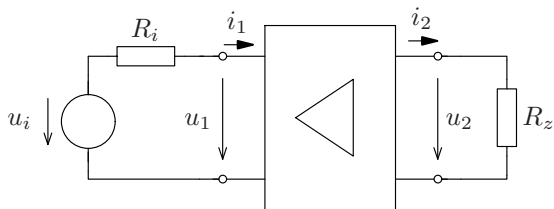


# Kapitola 2

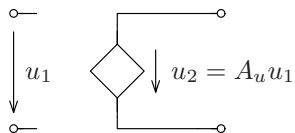
## Jednostupňové zesilovače

Tento dokument slouží POUZE pro studijní účely studentům ČVUT FEL. Uživatel (student) může dokument použít pouze pro svoje studijní potřeby. Distribuce a převod do tištěné podoby je povolen pouze se souhlasem autora!

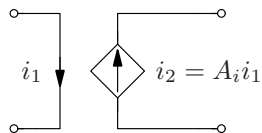
13. října 2009 © Jiří Hospodka



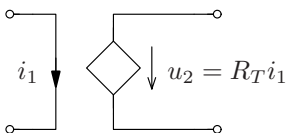
Obrázek 2.1: Základní uspořádání zesilovače



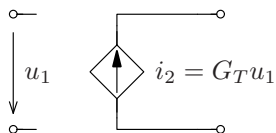
(a)



(b)

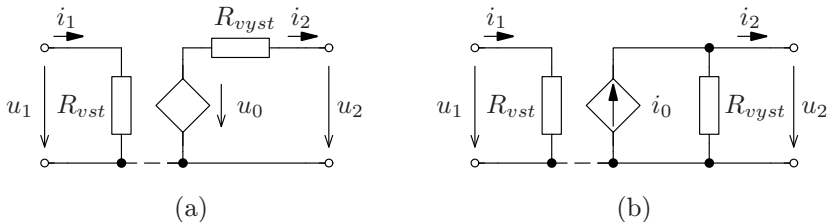


(c)



(d)

Obrázek 2.2: Základní typy ideálních zesilovačů – napěťový (a), proudový (b), transimpedanční (c) a transadmitanční (d)

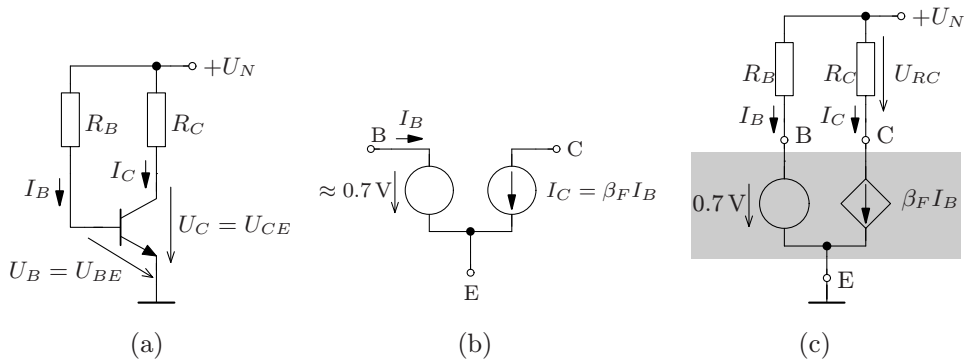


Obrázek 2.3: Odporové modely reálných zesilovačů

Tyto modely charakterizují základní odporové chování reálných zesilovačů, které zanedbávají zpětný přenos, tedy přenos z výstupu zesilovače na jeho vstup.

## 2.1. Nastavení a stabilizace pracovního bodu tranzistorů

### 2.1.1. Nastavení pracovního bodu bipolárních tranzistorů



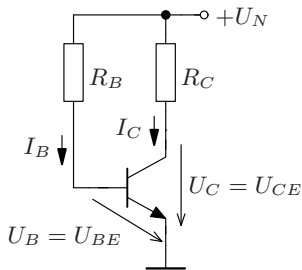
Obrázek 2.4: Jednoduché nastavení pracovního bodu bipolárního tranzistoru (a), lineární náhradní model bipolárního tranzistoru v aktivní oblasti pro jednoduché určení pracovního bodu (b) a náhradní zapojení pro výpočet pracovního bodu (b).

$$I_B = \frac{U_N - 0,7}{R_B}, \quad (2.1)$$

$$I_C = \beta_F I_B = \beta_F \frac{U_N - 0,7}{R_B} \quad (2.2)$$

### Příklad 2.1

Určete proud kolektoru tranzistoru v zapojení 2.4 (a), jestliže  $U_N = 10\text{ V}$ ,  $R_B = 470\text{ k}\Omega$ ,  $\beta_F = 100$  a  $R_C = 2\text{ k}\Omega$ .



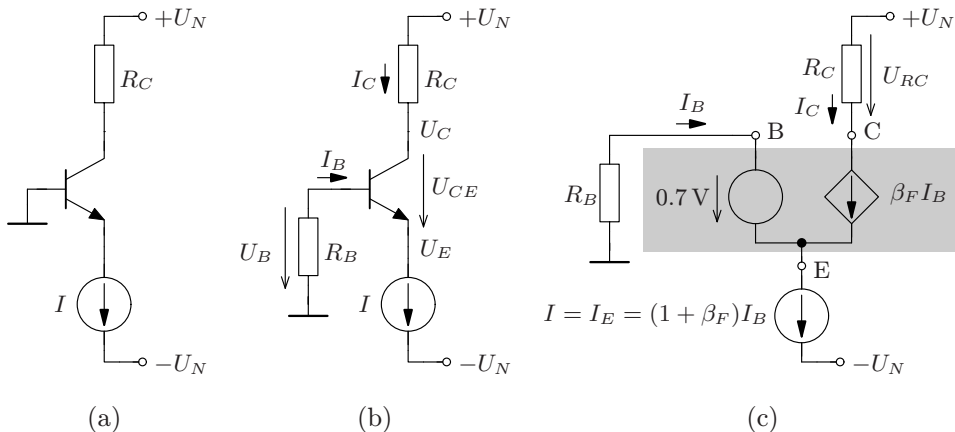
### Řešení

Proud kolektoru určíme ze vztahu 2.2, tj.

