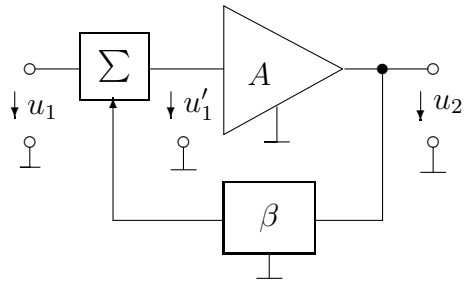


Zpětnovazební soustavy

Princip ZV a její klasifikace



$$u_2 = Au_1, \quad u'_1 = u_1 + \beta u_2 \Rightarrow$$

$$\Rightarrow u_2 = A(u_1 + \beta u_2) = \frac{A}{1 - \beta A} u_1 = A' u_1$$

Obrázek 1: Princip zapojení systému se ZV

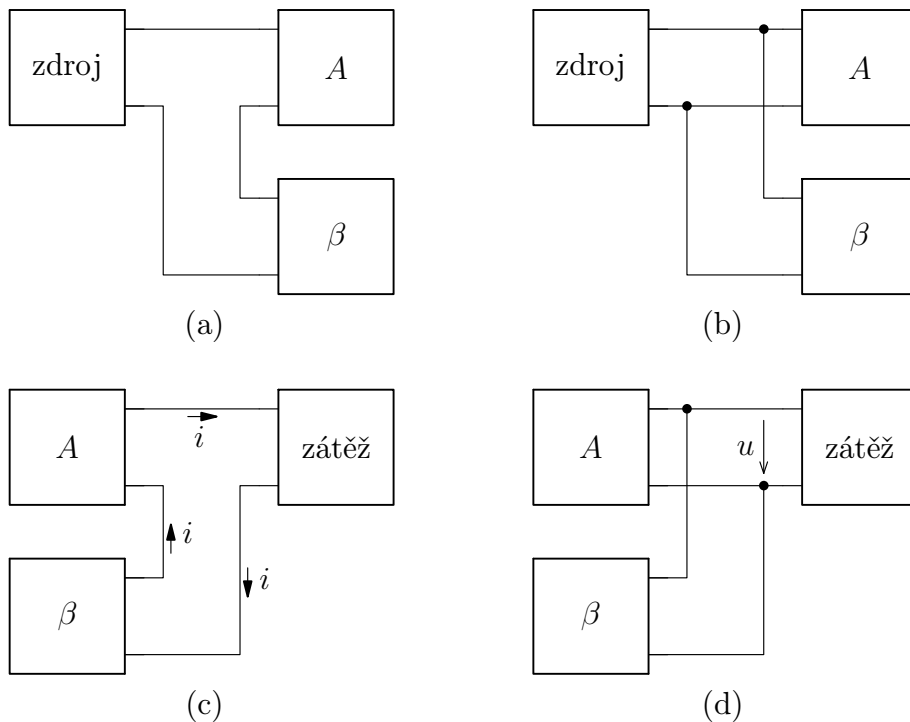
kde β je přenos zpětnovazební větve, tzv. *činitel ZV*,

A_u je přenos zesilovací větve (aktivního prvku) resp. *zesílení bez ZV*.

