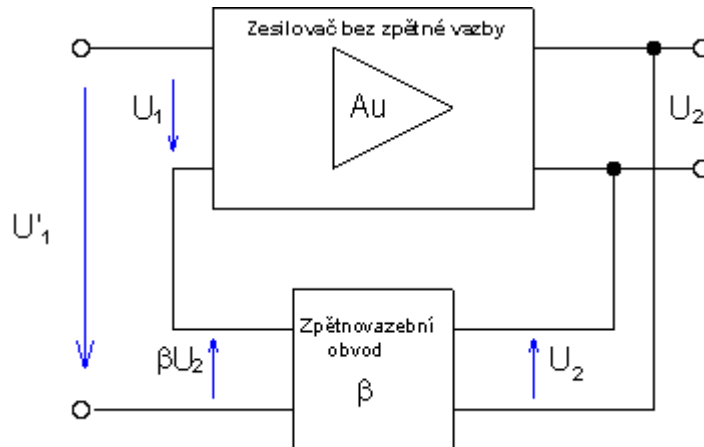


## Zpětná vazba

Při zpětné vazbě se část výstupního signálu přivádí zpět na vstup zesilovače. Podle způsobu zapojení rozeznáváme kladnou a zápornou zpětnou vazbu. Kladná zpětná vazba zesílení zesilovače zvětšuje, ale současně zvyšuje i nestabilitu zesilovače. Naopak záporná zpětná vazba zesílení snižuje, ale současně zvyšuje stabilitu zesilovače, což je pro běžné aplikace zesilovačů důležitější.



obr.1 Zesilovač se zavedenou zpětnou vazbou

Zesílení zesilovače bez zpětné vazby je :  $A_U = \frac{U_2}{U_1}$ . Po zavedení zpětné vazby se do vstupního

obvodu přenesou zpětnovazební napětí jako  $\beta$  část výstupního napětí označená  $\beta U_2$ . Na vstupu zesilovače se tak objeví napětí  $U_1'$ , které je rozdílem vstupního napětí zesilovače a zpětnovazební napětí  $\beta U_2$ , takže platí:  $U_1' = U_1 - \beta U_2$ . Potom zesílení zesilovače po zavedení zpětné vazby  $A_U'$  je dáno vztahem:

$$A_U' = \frac{U_2}{U_1'} = \frac{U_2}{U_1 - \beta U_2} = \frac{\frac{U_2}{U_1}}{\frac{U_1 - \beta U_2}{U_1}} = \frac{A_U}{1 - \beta A_U}$$

Vztah pro zesílení zesilovače po zavedení zpětné vazby je obecně komplexní, a platí-li  $\beta A_U > 0$ , je vazba kladná a  $\beta A_U < 0$ , je vazba záporná. U operačních zesilovačů je zesílení bez zpětné vazby veliké (řádově  $10^6$ ) a platí

$$A_U' = \frac{\frac{A_U}{A_U}}{\frac{1}{A_U} - \frac{\beta A_U}{A_U}} \approx \pm \frac{1}{\beta} \quad \text{zesílení operačního zesilovače je tedy závislé pouze}$$

na stupni zavedení zpětné vazby.

### Rozbor vlastností:

- a) pro  $\beta A_U < 0$ ;  $\beta A_U$  je reálné záporné číslo, je zpětná vazba záporná.

Zpětnovazební napětí má opačnou fázi než vstupní napětí zesilovače. Toho dosáhneme zavedením zpětné vazby přes lichý počet stupňů.

Pro zápornou zpětnou vazbu platí:  $A_U' = \frac{A_U}{1 + \beta A_U}$

*př.1 Zesílení zesilovače před zavedením zpětné vazby  $A_U = 100$ ,  $\beta A_U = 2$*

$$\text{potom } A_U' = \frac{100}{1+2} = \frac{100}{3} = 33,3 \quad \text{zesílení se zmenšilo na třetinu}$$

Záporná zpětná vazba stabilizuje vlastnosti jakéhokoliv zařízení. U zesilovačů se záporná zpětná vazba používá k teplotní stabilizaci pracovního bodu, k nastavení zesílení, ke zmenšení nelineárního zkreslení a k rozšíření šířky přenášeného pásma. Budeme-li uvažovat pokles přenosové charakteristiky v oblasti dolních a horních kmitočtů 20dB/dekádu, pak snížení zesílení zavedením záporné zpětné vazby o 20 dB rozšíří šířku pásma o dvě kmitočtové dekády. (dekáda představuje kmitočty od 10 Hz do 100 Hz, nebo od 10 kHz do 100 kHz apod.