$$I_C = \beta_F I_B = \beta_F \frac{U_N - 0,7}{R_B} \doteq 2\text{ mA}.$$

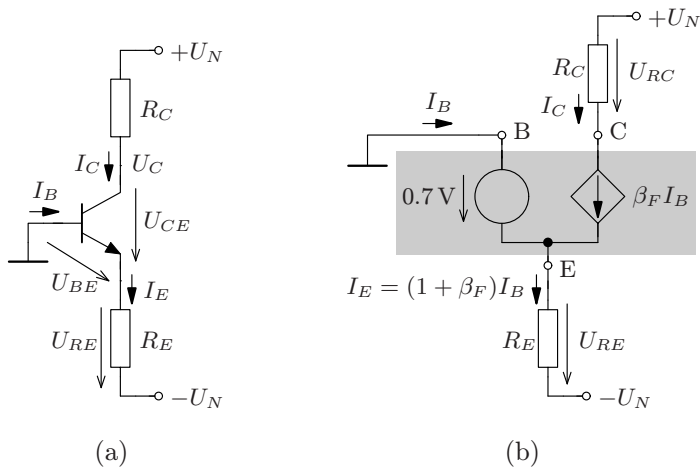
Kontrola aktivního režimu tranzistoru:

$$U_{CB} = U_{CE} - U_{BE} = (U_N - I_C R_C) - 0,7 \doteq 5,3\text{ V}.$$



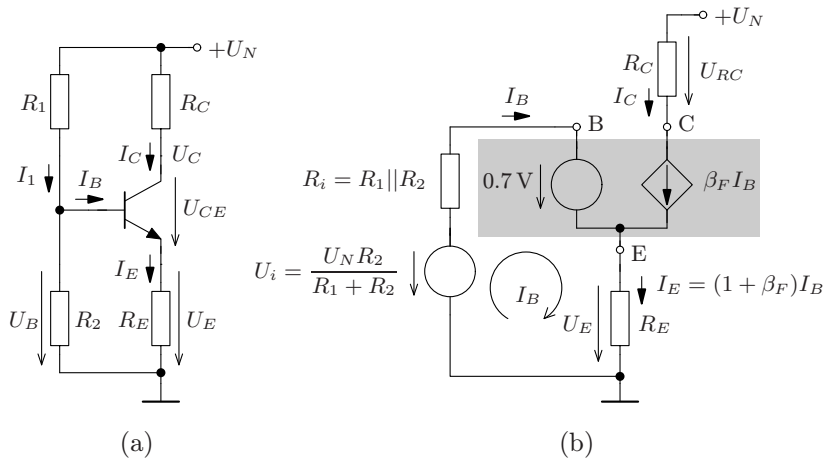
Obrázek 2.5: Nastavení pracovního bodu bipolárního tranzistoru pomocí proudového zdroje v emitorovém obvodu (a), (b) a náhradní zapojení pro výpočet pracovního bodu (c).

$$I_C = \alpha_F I_E = \alpha_F I.$$



$$I_E = \frac{U_N - 0,7}{R_E} = \frac{I_C}{\alpha_F}, \quad (2.3)$$

Obrázek 2.6: Nastavení pracovního bodu bipolárního tranzistoru pomocí emitorového odporu (a) a náhradní zapojení pro výpočet pracovního bodu (b).



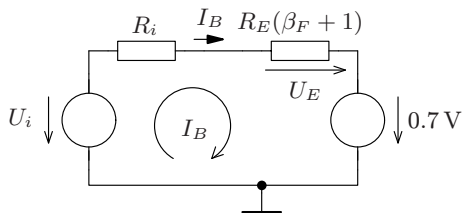
Obrázek 2.7: Můstkové zapojení pro nastavení pracovního bodu bipolárního tranzistoru (a) a náhradní zapojení pro výpočet pracovního bodu (b).

$$U_i - 0,7 = I_B R_i + I_E R_E = I_B R_i + I_B (\beta_F + 1) R_E, \quad (2.4)$$

$$I_B = \frac{U_i - 0,7}{R_i + R_E (\beta_F + 1)}, \quad (2.5)$$



$$U_i - 0,7 = I_B R_i + I_E R_E = I_B R_i + I_B (\beta_F + 1) R_E$$



Obrázek 2.8: Ekvivalentní zapojení smyčky  $I_B$  z obrázku 2.7 (b).

Pokud bude  $R_i \ll R_E(\beta_F + 1)$  (dělič v obvodu báze má relativně malý vnitřní odpor), pak lze vztah (2.5) upravit a po vydělení členem  $\beta + 1$  dostaneme výraz (2.7), který je obdobou vztahu 2.3.

$$I_B = \frac{U_i - 0,7}{R_E(\beta_F + 1)}, \quad (2.6)$$

$$I_E = \frac{U_i - 0,7}{R_E} = \frac{I_C}{\alpha_F}, \quad (2.7)$$

### **Příklad 2.2**

Určete proud kolektoru tranzistoru v zapojení 2.7 (a), jestliže  $U_N = 12\text{ V}$ ,  $R_1 = 330\text{ k}\Omega$ ,  $R_2 = 100\text{ k}\Omega$ ,  $R_C = 6,8\text{ k}\Omega$ ,  $R_E = 1,5\text{ k}\Omega$  a  $\beta_F = 300$ .

### **Řešení**

Pro hodnoty náhradního Theveninova schématu podle obrázku 2.7 (b) pak dostaneme:

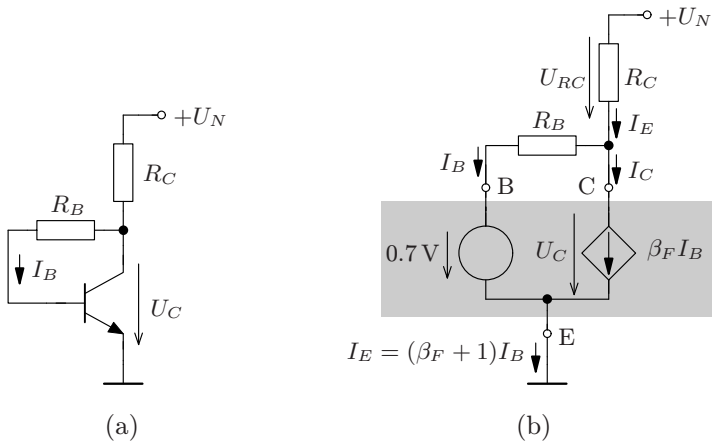
$$U_i = \frac{U_N R_2}{R_1 + R_2} \doteq 2,8\text{ V}, \quad R_i \doteq 77\text{ k}\Omega.$$