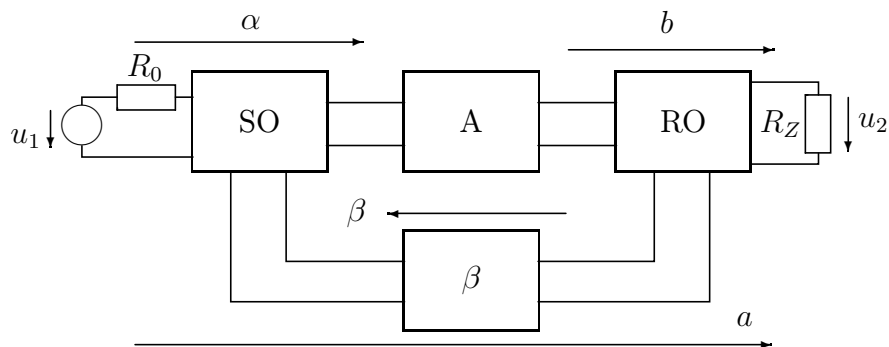
A'_u je přenos ZV soustavy

βA je přenos otevřené ZV smyčky

F je tzv. vratný rozdíl



Obrázek 2: Rozdělení ZV podle zapojení slučovacího obvodu – (a) sériová, (b) paralelní a podle zapojení rozdělovacího obvodu – (c) proudová a (d) napěťová ZV.



Obrázek 3: Obecné zapojení systému se ZV

Vliv ZV na přenos soustavy

$$A'_u = a + \frac{\alpha b A}{1 - \beta A} = a + \frac{\alpha b A}{F} = \left(\frac{G_0}{\beta A} + G_\infty \right) \frac{\beta A}{F} \quad (1)$$

kde G_0 je přenos soustavy pro $A = 0$ ($a = G_0$)

G_∞ je přenos soustavy pro $A = \infty$

Ve většině případů je přenos $b \doteq 1$ a $a \doteq 0$. Potom za předpokladu čistě reálného součinu βA (odporové sítě), můžeme rozdělit ZV podle velikosti vratného rozdílu takto:

1. $\beta A < 0$ ($F > 1$) $\Rightarrow |A'_u| < |A_u| \dots$ ZZV
2. $\beta A = 0$ ($F = 1$) $\Rightarrow |A'_u| = |A_u| \dots$ obvod bez vazby
3. $0 < \beta A < 1$ ($1 > F > 0$) $\Rightarrow |A'_u| > |A_u| \dots$ KZV, obvod je stabilní
4. $\beta A = 1$ ($F = 0$) $\Rightarrow |A'_u| \rightarrow \infty \dots$ KZV, obvod kmitá (využití v oscilátorech)
5. $\beta A > 1$ ($F < 0$) $\Rightarrow A'_u$ obrátilo fázi a jeho modul může být větší i menší než $|A_u|$ (využití v oscilátorech). Tento stav *nelze v elektronických obvodech realizovat*, protože při $U_N = 0$, resp. konstanta je $A_u = 0$, resp. konstanta. Při zapnutí přístroje narůstá zesílení až do stavu $\beta A = 0$, kdy se obvod rozkmitá a amplitudy kmitů narostou tak, že se obvod bude chovat nelineárně.

Toto rozdělení platí i pro ss. zesilovače až do kmitočtu $0.1f_h$ (horního mezího) a pro st. zesilovače uvnitř SKP.

Vliv ZV na změny parametrů

Obecně lze vyšetřovat vliv ZV na změny všech typů parametrů. Pro názornost ukažme pouze vliv ZV na změny, resp. stabilitu zesílení pro malé změny zesílení (\rightarrow derivace).

Uvažujme poměrnou (relativní) změnu zesílení $S_A = \frac{dA}{A}$. Potom pro $\alpha b = 1$ platí:

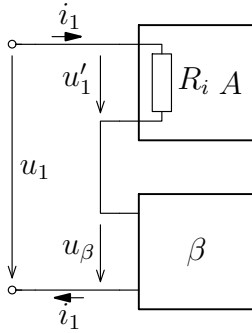
$$S_{A'} = \frac{dA'_u}{A'_u} = \frac{dA'_u}{dA_u} \frac{dA_u}{A'_u} = \left(\frac{1}{1 + \beta A} - \frac{\beta A}{(1 + \beta A)^2} \right) \frac{dA}{A'} = \frac{1}{(1 + \beta A)^2} \frac{dA}{A'} = \frac{dA}{AF} \quad (2)$$

Příklad: Jak velké zesílení A' lze dosáhnout se zesilovačem s $A = 1000$ a relativní změnou zesílení $S_A = 5\%$ po zavedení ZV, když je požadována maximální relativní změna výsledného zapojení $S_{A'} = 0.5\%$.

