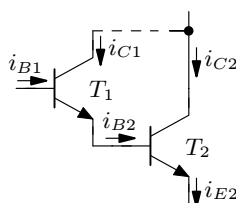


Tento dokument slouží pouze pro studijní účely studentům ČVUT FEL, zejména v předmětu X31ELO. Dokument nemá konečnou podobu a může se časem upravovat a doplňovat. Uživatel může dokument použít pouze pro svoje studijní potřeby. Distribuce a převod do tištěné podoby je povolen pouze se svolením autora!

© Jiří Hospodka

Darlingtonovo zapojení

Darlingtonovo zapojení je zapojení dvou bipolárních tranzistorů, uvedené na obrázku 1. Kolektor prvního tranzistoru (T_1) je možné buď spojit s kolektorem druhého tranzistoru, nebo lépe zapojit přímo na napájecí napětí (zapojení SC), čímž se u tohoto tranzistoru eliminuje Millerův efekt.



Obrázek 1: Darlingtonovo zapojení s tranzistory NPN

Pokud budou tranzistory polarizovány do aktivního režimu, platí pro proudy jednotlivých elektrod následující relace

$$i_{B1}(B_{F1} + 1) = \alpha_{N2}i_{C1} = i_{E1} = i_{B2} = \frac{i_{C2}}{B_{F2}}. \quad (1)$$

Pro celkový proudový zesilovací činitel lze tedy psát

$$B'_F = \frac{i'_C}{i'_B} = \frac{i_{C2}}{i_{B1}} = B_{F2}(B_{F1} + 1) \doteq B_{F2}B_{F1}, \quad (2)$$

z čehož vyplývá první výhodná vlastnost tohoto zapojení – celkový proudový zesilovací činitel je přibližně B_F -násobně větší, oproti jednomu „klasickému“ tranzistoru. Proto se toto zapojení využívá zejména tam, kde požadujeme velké proudové zesílení (koncové stupně), resp. malý vstupní proud. Jinými slovy tam, kde je třeba velký vstupní odpor při zachování velké strmosti g_m (nelze použít tranzistory FET).

V dalších úvahách budeme zjednodušeně považovat proudové zesilovací činitele B_F obou tranzistorů za rovné, tj. i činitele α_N . Stejný předpoklad provedeme i u jejich „střídavých“ ekvivalentů β a α ,

$$\begin{aligned} B_{F1} = B_{F2} = B_F, & \quad \alpha_{N1} = \alpha_{N2} = \alpha_N, \\ \beta_1 = \beta_2 = \beta, & \quad \alpha_1 = \alpha_2 = \alpha. \end{aligned}$$

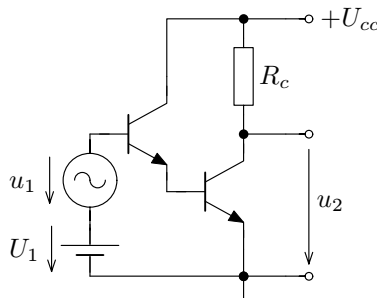
Pro stejnosměrné proudy v pracovním bodě potom platí

$$I_{C1} = \alpha_N I_{E1} = \alpha_N I_{B2} = \frac{\alpha_N I_{C2}}{B_F} \doteq \frac{I_{C2}}{B_F}. \quad (3)$$

Použijme nyní Darlingtonovo zapojení v konstrukci jednoduchého zesilovače. Vydeme z jednostupňových zesilovačů v zapojení se společným emitorem (obrázek ??) a kolektorem (obrázek ??), kde však místo jednoho tranzistoru použijeme nyní Darlingtonovo zapojení tranzistorů dvou.

Zapojení se společným emitorem

Stejnoseměrný bod je nastaven pomocí napěťového zdroje U_1 . Toto nastavení je spíše ilustrativní a pracovní bod není nikterak stabilizován. Pro praktické použití by tedy toto nastavení pracovního bodu bylo nevhodné (nepoužitelné). V našem případě se však budeme zabývat především vlastnostmi zapojení pro střídavé signály a pro tento účel je toto jednoduché nastavení naopak výhodné.