Pro proud kolektoru pak ze vztahu 2.5 vyplývá

$$I_C = \frac{\beta_F(U_i - 0,7)}{R_i + R_E(\beta_F + 1)} = \frac{U_i - 0,7}{R_i/\beta_F + R_E/\alpha_F} \doteq 1,2\text{ mA}. \quad (2.8)$$

a pro napětí  $U_{CB}$  platí

$$U_{CB} = U_{CE} - U_{BE} = (U_N - I_C(R_C + R_E)) - 0,7 \doteq 3,2\text{ V}.$$

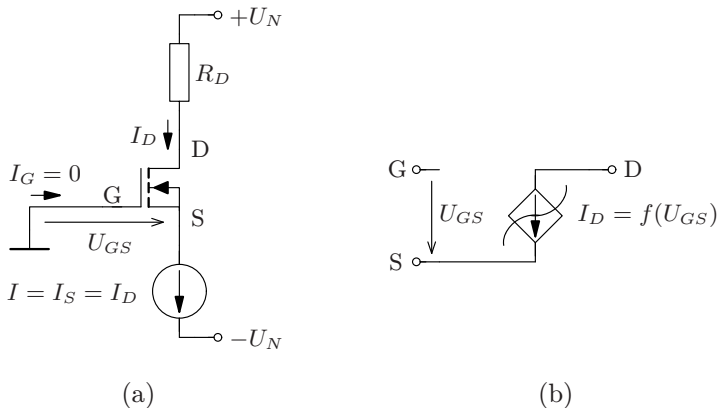


Obrázek 2.9: Nastavení pracovního bodu bipolárního tranzistoru pomocí zpětnovazebního odporu  $R_B$  (a) a náhradní zapojení pro výpočet pracovního bodu (b).

$$U_C = 0,7 + R_B I_B, \quad I_E = (\beta_F + 1) I_B = \frac{U_N - U_C}{R_C}. \quad (2.9)$$

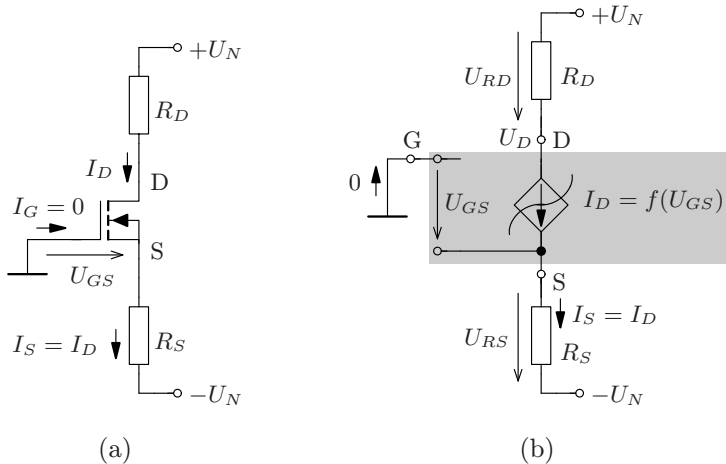
$$I_C = \beta_F I_B = \frac{\beta_F (U_N - 0.7)}{R_B + (\beta_F + 1) R_C}. \quad (2.10)$$

### 2.1.2. Nastavení pracovního bodu unipolárních tranzistorů



Obrázek 2.10: Nastavení pracovního bodu unipolárního tranzistoru pomocí proudového zdroje v obvodu source (a) a nelineární náhradní model unipolárního tranzistoru pro určení pracovního bodu (b).

$$i_D = \frac{1}{2} K_P \frac{W}{L} (u_{GS} - U_{TO})^2 \quad \text{pro} \quad U_{DS} > U_{GS} - U_{TO} \quad (2.11)$$



Obrázek 2.11: Nastavení pracovního bodu unipolárního tranzistoru pomocí odporu v obvodu source (a) a náhradní zapojení pro výpočet pracovního bodu (b).

$$U_{GS} = U_N - R_S I_D, \quad (2.12)$$

$$I_D = \frac{1}{2} K_P \frac{W}{L} (U_N - R_S I_D - U_{TO})^2 \quad \text{pro } U_{DS} > U_{GS} - U_{TO} \quad (2.13)$$

### **Příklad 2.3**

Určete proud kolektoru tranzistoru v zapojení 2.11 (a), jestliže  $U_N = 5\text{ V}$ ,  $R_D = 5\text{ k}\Omega$ ,  $R_S = 4\text{ k}\Omega$ ,  $K_p = 1,6\text{ mA/V}^2$ ,  $W = 160\text{ }\mu\text{m}$ ,  $L = 10\text{ }\mu\text{m}$  a  $U_{TO} = 1,9\text{ V}$ .

### **Řešení**

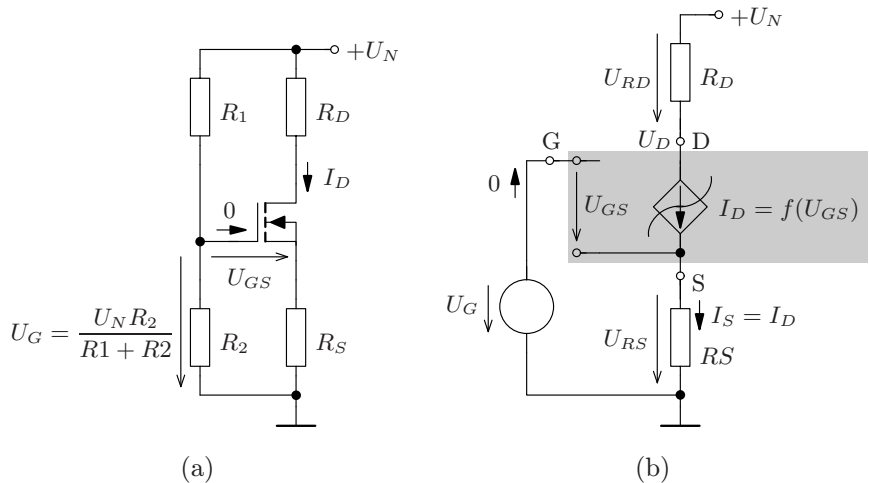
Předpokládejme, že je tranzistor v saturační oblasti. Pak platí rovnice (2.13). Dosazením numerických hodnot a jejím řešením dostaneme pro proud  $I_D$  dvě hodnoty (jedná se o kvadratickou rovnici) a k nim příslušející velikosti napětí  $U_{GS}$ :

$$I_D = \begin{cases} I_{D_1} = 0,716\text{ mA} & \text{a } U_{GS_1} = 2,14\text{ V}, \\ I_{D_2} = 0,84\text{ mA}, & \text{a } U_{GS_2} = 1,64\text{ V}. \end{cases}$$

