

# ZPĚTNÁ VAZBA U ZESILOVAČŮ

Zpětnou vazbou nazýváme zapojení, v němž je část výstupního napětí vedena buď přímo nebo přes určitý čtyřpól zpět na vstup a zde se algebraicky (s ohledem na znaménko) přičítá ke vstupnímu signálu.

Základní zesilovací větev má napětňové zesílení  $A = \frac{U_2}{U_1}$ . Signál z výstupu je veden přes přenosový

člen  $\beta$  veden zpět na vstup. Zpětnovazební člen  $\beta$  má napětňový přenos  $\beta = \frac{U_\beta}{U_2}$ . Napětí  $U_\beta = \beta U_2 = \beta A \cdot U_1$  je přiváděno na vstup tak, že se sečítá s budícím signálem  $U_s$  tak, že vstupní napětí zesilovače je dáno součtem  $U_1 = U_s + U_\beta$ .

Z této rovnice plyne pro budící napětí  $U_s = U_1 - U_\beta = U_1(1 - \beta A)$ . Můžeme tedy napsat, že přenos

zesilovače se zpětnou vazbou je dán vztahem  $A' = \frac{U_2}{U_s} = \frac{U_2}{U_1(1 - \beta A)} = \frac{A}{1 - \beta A}$ . Je vidět, že rozhodující vliv na zesílení zpětnovazebního zapojení má součinn  $\beta A$ . Tento se nazývá *vratný podíl zpětné vazby*, protože udává podíl zpětnovazebního napětí  $U_\beta$  na vstupní napětí  $U_1$ . Rozdíl vratného podílu od jedničky se nazývá *vratný rozdíl* nebo *stupeň zpětné vazby* -  $N$  a udává poměr zesílení zesilovače bez zpětné vazby k zesilovači se zpětnou vazbou.

$N = 1 - \beta A = \frac{A}{A'}$ . Z toho také plyne, že zesílení zesilovače se zpětnou vazbou je dáno  $A' = \frac{A}{1 - \beta A} = \frac{A}{N}$ . U zesilovačů musí být z hlediska stability vždy  $N > 1$ , t.zn.  $\beta A < 0$ . U oscilátorů je to naopak. Je-li tedy  $\beta A < 0$ , mluvíme o záporné zpětné vazbě. Pro  $\beta A > 0$ , mluvíme o kladné zpětné vazbě.

## Nyquistův diagram

Pouze v malém frekvenčním rozsahu a při nízkých frekvencích vykazují čtyřpóly čistě reálné zesílení. Obecně je vratný podíl komplexní číslo a jeho reálná i imaginární část jsou závislé na frekvenci. Můžeme tedy psát

$(\hat{\beta \cdot A}) = \text{Re}(\hat{\beta \cdot A}) + j \text{Im}(\hat{\beta \cdot A}) = |\beta \cdot A| e^{j\varphi_{\beta A}}$ . Je tedy  $\hat{\beta \cdot A}$  vektor, o absolutní hodnotě  $|\beta \cdot A|$  a fázi  $\varphi_{\beta A}$ . Obě tyto veličiny, t.j. modul i fáze jsou závislé na frekvenci a projdeme-li frekvenční rovinu od 0 do  $\infty$  opiše koncový bod vektoru křivku, která se nazývá Nyquistovým diagramem. Pro stejnosměrné zesilovače tato křivka začíná na reálné ose, pro střídavé zesilovače začíná v počátku souřadnic. Ale pro oba případy končí tato křivka v počátku, t.j. v nule, protože neznáme takový reálný zesilovač, který by při  $\infty$  frekvenci neměl nulové zesílení. Jinak řečeno, Nyquistův diagram je geometrické místo koncových bodů vektorů  $\beta A$  při změně frekvence od 0 do  $\infty$ . Kreslí se v komplexní, Gaussovo rovině.

Na základě Nyquistova diagramu je založeno tzv. Nyquistovo kritérium stability zesilovačů, které patří do kategorie frekvenčních kritérií stability (oproti skupině algebraických kritérií). Velká výhoda těchto frekvenčních kritérií spočívá v tom, že je lze prakticky naměřit a v případě zjištění nestability nám umožní určit jaká opatření nutno udělat pro odstranění těchto nestabilit.

**Nyquistovo kritérium stability** zní: Má-li být zesilovač stabilní, musí při procházení Nyquistova diagramu ve směru rostoucích frekvencí ležet vždy bod, o souřadnicích  $(1, j0)$  po levé ruce pozorovatele.