Záporná zpětná vazba také ovlivňuje nelineární zkreslení, které je dáno obsahem vyšších harmonických základního kmitočtu v signálu na výstupu zesilovače.

*př.2 Nechť nelineární zkreslení, které se označuje  $k$ , má před zavedením zpětné vazby hodnotu  $k = 10\%$ , zesílení zesilovače bez vazby je  $A_U = 100$  a pokles na mezním kmitočtu  $m = 0,5$  tj. 6dB. Požadujeme, aby po zavedení zpětné vazby došlo ke snížení zkreslení na hodnotu  $k' = 2,5\%$ .*

$$\text{pro zkreslení po zavedení zpětné vazby platí: } k' = \frac{k}{1 + \beta A_U}$$

$$\text{pro pokles zesílení na mezních kmitočtech: } m' = m \frac{1 + \beta A_U}{1 + m\beta A_U}$$

nejdříve si ze základního vztahu vypočítáme činitel zpětné vazby  $\beta$

$$k' = \frac{k}{1 + \beta A_U} \Rightarrow k' + k' \beta A_U = k \Rightarrow \beta = \frac{k - k'}{k' A_U} = \frac{10 - 2,5}{100 \cdot 2,5} = 0,03$$

$$\text{Zesílení po zavedení zpětné vazby } A_U' \text{ je: } A_U' = \frac{A_U}{1 + \beta A_U} = \frac{100}{1 + 0,03 \cdot 100} = \frac{100}{4} = 25$$

Pokles kmitočtové charakteristiky na mezních kmitočtech:

$$m' = m \frac{1 + \beta A_U}{1 + m\beta A_U} = 0,5 \frac{1 + 0,03 \cdot 100}{1 + 0,5 \cdot 0,03 \cdot 100} = 0,8 \quad \text{což je pokles o 1,9 dB}$$

$$m'_{\text{dB}} = 20 \cdot \log m'$$

**b) pro  $\beta A_U > 0$  jde o zpětnou vazbu kladnou, platí zde však podmínka  $0 < \beta A_U < 1$**

Zpětnovazební napětí je ve fázi se vstupním napětím, čehož dosáhneme zavedením zpětné vazby přes sudý počet stupňů. Napětí se na vstupu sčítají a zesilovač má velké zesílení.

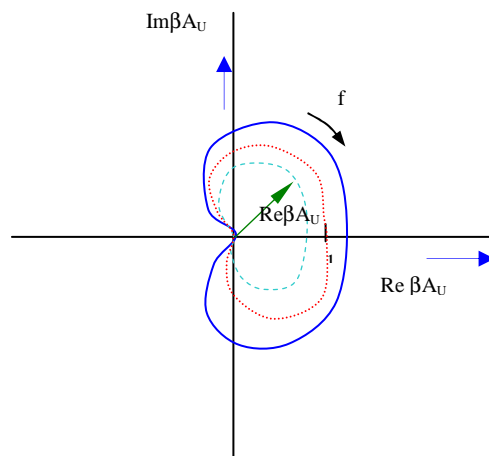
*př.3 Nechť zesílení zesilovače před zavedením kladné zpětné vazby má hodnotu  $A_U = 100$ . V obvodu zpětné vazby byla zavedena vazba s činitelem  $\beta = 0,0099$ , potom součin  $\beta A_U = 0,0099 \cdot 100 = 0,99$ . Určete zesílení po zavedení kladné zpětné vazby.*

$$A_U' = \frac{A_U}{1 - \beta A_U} = \frac{100}{1 - 0,99} = 10000$$

c) pro  $\beta A_U = 1$  vzniká kritický stav, který se nazývá oscilační podmínka.

Tato podmínka je splněna, jestliže celkový fázový posuv zesilovače a obvodu zpětné vazby bude nulový ( $\varphi_\beta + \varphi_{A_U} = 0$ ) a součin velikostí přenosů je roven jedné  $\beta A_U = 1$ . Pokud je oscilační podmínka splněna pouze pro jediný kmitočet, zesilovač se na tomto kmitočtu rozkmitá a na jeho výstupu budou harmonické kmitý. Takový zesilovač se stává *oscilátorem*.