Je zřejmé, že  $U_{GS_2} < U_{TO} \dots$

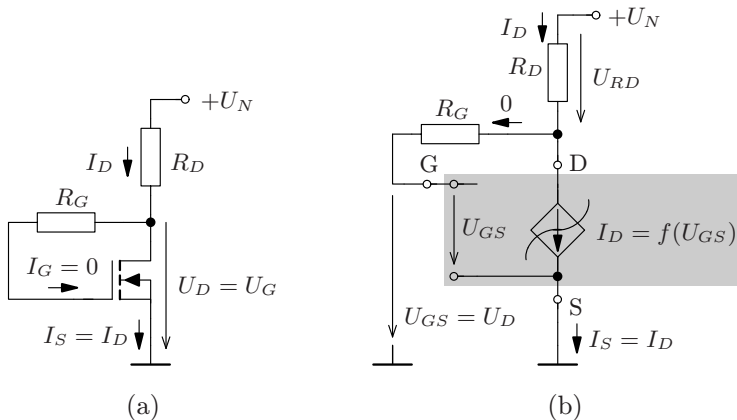
Dále je nutné ověřit předpoklad!

$$U_{GS_1} - U_{TO} = 0,24 < U_{DS} = 2U_N - I_D(R_D + R_S) = 3,56\text{ V}$$



Obrázek 2.12: Můstkové zapojení pro nastavení pracovního bodu unipolárního tranzistoru (a) a náhradní zapojení pro výpočet pracovního bodu (b).

$$U_{GS} = U_G - U_S = U_G - R_S I_D \quad (2.14)$$



Jelikož  $U_{DS} = U_{GS}$  a  $U_{TO} > 0$ , platí  $U_{DS} > U_{GS} - U_{TO}$ . Pokud se tranzistor otevře ( $U_{GS} > U_{TO}$ ), pak platí vztah (2.11). Potom

$$U_{GS} = U_N - R_D I_D, \quad (2.15)$$

$$I_D = \frac{1}{2} K_P \frac{W}{L} (U_N - R_D I_D - U_{TO})^2 \quad (2.16)$$



### **Příklad 2.4**

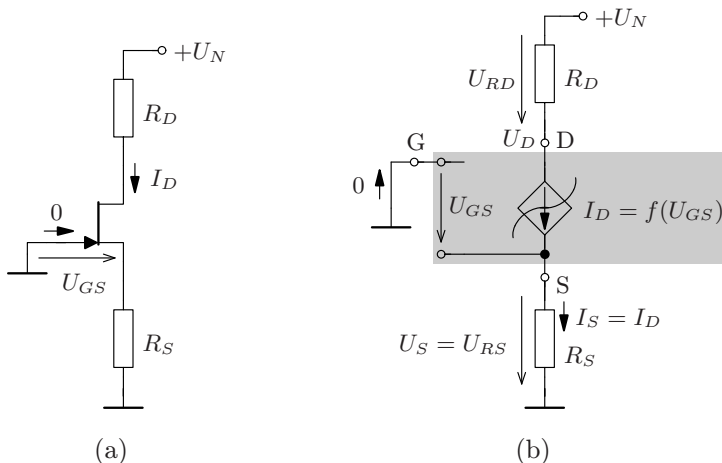
Určete proud kolektoru tranzistoru v zapojení 2.1.2 (a), jestliže  $U_N = 10 \text{ V}$ ,  $R_D = 5 \text{ k}\Omega$ ,  $R_G = 1 \text{ M}\Omega$ ,  $K_p = 1,6 \text{ mA/V}^2$ ,  $W = 160 \text{ }\mu\text{m}$ ,  $L = 10 \text{ }\mu\text{m}$  a  $U_{TO} = 1,9 \text{ V}$ .

### **Řešení**

Vzhledem k tomu, že  $U_N > U_{TO}$  bude tranzistor otevřen a navíc vzhledem k výše uvedenému bude v saturační oblasti. Pak platí rovnice (2.16). Dosazením numerických hodnot a jejím řešením dostaneme pro proud  $I_D$  opět dvě hodnoty a k nim příslušející velikosti napětí  $U_{GS}$ :

$$I_D = \begin{cases} I_{D_1} = 1,55 \text{ mA} & \text{a } U_{GS_1} = 2,25 \text{ V}, \\ I_{D_2} = 1,69 \text{ mA}, & \text{a } U_{GS_2} = 1,54 \text{ V}. \end{cases}$$

Je zřejmé, že  $U_{GS_2} < U_{TO} \dots$  a  $U_{GS_1} - U_{TO} = 0,35 < U_{DS} = 2,25 \text{ V}$



Obrázek 2.13: Můstkové zapojení pro nastavení pracovního bodu unipolárního tranzistoru JFET pomocí odporu v obvodu source (a) a náhradní zapojení pro výpočet pracovního bodu (b).

$$U_{GS} = -U_S = -R_S I_D, \quad (2.17)$$

$$I_D = K_\beta (-R_S I_D - U_{TO})^2 \quad \text{pro} \quad U_{DS} > U_{GS} - U_{TO} \quad (2.18)$$

### Příklad 2.5

Určete proud kolektoru tranzistoru v zapojení 2.13 (a), jestliže  $U_N = 10 \text{ V}$ ,  $R_D = 3 \text{ k}\Omega$ ,  $R_S = 1 \text{ k}\Omega$ ,  $K_\beta = 1,5 \text{ mA/V}^2$ , a  $U_{TO} = -2,3 \text{ V}$ .