$$F = \frac{\frac{dA}{A}}{\frac{dA'}{A'}} = \frac{5}{0.5} = 10 \Rightarrow A' = 100.$$

Vliv ZV na vstupní a výstupní impedanci

Tento vliv je dán jednoznačně topologií zpětnovazební soustavy. Z_{vst} ovlivňuje uspořádání vstupní části soustavy, naopak Z_{vst} ovlivňuje uspořádání výstupní části soustavy. Odvození ukážeme pro sériovou ZV:



$$\begin{aligned} u'_1 &= u_1 + u_\beta, & i_1 &= \frac{u'_1}{R_i} \\ u'_1 &= \frac{u_2}{A}, & u_\beta &= \beta u_2 \\ Z'_{vst} &= \frac{u_1}{i_1} = \frac{(u'_1 - u_\beta)R_i}{u'_1} = \frac{\left(\frac{u_2}{A} - \beta u_2\right)R_i}{\frac{u_2}{A}} = R_i F \end{aligned}$$

Obdobně lze dokázat ostatní případy. Výsledky v následující tabulce udávají změny pro všechny „konfigurace“ a jsou odvozeny pro konečné hodnoty impedance napájecího zdroje a zatěžovací impedance.

$$\begin{aligned} \text{sériová vazba:} & \quad Z'_{vst} = Z_{vst}F + Z_0(F - 1) \\ \text{paralelní vazba:} & \quad Y'_{vst} = Y_{vst}F + Y_0(F - 1) \\ \text{napěťová vazba:} & \quad Y'_{vst} = Y_{vst}F + Y_z(F - 1) \\ \text{proudová vazba:} & \quad Z'_{vst} = Z_{vst}F + Z_z(F - 1) \end{aligned}$$

Vliv ZV na kmitočtové vlastnosti soustavy

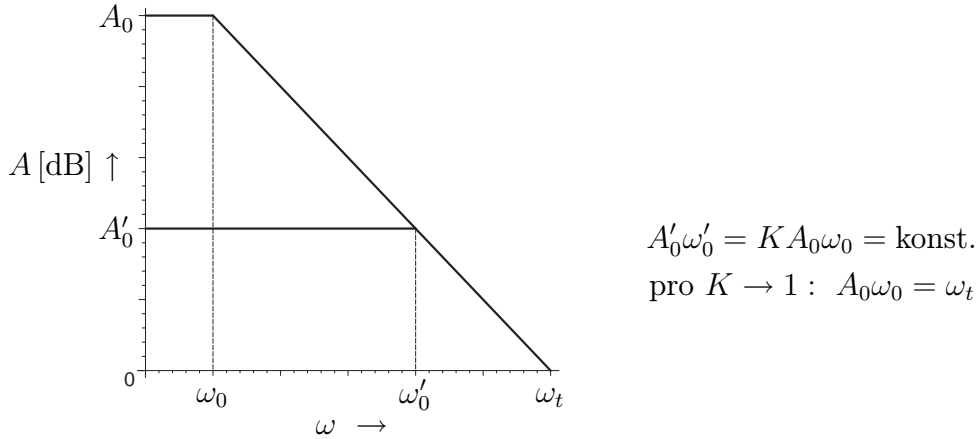
Pro jednoduchost nejprve předpokládejme poze jeden pól zesílení A .

$$\begin{aligned} A(p) &= A_0 \frac{\omega_0}{p + \omega_0}, \text{ potom} \\ A'(p) &= \frac{KA(p)}{1 - \beta A(p)} = \frac{KA_0\omega_0}{p + \omega_0 - \beta A_0\omega_0}, \text{ kde } K = \alpha b \end{aligned}$$

výraz rozšíříme a po úpravě dostaneme:

$$A'(p) = \frac{1 - \beta A_0}{1 - \beta A_0} \frac{K A_0 \omega_0}{p + \omega_0 - \beta A_0 \omega_0} = \frac{K A_0}{1 - \beta A_0} \frac{\omega_0(1 - \beta A_0)}{p + \omega_0(1 - \beta A_0)} = A'_0 \frac{\omega'_0}{p + \omega'_0}$$

$$A'_0 = \frac{K A_0}{1 - \beta A_0} = \frac{K A_0}{F}; \quad \omega'_0 = \omega_0(1 - \beta A_0) = \omega_0 F$$



Obrázek 4: Vliv ZV na kmitočtovou charakteristiku zesilovače.