Při běžném provozu zesilovačů, je však situace složitější, protože i když není splněna oscilační podmínka, může za určitých okolností dojít k jejímu splnění a zesilovač se rozkmitá. Vznikne nestabilita zesílení zesilovače. Pro hodnocení stability zesilovačů se používají různá kritéria z nichž nejvíce používané je kritérium Nyquistovo.



obr.2 Nyquistovo kritérium stability

Na obr.2 jsou načrtnuty tři průběhy přenosu zesilovačů s rozpojenou smyčkou zpětné vazby. Z průběhů vyplývá, že zesilovače nezesilují signály s kmitočtem blízkým k nule a k nekonečnu. Pro libovolný kmitočet lze z grafu odečíst velikost a fázi komplexního přenosu soustavy  $\beta A_U$ . Ze všech tří případů je zesilovač stabilní pouze v případě, kdy křivka při žádném průběhu neprotíná ani neobsahuje bod 1 na reálné ose. Tomu odpovídá křivka zelená (čárkovaná). V obou dalších případech je zesilovač nestabilní, při kritické vazbě protíná křivka červená (tečkovaná) bod 1 a zesilovač pracuje jako generátor netlumených kmitů, při nadkritické vazbě křivka modrá (plná čára) má obvod nestabilní charakter a může se samovolně rozkmitat, např. při zapnutí zesilovače.

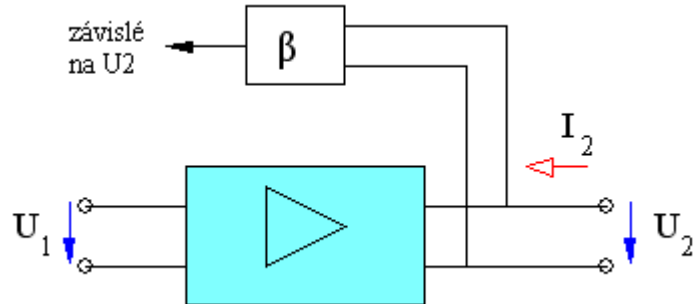
Všechny body křivky, které leží na Nyquistově charakteristice vpravo od svislé osy, odpovídají kladné hodnotě  $Re\beta A_U$ , a zpětná vazba je kladná. Vlevo od svislé osy má  $Re\beta A_U$  zápornou hodnotu a zpětná vazba je záporná.

### Druhy zpětných vazeb

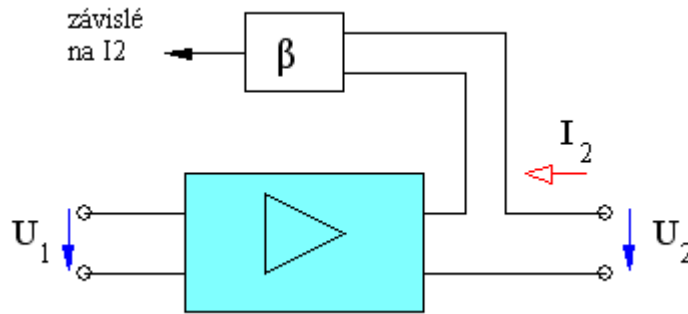
Zpětnovazební obvod a zesilovač jsou dvojbrany, a proto je možné je vzájemně propojit čtyřmi způsoby a tak mohou vzniknout :

- napěťová zpětná vazba paralelní
- napěťová zpětná vazba sériová
- proudová zpětná vazba paralelní
- proudová zpětná vazba sériová

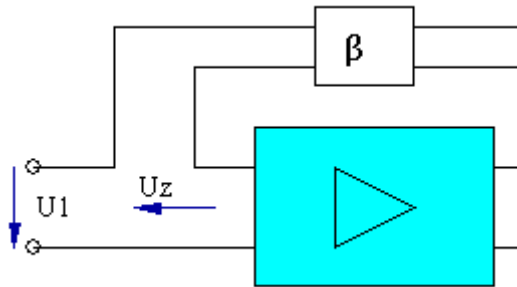
Pokud se zpětnovazební napětí ve výstupu zesilovače získává paralelně s výstupní zátěží, vzniká zpětná vazba napěťová, pokud se toto napětí získává průtokem výstupního proudu na zpětnovazebním členu, který je připojen do série se zátěží, pak vzniká zpětná vazba proudová. Připojení zpětné vazby ke vstupnímu obvodu pak definuje zpětnou vazbu sériovou, při sériovém připojení ke vstupu obvodu, nebo paralelní při paralelním připojení ke vstupu zesilovače.