### Řešení

Předpokládejme, že je tranzistor v saturační oblasti. Pak platí rovnice (2.18). Dosazením numerických hodnot a jejím řešením dostaneme pro proud  $I_D$  dvě hodnoty a k nim příslušející velikosti napětí  $U_{GS}$ :

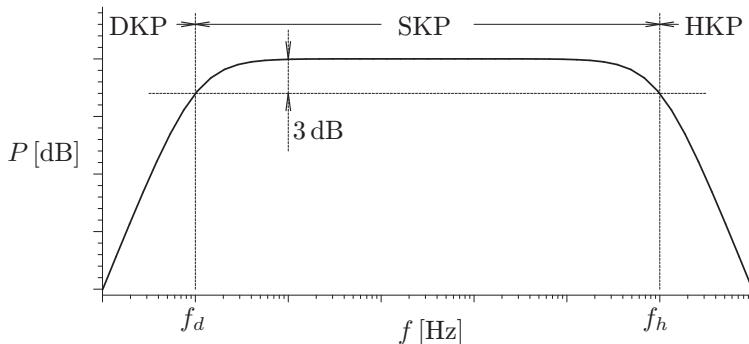
$$I_D = \begin{cases} I_{D_1} \doteq 1,35 \text{ mA} & \text{a } U_{GS_1} \doteq -1,35 \text{ V}, \\ I_{D_2} \doteq 3,9 \text{ mA} & \text{a } U_{GS_2} \doteq -3,9 \text{ V}. \end{cases}$$

Je zřejmé, že  $U_{GS_2} < U_{TO}$ , tj. tranzistor se neotevře, navíc  $I_{D_2} R_D \doteq 12 > U_N$

...

Dále je nutné ověřit předpoklad!

$$U_{GS_1} - U_{TO} \doteq 0,95 < U_{DS} = U_N - I_D(R_D + R_S) \doteq 4,6 \text{ V}$$

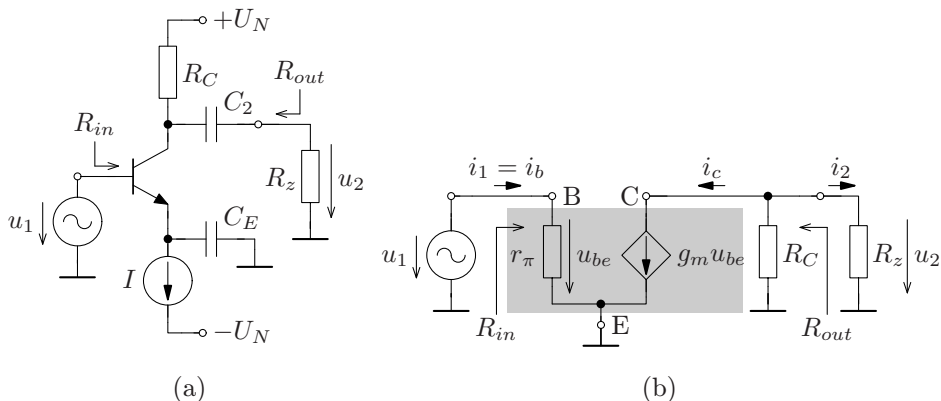


Obrázek 2.14: Typický příklad průběhu modulu přenosu širokopásmového zesilovače s horním i dolním mezním kmitočtem.

Následující podkapitoly prezentují vlastnosti základních zesilovacích stupňů ve středním kmitočtovém pásmu ( $f_d < f < f_h$ ). Lze ukázat, že v SKP se neuplatní parazitní kapacity aktivních prvků (tranzistorů), které lze pak nahradit pouze odporovými modely. Dále lze všechny oddělovací a blokovací kapacity nahradit zkratem, jelikož mají zanedbatelnou impedanci vůči velikostem příslušných odporových složek obvodu (např. vstupnímu odporu). Všechny stejnosměrné napájecí zdroje mají nulovou střídavou složku, proto se pro střídavé veličiny chovají jako zkrat (napěťové zdroje), resp. jako rozpojený obvod (proudové zdroje).

## 2.2. Zesilovače s bipolárními tranzistory

### 2.2.1. Zesilovač se společným emitorem



Obrázek 2.15: Elementární zapojení zesilovače se společným emitorem (a) a jeho náhradní zapojení pro střídavé veličiny ve SKP (b).

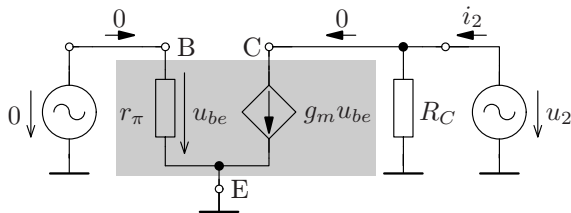
Z náhradního obvodu je evidentní, že  $u_{be} = u_1$ ,  $i_c = g_m u_1$  a  $u_2 = -i_c(R_C || R_z)$ . Napěťové zesílení a vstupní odpor je potom

$$A_u = \frac{u_2}{u_1} = \frac{-g_m u_{be} R'_z}{u_{be}} = -g_m R'_z, \quad \text{kde } R'_z = R_C || R_z \quad (2.19)$$

$$R_{in} = \frac{u_1}{i_1} = r_\pi. \quad (2.20)$$

Proudové zesílení udáváme obvykle pro výstup nakrátko ( $R_z = 0$ ), kdy platí  $i_2 = -i_c$  a proudové zesílení nakrátko lze vyjádřit vztahem

$$A_i = \frac{i_2}{i_1} = \frac{-g_m u_{be}}{\frac{u_{be}}{r_\pi}} = -g_m r_\pi = -\beta, \quad \text{pro } R_z = 0. \quad (2.21)$$

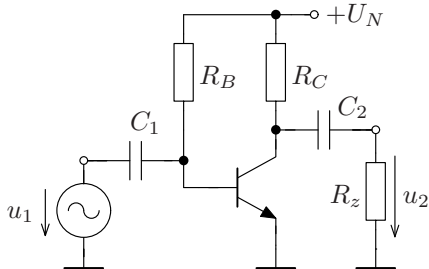


Obrázek 2.16: Náhradní zapojení pro určení výstupního odporu ve SKP obvodu z obrázku 2.15.

$$R_{out} = \frac{u_2}{i_2} = R_C \quad (2.22)$$

### Příklad 2.6

Určete napěťový přenos, vstupní a výstupní odpor zesilovače z obrázku 2.17, jestliže  $U_N = 10\text{ V}$ ,  $R_B = 470\text{ k}\Omega$ ,  $\beta_F = 100$ ,  $R_C = 2\text{ k}\Omega$  a  $R_z = 8\text{ k}\Omega$ .



