. Na demonštrovanie tejto vlastnosti zvolme v modeli zosilňovača riadený prúdový zdroj podľa obr. 10. 4d.



Obr. 10.4 Napät'ová spätná väzba (a), náhradný obvod (b), prúdová spätná väzba (c), náhradný obvod (d).

Po skratovaní nezávislého vstupného napätia dostaneme  $U'_o = R_o(I'_o + A\beta I'_o)$ , z čoho pre výstupný odpor so spätnou väzbou platí

$$R'_o = \frac{U'_o}{I'_o} = (1 + \beta A)R_o \quad (10.17)$$

Výstupný odpor zosilňovača sa teda pôsobením zápornej spätnej väzby zväčšil.

### 10.5 Vplyv spätnej väzby na vstupný odpor zosilňovača

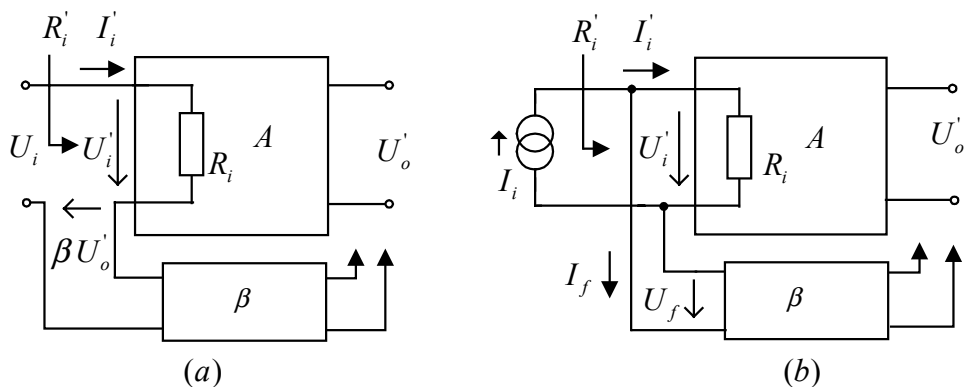
Zavedenie spätnoväzbového napätia do vstupného obvodu má vplyv aj na vstupný odpor zosilňovača so spätnou väzbou. Existujú dva spôsoby zavedenia spätnoväzbového napätia do vstupu, a) v sérii so vstupným napätím, b) paralelne k zdroju vstupného signálu. Na obr. 10.5a máme sériové zapojenie. Pre vstupný prúd platí,

$$I_i = \frac{U_i}{R'_i} = \frac{U_i}{R_i} \quad (10.18)$$

Pomocou rovnice (10.9) máme  $U_i = (1 + \beta A)U'_i$ , takže pre vstupný odpor platí:

$$R'_i = (1 + A\beta)R_i \quad (10.19)$$

Pri zápornej sériovej spätnej väzbe sa vstupný odpor zvyšuje.



Obr. 10.5 Sériová spätná väzba (a), paralelná spätná väzba (b).

Paralelné zavedenie spätnoväzbového signálu môžeme analyzovať podľa obr. 10.5b. Ako vstupný signál použijeme prúdový zdroj s prúdom  $I_i$ . Platí vzťah:

$$I_i = I_f + I_i' \quad (10.20)$$

z ktorého  $\frac{U_i'}{R_i} = \frac{A\beta U_i'}{R_i} + \frac{U_i'}{R_i}$ , a teda pre vstupný odpor platí,

$$R_i' = \frac{R_i}{1 + A\beta} \quad (10.21)$$

Výsledkom zavedenia paralelnej spätnej väzby je zníženie vstupného odporu. Vplyv zápornej spätnej väzby na základné parametre zosilňovača.

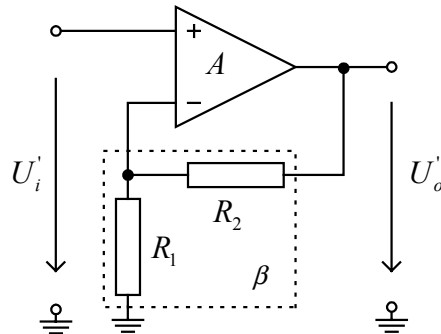
10.1 Nap./Prúdová	Napätiová		Prúdová	
	Sériová	Paralelná	Sériová	Paralelná
$R_i$	Rastie	Klesá	Rastie	Klesá
$R_o$	Klesá	Klesá	Rastie	Rastie
Stabilita zisku	Zlepšuje	Zlepšuje	Zlepšuje	Zlepšuje
Nelinearne skreslenie	Klesá	Klesá	Klesá	Klesá

### Úloha:

1. Pre zosilňovač s vnútorným zosilnením  $A = -200$ , vstupným napätím  $U_i = 20\text{mV}$  a činiteľom spätnej väzby  $\beta = -0.3$  zistite zosilnenie uzavretého obvodu spätnej väzby. Ďalej určte o koľko musí byť zvýšené vstupné napätie v dôsledku zníženia celkového zosilnenia so zápornou spätnou väzbou pre rovnaké výstupné napätie? Vyjadrite veľkosť spätnej väzby v zosilňovači v dB.
2. Pri výrobe zosilňovača so zosilnením 200 je očakávaná tolerancia zosilnenia 15%. Ako môžeme túto toleranciu zosilnenia znížiť na 1%?
3. Zosilňovač s  $A = 500$  vykazuje 15% nelineárne skreslenie pri maximálnej hodnote výstupného signálu. Aká hodnota  $\beta$  je potrebná pre redukciu skreslenia na 1%?



4. Pre zapojenie neinvertujúceho zosilňovača s DOZ (obr. 10.6) vypočítajte napäťové zosilnenie  $A_U$ , vstupný odpor  $R_{vst}$  a výstupný odpor  $R_{vyst}$ . Parametre DOZ sú: vnútorné zosilnenie  $A = 10^5$ , vstupný odpor  $R_I = 1M\Omega$ , výstupný odpor  $R_O = 50\Omega$ .  $R_1 = 100\Omega$ ,  $R_2 = 10k\Omega$ .



$$A'_o = \frac{A}{1 + \beta A}$$

$$\beta = \frac{U_f}{U_o} = \frac{R_1}{R_1 + R_2}$$

Obr. 10.6 Zapojenie neinvertujúceho zosilňovača s DOZ

Doplnková literatúra k 10. kapitole

[1] Price, T.E.: Analog Electronics - an integrated PSpice approach. Prentice Hall, 1976