Pro kmitočtové závislosti vyššího řádu je pro $n = 2$ nutno provést rozbor kořenů (pólů). Může se jednat o komplexní i reálné kořeny a z toho je pak nutno vycházet při stanovení vlivu ZV. Pro $n > 2$ je vždy nutno provést kontrolu stability soustavy.

Dále rozebrat situaci pro pransimpedanční zesilovač – proudovou ZV!

Vliv ZV šumové vlastnosti

Výstupní napětí zesilovače bez ZV na obrázku 5 (a) se skládá jednak ze složky odpovídající budícímu signálu u_1 , jednak ze složky odpovídající šumovému (rušivému) napětí zesilovače u_r na jeho vstupu. Pro výstupní napětí lze psát

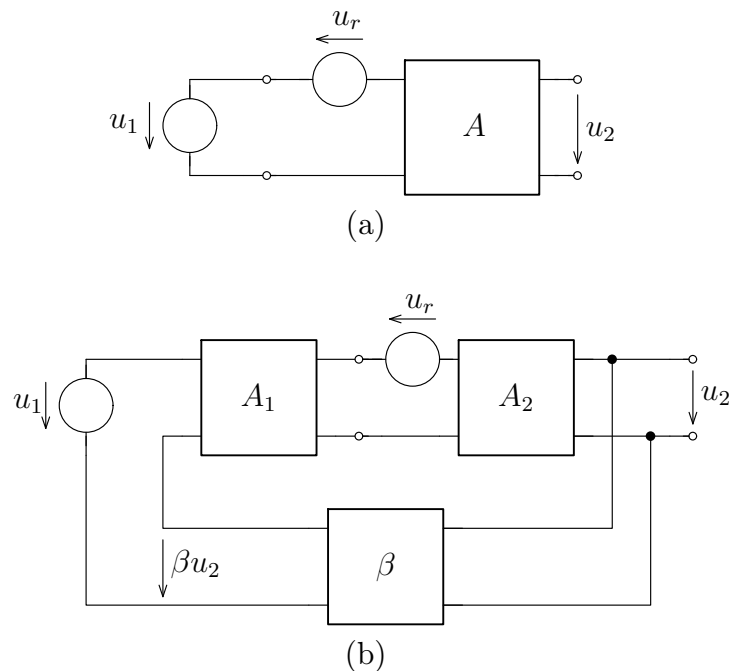
$$u_2 = A u_1 + A u_r. \quad (3)$$

Odstup signál-šum je dán podílem užitečného a rušivého signálu, tj. podílem výše uvedených složek

$$O = \frac{A u_1}{A u_r} = \frac{u_1}{u_r}. \quad (4)$$

Takový zesilovač (s danou úrovní rušivého signálu, tj. s definovaným odstupem signál-šum) zapojme do obvodu zpětné vazby s předzesilovačem A_1 tak, jak udává obrázek 5 (b). Pro určení výstupního napětí u_2 lze použít metodu superpozice.

$$u_2 = u_1 \frac{A_1 A_2}{1 + A_1 A_2 \beta} + u_r \frac{A_2}{1 + A_1 A_2 \beta} \quad (5)$$



Obrázek 5: Zesilovač se zdrojem rušivého (šumového) signálu, reprezentujícím vlastní šum zesilovače(a) a jeho začlenění do zpětnovazební struktury (b).