Obrázek 2.17: Příklad zapojení zesilovače se společným emitorem.

### Řešení

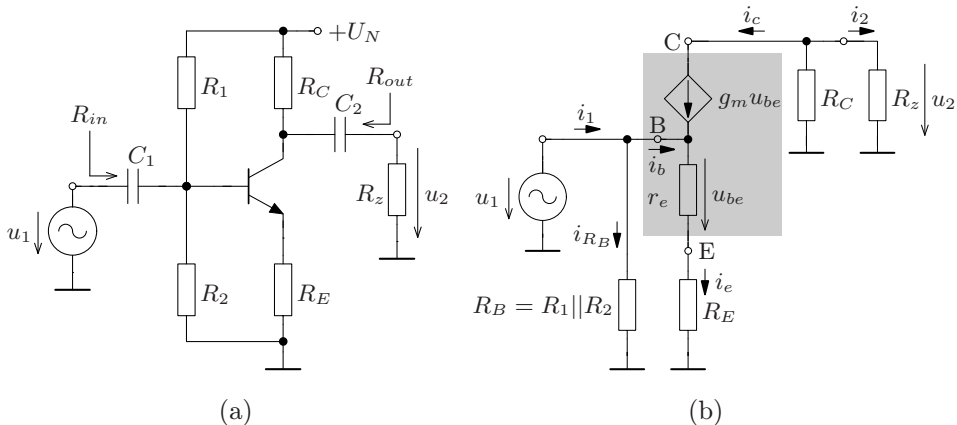
Pracovní bod byl určen v příkladu 2.1 na straně 5, tj.  $I_C = 2\text{ mA}$ . Hodnoty náhradního linearizovaného schématu tranzistoru jsou:  $g_m = 80\text{ mS}$  a  $r_\pi = 1,25\text{ k}\Omega$ .

Náhradní obvod pro střídavé veličiny odpovídá obrázku 2.15 (b) s tím, že ke vstupní svorce je navíc paralelně řazen rezistor  $R_B$ . Pro napěťové zesílení platí vztah (2.19), pro výstupní odpor vztah (2.22) a vstupní odpor je  $R_{in} = r_\pi || R_B$ .

$$A_u = -128, \quad R_{in} \doteq 1,25\text{ k}\Omega, \quad R_{out} = 2\text{ k}\Omega.$$

### Příklad 2.7

Určete napěťový i proudový přenos, vstupní a výstupní odpor zesilovače na obrázku 2.18, jestliže  $U_N = 12\text{ V}$ ,  $R_1 = 330\text{ k}\Omega$ ,  $R_2 = 100\text{ k}\Omega$ ,  $R_C = 6,8\text{ k}\Omega$ ,  $R_E = 1,5\text{ k}\Omega$ ,  $R_z = 13\text{ k}\Omega$  a  $\beta_F = 300$ .



Obrázek 2.18: Zapojení jednotranzistorového zesilovače se společným emitorem, můstkovým nastavením pracovního bodu a neblokovaným emitorovým rezistorem (a) a jeho náhradní zapjení pro střídavé veličiny ve SKP (b).



## Řešení

Pracovní bod byl určen v příkladu 2.2 na straně 10, tj.  $I_C = 1.2 \text{ mA}$ . Hodnoty náhradního linearizovaného schématu tranzistoru jsou  $g_m = 48 \text{ mS}$  a  $r_e \doteq 21 \Omega$ .

Pro výpočet napěťového zesílení, resp. výstupního napětí určíme nejprve řídicí napětí  $u_{be}$  z napěťového děliče  $r_e$ ,  $R_E$ , čímž je dán proud  $i_c = g_m u_{be}$  a tím i výstupní napětí

$$u_{be} = u_1 \frac{r_e}{r_e + R_E}, \quad u_2 = -i_c R'_z = -u_1 \frac{g_m R'_z r_e}{r_e + R_E}, \quad \text{kde } R'_z = R_C || R_z. \quad (2.23)$$

Napěťové zesílení určíme již snadno, přičemž výsledný vztah lze upravit a dále zjednodušit. Jednak je pro dané  $\beta$  činitel  $\alpha \doteq 1$  a v tomto případě lze také zanebat hodnotu náhradního rezistoru  $r_e$  vůči velikosti emitorového rezistoru  $R_E$ .

$$A_u = \frac{u_2}{u_1} = -\frac{g_m R'_z r_e}{r_e + R_E} = -\frac{R'_z \alpha}{r_e + R_E} \doteq -\frac{R'_z}{R_E}, \quad \text{pro } \alpha \rightarrow 1, r_e \ll R_E \quad (2.24)$$

Vstupní odpor určíme z relace budicího napětí  $u_1$  a vstupního proudu  $i_1$ , který je součtem dvou složek

$$i_1 = i_{R_B} + i_b = i_{R_B} + \frac{i_e}{\beta + 1} = \frac{u_1}{R_B} + \frac{u_1}{(\beta + 1)(r_e + R_E)}. \quad (2.25)$$

V našem případě lze uplatnit  $\beta + 1 \doteq \beta$  a dále relaci  $r_e \ll R_E$ . Potom pro vsrupní odpor platí

$$R_{in} = \frac{u_1}{i_1} = R_B \parallel ((\beta + 1)(r_e + R_E)) \doteq R_B \parallel (\beta R_E) \quad \text{pro } r_e \ll R_E. \quad (2.26)$$

**Pozn.:** Podle obrázku 2.18 je vstupní odpor dán paralelní kombinací rezistoru  $R_B$  a sériovou kombinací rezistorů  $r_e$  a  $R_E$ , „přepočítaných“ na vstupní (bázovou) stranu pomocí činitele  $\beta + 1$ , stejně jako v případě určování pracovního bodu, viz obrázek 2.8 na straně 9. Je vhodné si uvědomit relaci  $(\beta + 1)(r_e + R_E) = r_\pi + (\beta + 1)R_E$ .