Obrázek 2: Zesilovač v zapojení SE s Darlingtonovým zapojením tranzistorů

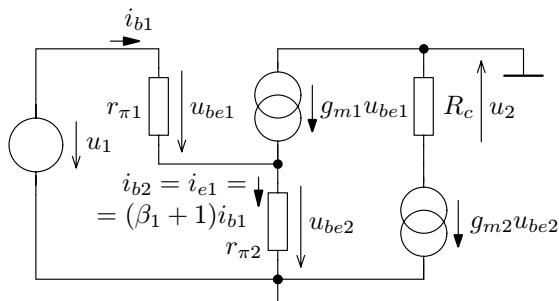
Pro poměr kolektorových proudů platí vztah 3. Budeme-li dále uvažovat rovnost hodnot $B_F \equiv \beta$, platí, vzhledem k (??) a (??), ekvivalentní relace pro strmostmi obou tranzistorů. Pro hodnoty prvků linearizovaného náhradního schématu pro malé změny obvodových veličin v okolí pracovního potom platí

$$g_{m1} = \frac{\alpha g_{m2}}{\beta} \doteq \frac{g_{m2}}{\beta}, \quad (4)$$

$$r_{\pi 1} = \frac{\beta}{g_{m1}} \doteq \frac{\beta^2}{g_{m2}} = \beta r_{\pi 2}, \quad (5)$$

$$r_{e1} = \frac{\alpha}{g_{m1}} = \frac{\beta}{g_{m2}} = r_{\pi 2} = \frac{r_{\pi 1}}{\beta + 1}. \quad (6)$$

Na následujícím obrázku 3 je náhradní linearizované schéma zapojení 2 pro střídavé veličiny, kde jsou tranzistory nahrazeny π -modely.



Obrázek 3: Náhradní schéma zesilovače pro malé změny obvodových veličin

Pro obvodové veličiny evidentně platí

$$u_1 = i_{b1}(r_{\pi1} + (\beta + 1)r_{\pi2}) = i_{b1}2r_{\pi1}, \quad (7)$$

$$u_{be2} = \frac{u_1(\beta + 1)r_{\pi2}}{r_{\pi1} + (\beta + 1)r_{\pi2}} = \frac{u_1}{2}, \quad (8)$$

$$u_2 = -g_{m2}u_{be2}R_c = -\frac{g_{m2}u_1R_c}{2}. \quad (9)$$

Vstupní odpor a napěťové zesílení lze potom vyjádřit z (7) a (9).

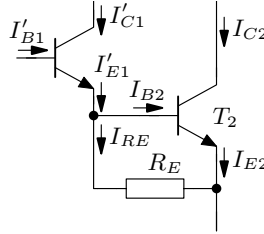
$$R_{vst} = \frac{u_1}{i_{b1}} = 2r_{\pi1} = 2(\beta + 1)r_{\pi2} \quad (10)$$

$$A_u = -\frac{g_{m2}R_c}{2} \quad (11)$$

Oproti „klasickému“ zapojení se společným emitorem s jedním tranzistorem je napěťové zesílení zesilovače s Darlingtonovým zapojením poloviční, při stejném nastavení pracovního bodu ($I_C = I_{C2}$ – kolektorový proud tranzistoru T_2 je shodný s kolektorovým proudem tranzistoru jednostupňového zesilovače). *Vstupní odpor je však 2 β -násobný ($r_{\pi1} \doteq 2\beta r_{\pi2}$)!* Toto zapojení se proto používá zejména tam, kde je nutný vysoký vstupní odpor.

Pokusme se nyní zvýšit zesílení celkového zapojení, při zachování vysokého vstupního odporu. Zapojíme mezi emitory obou tranzistorů rezistor R_E . Tím zvýšíme kolektorový proud prvního tranzistoru, tj. jeho strmost g_{m2} a zároveň snížíme jeho vsrupní odpor $r_{\pi1}$, na kterém se nyní sníží úbytek napětí. Tím se zvýší napětí u_{be2} , tj. zesílení celého zapojení. Dokažme nyní tuto úvahu pomocí analýzy tohoto zapojení.

Na následujícím obrázku jsou ilustrovány stejnosměrné poměry (proudy) v obvodu se zapojeným rezistorem R_E . Pracovní bod tranzistoru T_2 je nezměněn, změnilo se pouze nastavení tranzistoru T_1 , proto jsou jeho proudy a následně další změněné parametry značeny odlišně – čárkovaně.



Obrázek 4: Darlingtonovo zapojení tranzistorů včetně emitorového odporu R_E

Předpokládejme, že $U_{BE2} = 0.7\text{ V}$. Potom platí

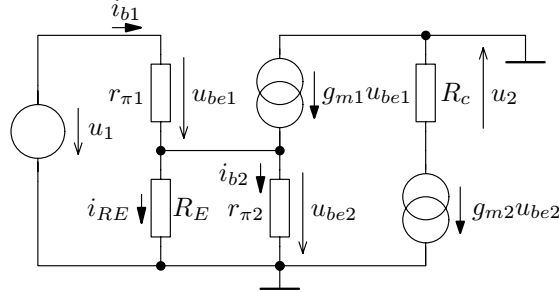
$$I'_{C1} = \alpha_N I'_{E1} = \alpha_N (I_{B2} + I_{RE}) = \alpha_N \left(\frac{I_{C2}}{\beta} + \frac{0.7}{R_E} \right), \quad (12)$$