Pro odstup signál-šum celkového zapojení se ZV pak evidentně platí:

$$O = \frac{u_1}{u_r} A_2, \quad (6)$$

tj. odstup signál-šum původního zesilovače se zvětšil A_1 -krát, kde A_1 je zesílení předzesilovače. Z tohoto důvodu se v kaskádní struktuře zesilovače se zavedenou ZV snažíme zesílení soustředit do prvních stupňů. Šum následujících stupňů se pak v celkovém odstupu s/š prakticky neuplatní. Na výsledné rušivé složce výstupního signálu se pak podílí zejména šum prvního (prvních) stupňů zesilovače, které se z tohoto důvodu konstruují jako nízkošumové.

Vliv ZV na nelinearitě obvodu

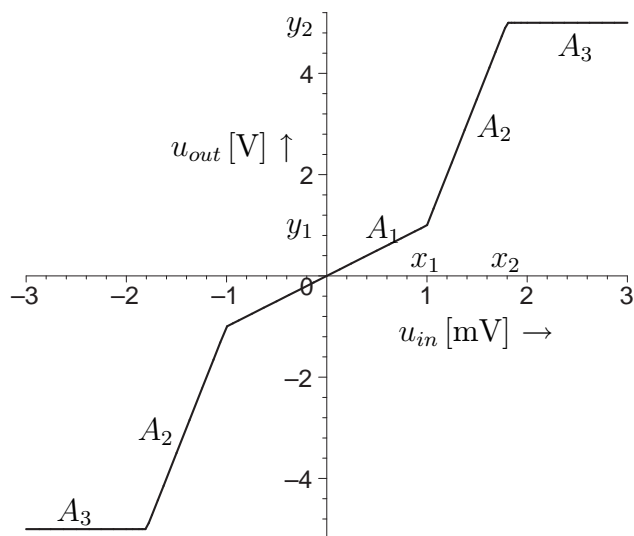
Mějme zesilovač se symetrickou nelineární převodní charakteristikou, uvedenou na obrázku 6.

$A_1 = 1000$, $A_2 = 5000$, $A_3 = 0$, $x_1 = 1$ [mV], $x_2 = 1.8$ [mV], $y_1 = 1$ [V], $y_2 = 5$ [V]

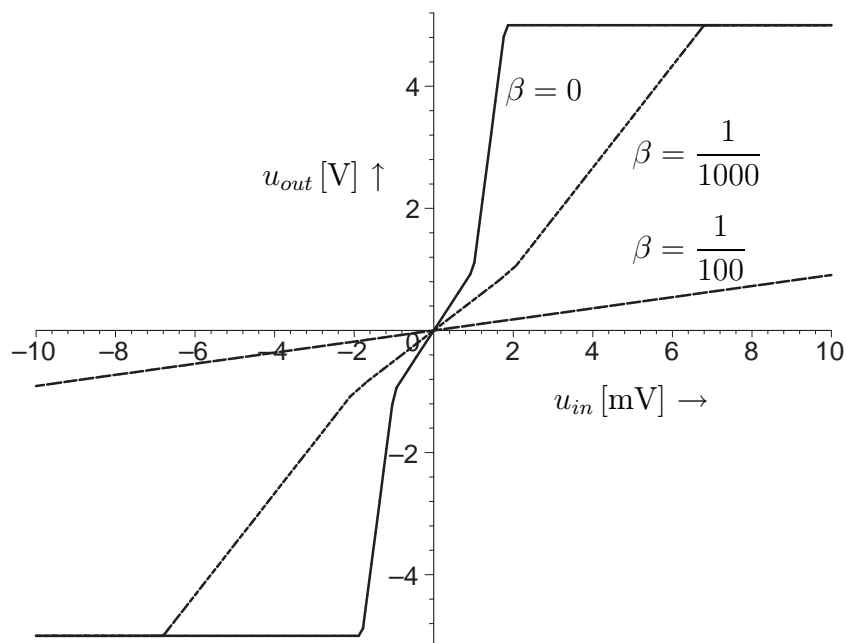
Uvedenému zesilovači zavedme ZZV – v tomto případě napěťovou, sériovou (jedná se o zesilovač napětí) s různým činitelem záporné vazby $\beta = 1/1000$ a $\beta = 1/100$. Výsledné převodní charakteristiky jsou na obrázcích 7 a 8.