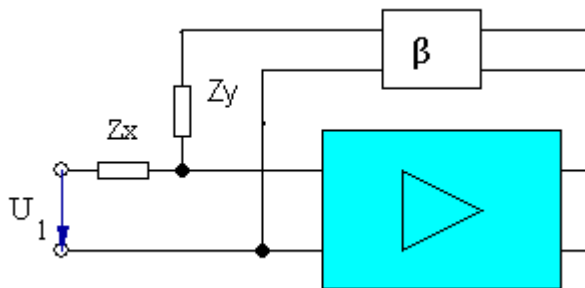
obr.3 Napěťová zpětná vazba



obr.4 Proudová zpětná vazba



obr.5 Slučování signálu zavedeného zpětnou vazbou s původním vstupním signálem sériově



obr.6 Slučování signálu zavedeného zpětnou vazbou s původním vstupním signálem paralelně

## Základní vlastnosti zpětné vazby- vliv na výstupní a vstupní impedanci zesilovače

Výstupní impedance se :

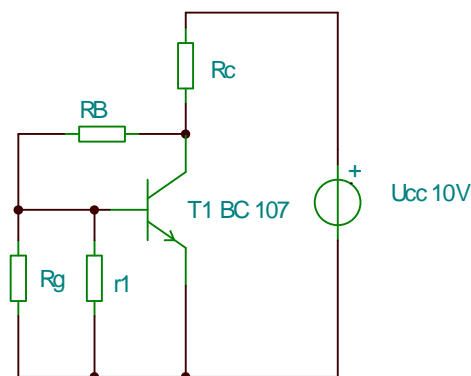
kladnou zpětnou vazbou napěťovou	zvětšuje
kladnou zpětnou vazbou proudovou	zmenšuje
zápornou zpětnou vazbou napěťovou	zmenšuje
zápornou zpětnou vazbou proudovou	zvětšuje

Vstupní impedance se :

kladnou paralelní zpětnou vazbou	zvětšuje
kladnou sériovou zpětnou vazbou	zmenšuje
zápornou paralelní zpětnou vazbou	zmenšuje
zápornou sériovou zpětnou vazbou	zvětšuje

## Příklady zapojení zpětné vazby v zesilovačích

## Záporná zpětná vazba napěťová paralelní, zavedená v 1. stupni zesilovače SE

Zadané hodnoty :  $R_B = R_1 = 470 \text{ k}\Omega$  ;  $R_C = R_3 = 1,2 \text{ k}\Omega$  ;  $A_U = 21,6$ 

obr.7 Základní schéma zapojení obvodu napěťové záporné zpětné vazby paralelní

Vazba vzniká působením rezistoru  $R_B$ , kterým se přivádí ke vstupnímu obvodu proud, úměrný výstupnímu napětí. Hodnotu činitele zpětné vazby  $\beta$  určíme pomocí všech prvků, které v obvodu zpětné vazby působí.

$$\beta = \frac{\frac{R_g r_1}{R_g + r_1}}{\frac{R_g r_1}{R_g + r_1} + R_B} = \frac{R_g r_1}{R_g r_1 + R_B (R_g + r_1)}$$

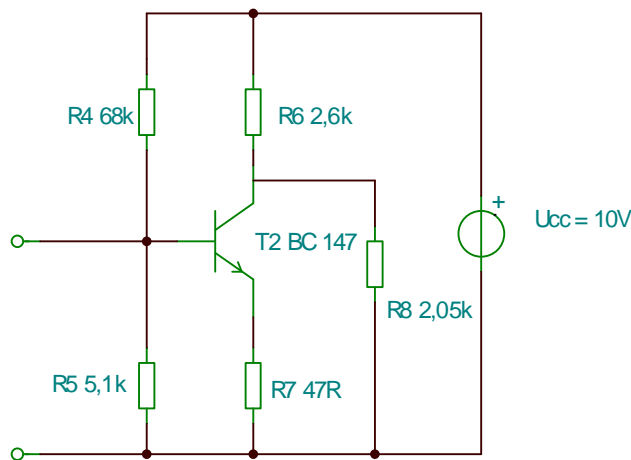
Ve výrazu dosadíme za  $R_g$  a  $r_1$   $R_g = \frac{R_1 R_2}{R_1 + R_2} = \frac{470 \cdot 30}{470 + 30} \text{ k}\Omega = 28,2 \text{ k}\Omega$

$$r_1 = h_{21} \frac{1}{S} = 250 \cdot 60 = 15 \text{ k}\Omega = h_{11}$$

$$\beta = \frac{R_g \cdot r_1}{R_g \cdot r_1 + R_1 (R_g + r_1)} = \frac{28,2 \cdot 15}{28,2 \cdot 15 \cdot (28,2 + 15)} = 0,02$$