Proudové zesílení nakrátko (pro  $R_z \rightarrow 0$ ) určíme podle definice z náhradního schématu 2.18 (b).

$$A_i = \frac{i_2}{i_1} = \frac{i_c}{i_{R_B} + i_b} = \frac{\beta}{\frac{i_{R_B}}{i_b} + 1} = \frac{\beta}{\frac{(\beta+1)(r_e+R_E)}{R_B} + 1} \doteq \frac{\beta}{\frac{\beta R_E}{R_B} + 1} \quad \text{pro } r_e \ll R_E, \quad (2.27)$$

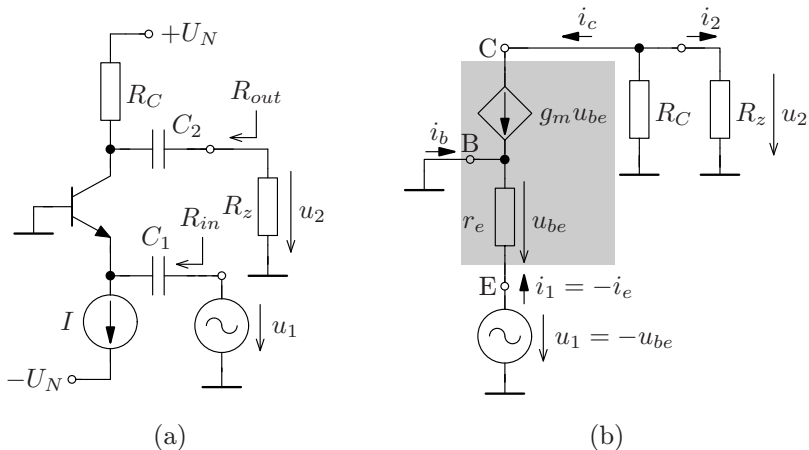
Z čehož je zřejmé, že  $A_i < \beta$  a to díky proudu rezistorem  $R_B$ .

Zbývá určit výstupní odpor, který je v tomto případě dán vztahem (2.22). Numerické hodnoty jednotlivých veličin jsou následující:

$$A_u \doteq -3, \quad R_{in} \doteq 66 \text{ k}\Omega, \quad A_i \doteq 44, \quad R_{out} = 6,8 \text{ k}\Omega.$$

### 2.2.2. Zesilovač se společnou bází

Z náhradního obvodu je evidentní, že napětí  $u_{be} = -u_1$ , proud  $i_c = -g_m u_1$  a potom výstupní napětí  $u_2 = -i_c(R_C \parallel R_z)$ . Napěťové zesílení určíme jako



Obrázek 2.19: Elementární zapojení zesilovače se společnou bází (a) a jeho náhradní zapojení pro střídavé veličiny ve SKP (b).

$$A_u = \frac{u_2}{u_1} = \frac{g_m u_{be} R'_z}{u_{be}} = g_m R'_z, \quad \text{kde } R'_z = R_C || R_z, \quad (2.28)$$

což je co do velikosti stejný výsledek s výsledkem pro zapojení SE, vztah (2.19). Rozdíl je ovšem ve znaménku – zapojení se společnou bází neobrací fázi napětí.

Vstupní odpor je evidentní z náhradního zapojení.  $i_1 = -i_e$  a jak bylo uvedeno výše  $u_{be} = -u_1$ , tudíž

$$R_{in} = \frac{u_1}{i_1} = r_e, \quad (2.29)$$

což je oproti vztahu (2.20) pro zapojení se společným emitorem více než  $\beta$  krát menší hodnota.

Proudové zesílení nakrátko ( $i_2 = -i_c$ ) určíme z náhradního schématu 2.19 (b) následovně

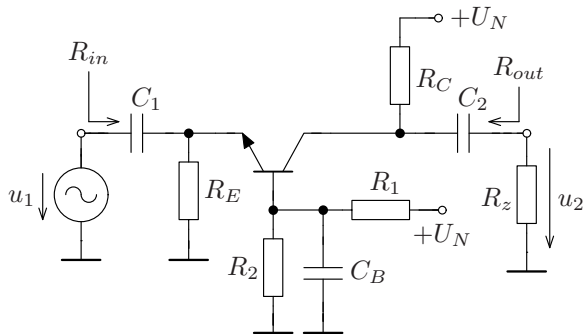
$$A_i = \frac{i_2}{i_1} = \frac{-i_c}{-i_e} = \alpha \doteq 1, \quad \text{pro } R_z = 0. \quad (2.30)$$

Výstupní odpor určíme stejně jako v případě zapojení se společným emitorem. Pokud bychom nakreslili náhradní schéma pro jeho určení, dostaneme obdobné zapojení jako bylo uvedeno na obrázku 2.16. V tomto případě je báze uzemněna přímo a emitor by byl spojen se společnou svorkou přes kapacitor  $C_1$  díky nulovanému zdroji  $u_1$ . Schéma pro určení výstupního odporu je tedy schodné a výsledný vztah také

$$R_{out} = \frac{u_2}{i_2} = R_C. \quad (2.31)$$

### Příklad 2.8

Určete napěťový a proudový přenos, vstupní a výstupní odpor zesilovače z obrázku 2.17, jestliže  $U_N = 12\text{ V}$ ,  $R_1 = 330\text{ k}\Omega$ ,  $R_2 = 100\text{ k}\Omega$ ,  $R_C = 6,8\text{ k}\Omega$ ,  $R_E = 1,5\text{ k}\Omega$ ,  $R_z = 13\text{ k}\Omega$  a  $\beta_F = 300$ .



Obrázek 2.20: Příklad zesilovače se společnou bází s můstkovým zapojením pro nastavení pracovního bodu.

### Řešení

Pracovní bod byl určen v příkladu 2.2 na straně 10, tj.  $I_C = 1.2\text{ mA}$ . Hodnoty

náhradního linearizovaného schématu tranzistoru byly již určeny v příkladu 2.7 – jedná se o shodné zapojení s jinou společnou elektrodou,  $g_m = 48 \text{ mS}$  a  $r_e \doteq 21 \Omega$ .

Je zřejmé, že náhradní obvod pro střídavé veličiny odpovídá obvodu z obrázku 2.19 (b) s tím, že ke vstupní svorce je navíc paralelně řazen rezistor  $R_E$ . Ten však nemá vliv na velikost napěťového přenosu, pro který platí vztah (2.28). Obdobně se nemění ani výstupní odpor, který určuje vztah (2.31).