Uvažujme dále zápornou ZV, pro kterou platí

$$A' = \frac{A}{1 + \beta A} \quad \text{při } \beta > 0, \quad A > 0. \quad (7)$$

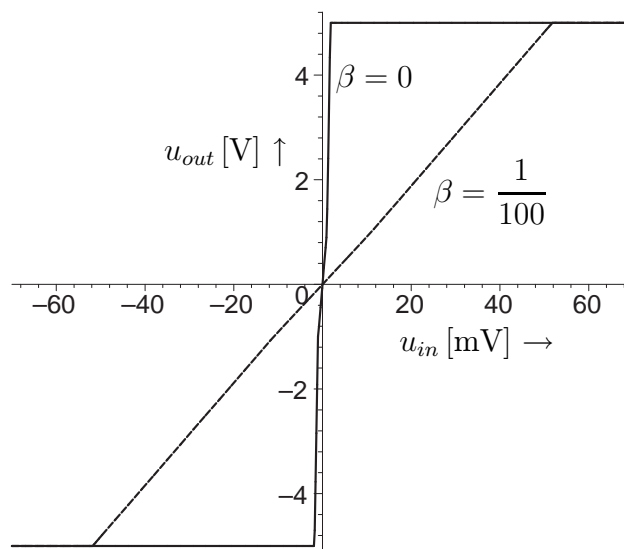


Obrázek 6: Voltampéťová charakteristika zesilovače bez ZV.



Obrázek 7: Převodní charakteristika zesilovačů se zavedenou ZV pro různé činitele β .

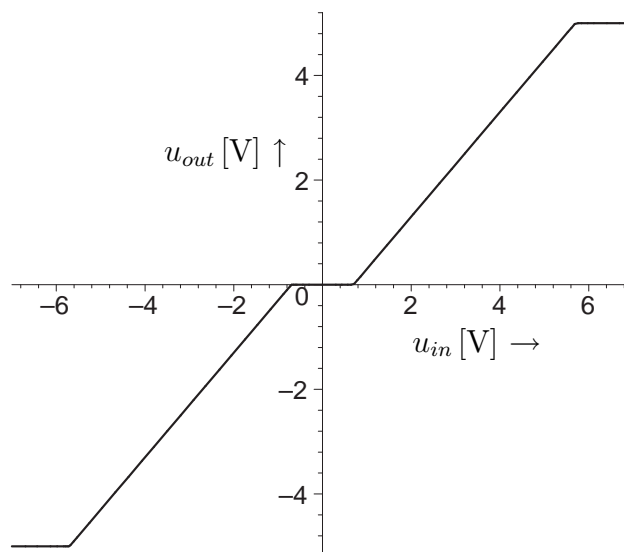
Je nutné si uvědomit, že zlomy charakteristik budou nastávat při stejných hodnotách výstupního napětí, jelikož předpokládáme napěťovou ZZV (výstupní napětí zesilovače je přímo výstupním napětím celé soustavy, což pro vstupní napětí neplatí). Z tohoto důvodu se mění vstupní napětí, při kterém nastává zlom. Následující tabulka 1 ukazuje, jednotlivé parametry (zesílení, a body zlomu) jednak pro zesilovač bez vazby ($\beta = 0$) a jednak pro zesilovač se ZV a výše uvedenými činiteli vazby.



Obrázek 8: Převodní charakteristika zesilovačů pro větší rozsah vstupního napětí.