Nakreslíme-li do komplexní roviny tedy kružnici se středem v bodě  $(1, j0)$  a o poloměru  $r = 1$ , je pro všechny body Nyquistova diagramu, které leží vně zmíněné kružnice zpětná vazba záporná a jsou splněny podmínky pro stabilitu zesilovače a pro všechny body uvnitř této kružnice je zpětná vazba kladná a jsou předpoklady pro vznik oscilací. Pro body Nyquistova diagramu, které leží na kružnici (protínají kružnici) je zpětná vazba nulová, t.zn.  $N = 1$  a  $A' = A$ . Obvykle se připouští, aby v okrajových oblastech mimo frekvenční pásmo přenášených signálů se zmenšil modul vratného rozdílu na hodnotu  $N = 0,5$ . Menší hodnoty nejsou pro žádnou frekvenci přípustné, protože by byla ohrožena stabilita zesilovače.

V praxi se musí počítat s určitou zálohou stability pro případ, že by se během provozu zesilovače měnil jeho zisk. Proto nemá Nyquistova charakteristika zasahovat do vyšrafované plochy, vymezené úhly  $\alpha_B = 10^\circ$  a poloměrem  $r = 0,7$

Čím větší je počet stupňů  $n$ , tím větší změny mohou v zesílení nastat. Proto se u vícestupňových zesilovačů požadují pro bezpečnostní úhel  $\alpha_B$  a poloměr  $r$  podmínky:  $\alpha_B \geq n \cdot 10^\circ$ ,  $r = 0,7^n$ .

Jednotkové kružnici, která je geometrickým místem konců vektorů  $(\beta \cdot A) = 1$  odpovídá v logaritmických souřadnicích osa 0 dB. Zesilovač je stabilní, protíná-li charakteristika otevřené smyčky osu 0 dB při fázovém úhlu menším než  $180^\circ$ .

## Vliv zpětných vazeb na přenosové vlastnosti zesilovače

1) Vliv na napěťové zesílení:

Napěťové zesílení je dáno vztahem  $A_{\sigma} = \frac{A_U}{N}$ . Pro  $N > 1$  je  $|A_{\sigma}'| < |A_{\sigma}|$ , při  $0 < N < 1$  je  $|A_{\sigma}'| > |A_{\sigma}|$ . Záporná zpětná vazba tudíž napěťové zesílení zmenšuje, kladná zpětná vazba napěťové zesílení zvětšuje.

2) Vliv na výstupní rušivá napětí:

Předpokládejme, že na výstupu se objeví napětí  $U_2 = AU_1 + U_r + U_h$ , kde  $U_r$  je rušivé napětí na výstupu zesilovače způsobené nedostatečnou filtrací,  $U_h$  je rušivé napětí na výstupu způsobené vlivem vyšších harmonických signálů (nelineárním zkreslením budícího signálu).

Napětí na vstupu je dáno součtem vnějšího budícího signálu  $U_s$  a zpětnovazebního signálu  $U_{\beta} = \beta U_2$ . Dosazením do výrazu pro výstupní napětí

$$U_2 = A(U_s + \beta U_2) + U_r + U_h$$

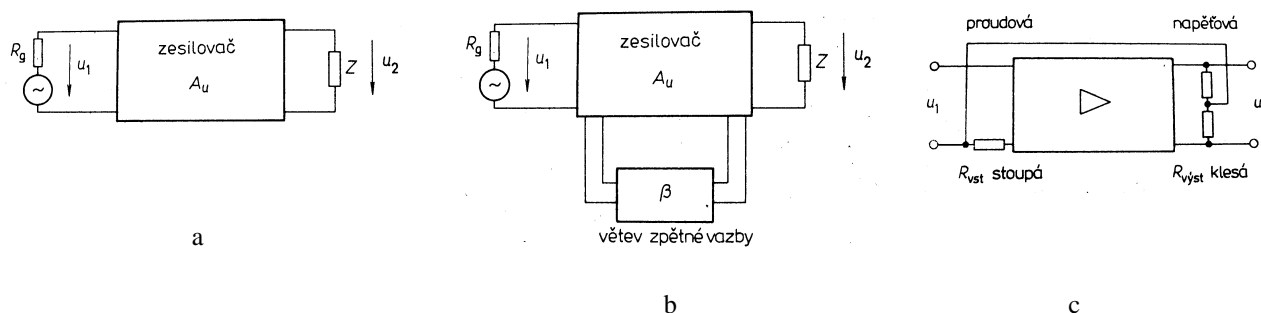
$$U_2(1 - \beta \cdot A) = AU_s + U_r + U_h$$

$$U_2 = \frac{A}{1 - \beta \cdot A} U_s + \frac{U_r}{1 - \beta \cdot A} + \frac{U_h}{1 - \beta \cdot A}$$