**Stupeň zavedené záporné zpětné vazby určíme z výrazu  $N = 1 + \beta \cdot A_u$  ( $A_u$  zadáno v předchozí**

**Záporná zpětná vazba proudová sériová, zavedená ve 2. stupni zesilovače SE**



obr.8 Schéma zapojení druhého stupně zesilovače pro stanovení obvodových parametrů v dynamickém režimu

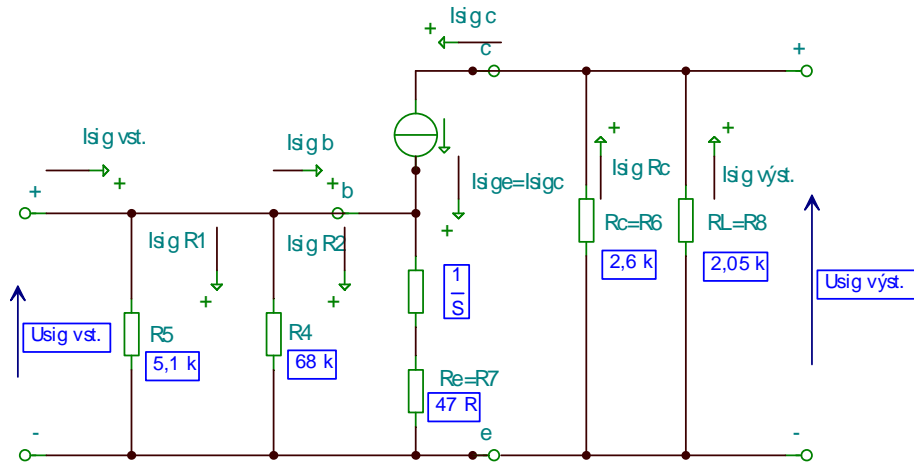
Záporná zpětná vazba proudová sériová vzniká na neblokováném emitorovém rezistoru  $R_7$  při průtoku emitorového proudu. Úbytek napětí působí proti vstupnímu signálu a zmenšuje tak okamžitou hodnotu napětí  $U_{be}$ , tím i hodnotu bázevého proudu  $I_b$  a v jeho důsledku i kolektorového proudu  $I_c$ .

Činitel zpětné vazby  $\beta$  určíme stejně jako u prvního stupně z obvodových parametrů zesilovače.

$$\beta = \frac{R_{E'}}{R_Z} \quad \text{hodnotu } R_{E'} \text{ určíme z náhradního obvodu zesilovače pro střídavý proud, jako}$$

paralelní kombinaci rezistoru  $R_E = R_7$  a všech uplatňujících se rezistorů náhradního obvodu.

hodnotu  $R_Z$  určíme pomocí kolektorového odporu  $R_C = R_6$  a všech paralelních rezistorů v náhradním obvodu dle obr.9



obr.9 Náhradní obvod zesilovače pro střídavý proud

$$R_{E'} = \left( R_e + \frac{1}{S} \right) // R_5 // R_4 = (47\Omega + 11,4\Omega) // 5,1\text{ k}\Omega // 68\text{ k}\Omega = 58\ \Omega$$

$$R_Z = R_C // R_L = R_6 // R_8 = 2,6\text{ k}\Omega // 2,05\text{ k}\Omega = 1,13\text{ k}\Omega$$

Vypočítané hodnoty  $R_{E'}$  a  $R_Z$  dosadíme do výrazu pro výpočet činitele zpětné vazby  $\beta$

$$\text{Činitel zpětné vazby} \quad \beta = \frac{R_{E'}}{R_Z} = \frac{58\Omega}{1130\Omega} = 0,05$$

$$\text{Stupeň zpětné vazby ve 2.stupni} \quad N_2 = 1 + \beta A_{U2} = 1 + 0,05 \cdot 19,4 = 1,97$$

$$N = 1 + 0,02 \cdot 21,6 = 1,432$$

Zavedením záporné zpětné vazby se zvětší  $R_{\text{sig.vst.}}$ ,  $R_{\text{sig.vyst.}}$ , napěťové zesílení se podstatně zmenší a kmitočtové pásmo zesilovače se rozšíří. Tato vazba je vhodná pro obvody ve kterých je potřebný velký  $R_{\text{sig.vst.}}$ , například pro obvody předzesilovačů, které jsou buzeny ze zdroje s malým vnitřním odporem  $R_i$ . Neblokovaným emitorovým odporem se zlepšuje stabilita nastavení pracovního bodu.