β	A'_1	A'_2	A'_3	x'_1 [mV]	x'_2 [mV]	y'_1 [V]	y'_2 [V]
0	1000	5000	0	1	1.8	1	5
1/1000	500	833	0	2	6.8	1	5
1/100	91	98	0	11	52	1	5

Tabulka 1:

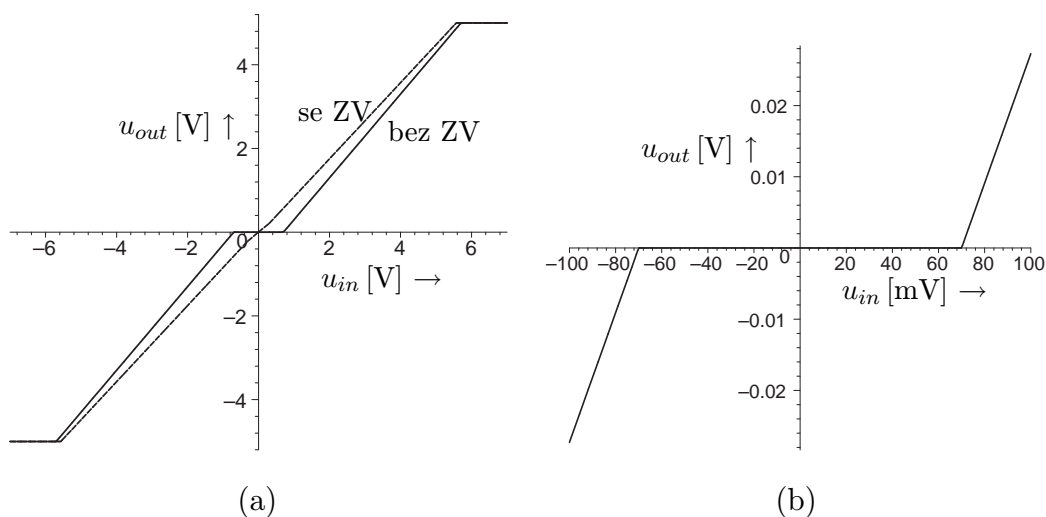


Obrázek 9: Převodní charakteristika zesilovače s přechodovým zkreslením bez ZV.

Pro koncový stupeň platí v „aktivní“ oblasti 1. kvadrantu převodní charakteristiky $u_{out} = u_{in} - 0.7$, tj. pro $u_{in} > 0.7$ V a $u_{out} < 5$ V. Pro koncový stupeň se zesilovačem a zavedenou ZZV platí pro obvodové veličiny

$$u'_{out} = Au_{in} - 0.7, \quad u'_{in} = u_{in} + \beta u'_{out}, \quad (8)$$

$$u'_{out} = \frac{\beta A (u'_{in} - \frac{0.7}{A})}{1 + \beta A} \quad \text{pro } u'_{in} > \frac{0.7}{A} \text{ V a } u'_{out} < 5 \text{ V.} \quad (9)$$



Obrázek 10: Převodní charakteristika zesilovače se zavedenou ZV, (a) celková charakteristika, (b) charakteristika zesilovače se ZV kolem počátku.

Je evidentní, že šířka přechodové oblasti se snížila z 0.7 V na $0.7/A$, tj. v našem případě na 70 mV, jak je ukázáno na obrázku 10 (b). Pokud by

bylo zesílení větší, přechodová oblast by se dále příslušně zmenšila. Silnou zápornou ZV je tedy možné téměř eliminovat přechodové zkreslení.

Pro činitel harmonického zkreslení lze za určitých zjednodušení odvodit vztah:

$$k' = \frac{\sqrt{\frac{U_{22m}^2}{F^2} + \frac{U_{23m}^2}{F^2} + \frac{U_{24m}^2}{F^2} + \dots}}{U_{21m}} = \frac{k}{F}; \quad k = \frac{\sqrt{U_{22m}^2 + U_{23m}^2 + U_{24m}^2 + \dots}}{U_{21m}} \Rightarrow k \text{ malé}$$

příště: **Stabilita zpětnovazebních soustav.**