První člen rovnice představuje zesílení zesilovače se zpětnou vazbou pro užitečný signál. Druhý a třetí člen představuje příspěvek od rušivých signálů. Obě složky jsou zmenšeny vratným podílem  $N = 1 - \beta A$ .

Záporná zpětná vazba potlačuje rušivé složky signálu, které mají původ uvnitř zesilovače, kladná zpětná vazba je zdůrazňuje.

### 3) Vliv zpětné vazby na frekvenční pásmo zesilovače:



a ... zesilovač bez zpětné vazby,

b,c ... zesilovač se zpětnou vazbou

Z grafu je zřejmé, že po zavedení záporné zpětné vazby, která zmenší zesílení zesilovače se dolní mezní kmitočet zmenší a horní mezní kmitočet vzroste. Při kladné zpětné vazbě je vliv opačný. Matematicky je vliv záporné zpětné vazby vyjádřen

$$\omega_d' = \frac{\omega_d}{N} \quad \text{a} \quad \omega_k' = \omega_k \cdot N$$

### 4) Vliv na nelineární zkreslen:.

Záporná zpětná vazba způsobí linearizaci převodních charakteristik, což způsobí i pokles amplitud vyšších harmonických a tím i zmenšení činitele harmonického zkreslení.

$$\sigma' = \frac{\sigma}{N}$$

### 5) Vliv na vstupní a výstupní impedanci:

Zde musíme rozeznávat paralelní (napěťovou) nebo sériovou (proudovou) zpětnou vazbu.

Vliv zpětné vazby na impedanci lze určit podle tzv. Bodeova vzorce

$$Z' = Z \frac{1 - \beta \cdot A(0)}{1 - \beta \cdot A(\infty)}$$

Zpětnou vazbou se změní impedance z hodnoty  $Z$  na  $Z'$ , přičemž rozhodující vliv má velikost vratného poměru zpětné vazby  $\beta A$ .

Pro případ, že svorky, mezi nimiž se impedance určuje jsou spojeny nakrátko je  $\beta A(0)$ . Jsou-li svorky, mezi nimiž se impedance určuje rozpojeny, je  $\beta A(\infty)$ .

$\beta A(0) = \beta A$ , jestliže se spojením uvažované dvojice svorek nakrátko zpětnovazební smyčka neovlivní

$\beta A = 0$ , jestliže spojení uvažované dvojice nakrátko způsobí zánik zpětné vazby.

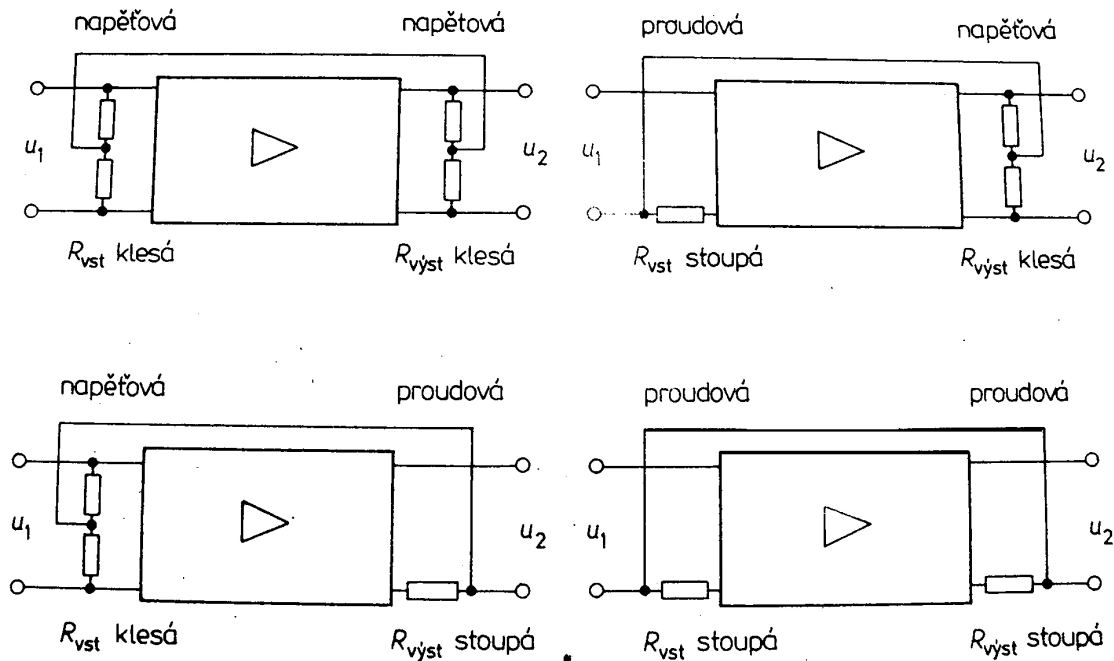
$\beta A(\infty) = \beta A$ , jestliže rozpojením obvodu mezi uvažovanou dvojicí svorek (t.j. zařazení nekonečně velké impedance) se zpětná vazba neovlivní