tj. pro prvky linearizovaného obvodu tranzistoru T_1 platí

$$g'_{m1} \doteq 40I'_{C1} = \alpha_N \left(\frac{g_{m2}}{\beta} + \frac{28}{R_E} \right), \quad (13)$$

$$r'_{\pi1} = \frac{\beta}{g'_{m1}} = \frac{\beta + 1}{\frac{g_{m2}}{\beta} + \frac{28}{R_E}}. \quad (14)$$

Náhradní linearizované schéma pro malé změny obvodových veličin celého zesilovače, včetně rezistoru R_E , je pak uvedeno na následujícím obrázku.



Obrázek 5: Linearizované zapojení zesilovače pro malé změny obvodových veličin

Dosazením výrazu (14) do vztahů (7) a (8), resp. (9), dostaneme pro vstupní odpor a zesílení nové vztahy R'_{vst} a A'_u , přičemž

$$R'_{vst} = \frac{(\beta + 1)\beta R_E (2R_E g_{m2} + 29\beta)}{(R_E g_{m2} + 28\beta)(R_E g_{m2} + \beta)}, \quad (15)$$

$$A'_u = -g_{m2} R_c \frac{R_E g_{m2} + 28\beta}{2R_E g_{m2} + 29\beta}. \quad (16)$$

Pokud zavedeme proměnnou $a = \frac{R_E}{r_{\pi 2}}$, lze tyto vztahy dále upravit tak, aby vyjadřovaly vztah mezi původními hodnotami R_{vst} , A_u a hodnotami novými R'_{vst} , A'_u .

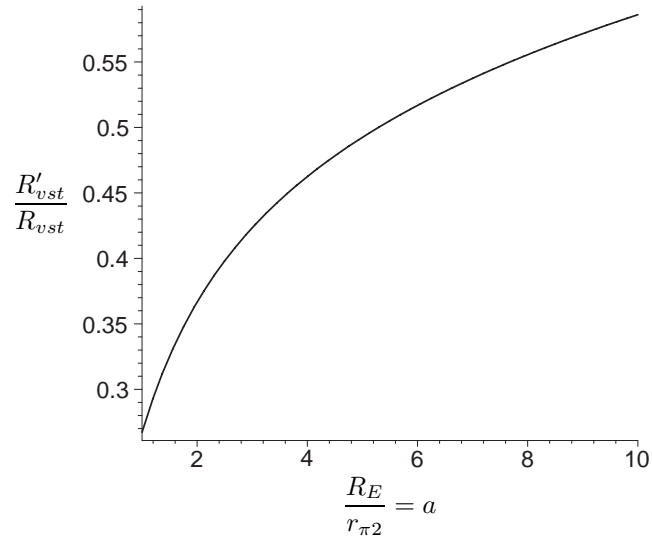
$$R'_{vst} = \frac{(\beta + 1)\beta}{g_{m2}} \frac{a(2a + 29)}{(a + 28)(1 + a)} = \frac{R'_{vst}}{2} \frac{a(2a + 29)}{(a + 28)(1 + a)} \quad (17)$$

$$A'_u = -g_{m2} R_c \frac{a + 28}{2a + 29} = 2A_u \frac{a + 28}{2a + 29} \quad (??) \quad (18)$$

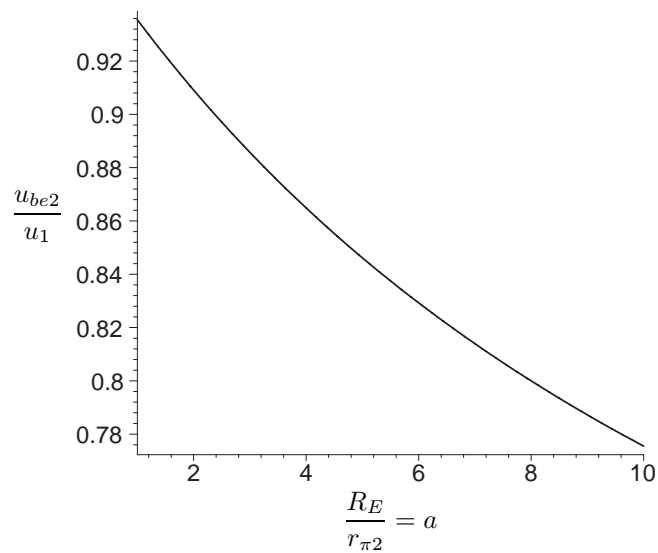
Na následujících grafech jsou pak vyneseny závislosti, vyjádřené vztahy (17) a (??). Na obrázku 6 je vynesena závislost $\frac{R'_{vst}}{R_{vst}}$ na činiteli $a = \frac{R_E}{r_{\pi 2}}$. Na obrázku 7 je vynesena závislost $\frac{u_{be2}}{u_1} = \frac{A'_u}{-g_{m2} R_c} = \frac{a + 28}{2a + 29}$ opět na činiteli a , což je poměr zesílení A'_u ku zesílení „klasického“ jednostupňového zesilovače s jedním tranzistorem v zapojení se společným emitorem, viz. (??).

Například pro $R_E \doteq 5.3r_{\pi 2}$ je vstupní odpor oproti zapojení bez rezistoru R_E právě poloviční $R'_{vst} = r_{\pi 1} = R_{vst}/2$ a napěťové zesílení dosahuje 1.7 násobku zesílení bez zařazeného rezistoru R_E , tj. $u_{be2} \doteq 0.84u_1$. Tato hodnota se již více blíží hodnotě „klasického“ jednostupňového zesilovače v zapojení se společným emitorem (0.84 jeho násobku), přičemž je však hodnota vstupního odporu β násobně větší ($r_{\pi 1} \doteq \beta r_{\pi 2}$)!

Pozn.: Vyráběná dvojice ho má.

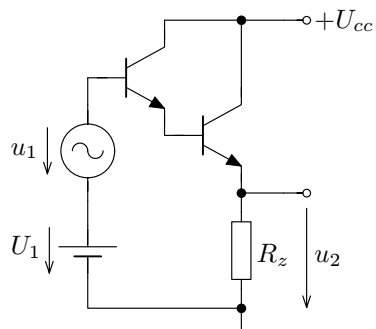


Obrázek 6: Poměr vstupního odporu zesilovače se zařazeným rezistorem R_E a bez něho v závislosti na jeho velikosti, resp. na poměru $\frac{R_E}{r_{\pi 2}}$

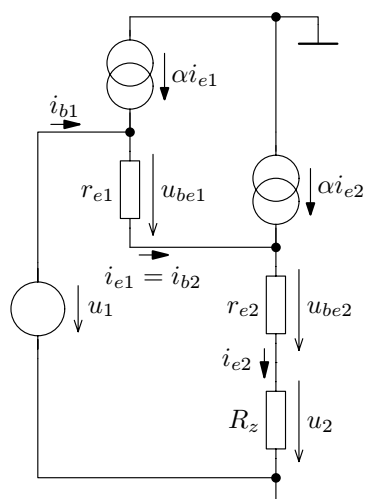


Obrázek 7: Poměr zesílení A'_u , zesilovače 2 se zařazeným rezistorem R_E a zesílení „klasického“ stupně SE s jedním tranzistorem v závislosti na poměru $\frac{R_E}{r_{\pi 2}}$

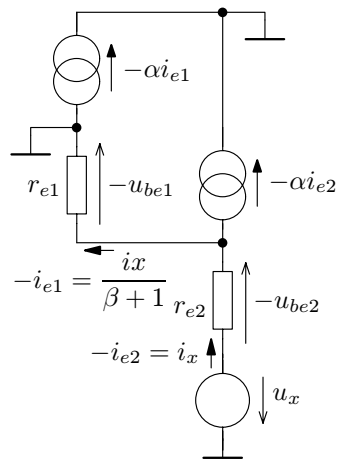
Zapojení se společným kolektorem



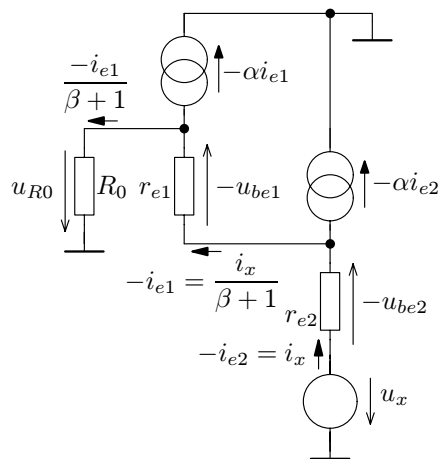
Obrázek 8: Zesilovač v zapojení SC s Darlingtonovým zapojením tranzistorů



Obrázek 9: Linearizované zapojení zesilovače pro malé změny obvodových veličin



Obrázek 10: Linearizované náhradní zapojení zesilovače pro určení výstupního odporu



Obrázek 11: Upravené linearizované náhradní zapojení zesilovače pro určení výstupního odporu