$\beta A(\infty) = 0$ , jestliže rozpojením obvodu mezi uvažovanou dvojicí svorek zpětná vazba zanikne.

Pro napěťovou zpětnou vazbu platí  $\beta A(0) = 0$ ,  $\beta A(\infty) = \beta A$ .

Pro proudovou zpětnou vazbu platí  $\beta A(0) = \beta A$ ,  $\beta A(\infty) = 0$ .

Pro výstupní impedanci:



### Základní druhy záporných zpětných vazeb

při napěťové zpětné vazbě je

$$Z'_{vyst} = \frac{Z_{vyst}}{1 - \beta \cdot A} = \frac{Z_{vyst}}{N}$$

při proudové zpětné vazbě je

$$Z'_{vyst} = Z_{vyst} \cdot (1 - \beta \cdot A) = Z_{vyst} \cdot N$$

Máme-li tedy zesilovač s paralelní (napěťovou) zápornou zpětnou vazbou na výstupu a sériovou vazbou na vstupu, bude mít zesilovač malý výstupní odpor a velký vstupní odpor, což je v praxi nejžádanější případ.

Jinak můžeme říci, že zesilovač s paralelní zpětnou vazbou na výstupu se chová jako zdroj konstantního napětí. Klesne-li zátěž, vzroste výstupní proud, tím klesne výstupní napětí a i část  $\beta U_2$ , kterou přivádíme zpět na vstup zesilovače. Tím vzroste napětí  $U_1$  na vstupu, což vede k zvětšení výstupního napětí a tím ke kompenzaci poklesu napětí  $U_2$ , který tento regulační proces vyvolal.

Zesilovač se sériovou vazbou na výstupu se chová jako zdroj konstantního proudu. Vzroste-li výstupní proud tím, že poklesne zátěž, vzroste i část napětí  $\beta U_2$ , tím se zmenší napětí  $U_1$  při konstantním napětí  $U_s$  a poklesne i výstupní proud  $I_2$ . Zesilovač se snaží udržet konstantní výstupní proud.

Při sériové zpětné vazbě na zesilovače je  $\beta A(0)=\beta A$  a  $\beta A(\infty)=0$ , takže je mezi svorkami 1 - 1' :

$$Z'_{vst} = Z_{vst}(1 - \beta \cdot A) = Z_{vst} \cdot N$$

a pro paralelní zpětnou vazbu na vstupu je  $\beta A(0) = 0$  a  $\beta A(\infty) = \beta A$ . Potom je vstupní impedance

$$Z'_{vst} = \frac{Z_{vst}}{1 - \beta \cdot A} = \frac{Z_{vst}}{N}$$

Často se používá smíšená zpětná vazba, t.j. současně působí napěťová i proudová zpětná vazba. Je-li  $A \gg 1$  lze vzorec pro vratný podíl zjednodušit na tvar

$$A' = \frac{A}{1 - \beta \cdot A} \approx -\frac{1}{\beta}$$

Zesílení takového zesilovače potom závisí pouze na činiteli zpětné vazby a ne na nestabilních prvcích vlastního zesilovače a tyto zesilovače jsou vhodné pro měřicí a jiné náročné účely.

Zdroj: <http://moryst.sweb.cz/elt2/stranky1/elt023.htm>