Vstupní odpor je v tomto případě zmenšen rezistorem  $R_E$  oproti vztahu (2.29) pro vlastní odpor zapojení se společnou bází. Lze tedy jednoduše psát  $R_{in} = r_e || R_E$ .

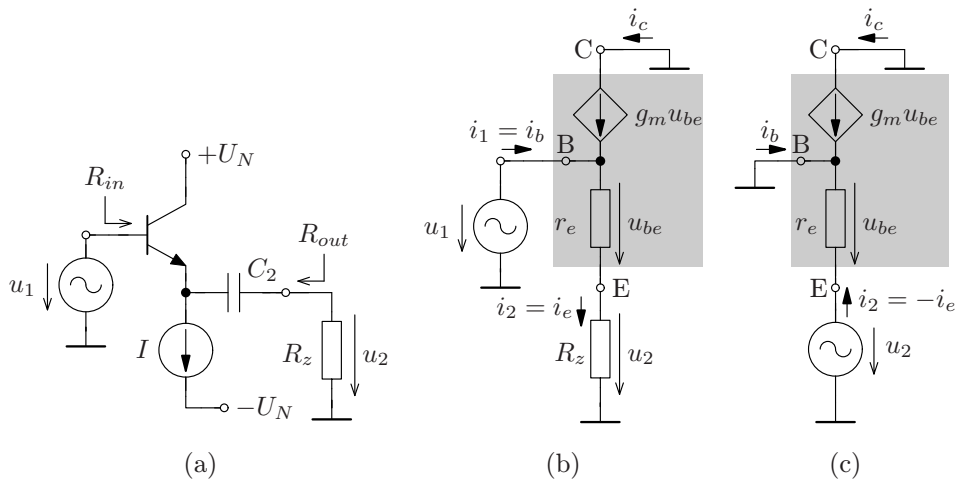
Rezistor  $R_E$  změní také hodnotu proudového zesílení, oproti teoretické hodnotě dané vztahem (2.30). Ta je v tomto případě menší, jelikož se vstupní proud rozdělí na proud emitoru  $i_e$ , který se přenáší na výstup a proud rezistorem  $R_E$ , který bude proudové zesílení změnšovat dělicím poměrem obou proudů. Proudové zesílení nakrátko je tedy dáno vztahem

$$A_i = \frac{i_2}{i_1} = \frac{\alpha i_e}{i_1} = \frac{\alpha i_1 \frac{R_E}{r_e + R_E}}{i_1} = \alpha \frac{R_E}{r_e + R_E} \doteq \alpha \doteq 1 \quad \text{pro } r_e \ll R_E \text{ a } R_z \rightarrow 0.$$

Dosazením výše uvedených hodnot jednotlivých prvků a činitelů dostaneme numerické hodnoty odvozených parametrů:

$$A_u \doteq 214, \quad R_{in} \doteq 21 \Omega, \quad A_i \doteq 1, \quad R_{out} = 6,8 \text{ k}\Omega.$$

### 2.2.3. Zesilovač se společným kolektorem



Obrázek 2.21: Elementární zapojení zesilovače se společným kolektorem (a), jeho náhradní zapojení pro střídavé veličiny ve SKP (b) a náhradní schéma pro určení výstupního odporu (c).

Z náhradního obvodu (b) je evidentní, že  $u_1 = u_{be} + u_2$ . K budicímu zdroji je paralelně zapojeno spojení dvou rezistorů  $r_e + R_E$ . Proud tohoto zdroje však není dán  $i_1 \neq u_1/(r_e + R_E) = i_e$ ! Je nutné si uvědomit, že proudové poměry v obvodu jsou značně ovlivněny řízeným proudovým zdrojem. Napětové poměry jím však ovlivněny nejsou a tudíž lze pro napěťový přenos psát

$$A_u = \frac{u_2}{u_1} = \frac{u_1 \frac{R_z}{r_e + R_z}}{u_1} = \frac{R_z}{r_e + R_z} \doteq 1, \quad \text{pro } r_e \ll R_z. \quad (2.32)$$

Vlivem řízeného zdroje platí  $i_1 = i_b = i_e/(\beta + 1)$  a vstupní odpor je:

$$R_{in} = \frac{u_1}{i_1} = \frac{u_1}{\frac{u_1}{(\beta+1)(r_e+R_z)}} = (\beta+1)(r_e+R_z) \doteq \beta R_z \quad \text{pro } r_e \ll R_z, \beta \gg 1, \quad (2.33)$$

což je modifikací vztahu (2.26).

Vztah pro proudové zesílení určíme snadno

$$A_i = \frac{i_2}{i_1} = \frac{i_e}{i_b} = (\beta + 1) \doteq \beta \quad \text{pro } \beta \gg 1 \quad (2.34)$$

Výstupní odpor lze snadno odvodit z odpovídajícího náhradního schématu 2.21 (c).

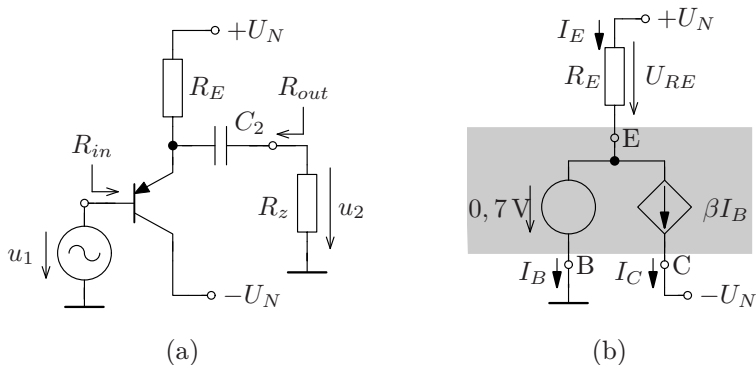
$$R_{in} = \frac{u_2}{i_2} = r_e, \quad (2.35)$$

což odpovídá vstupnímu odporu zapojení SB, viz obrázek 2.19 (b) a vztah (2.29).



### Příklad 2.9

Určete napěťový a proudový přenos, vstupní a výstupní odpor zesilovače z obrázku 2.22 (a), jestliže  $U_N = 7\text{ V}$ ,  $R_E = 8,2\text{ k}\Omega$ ,  $R_z = 10\text{ k}\Omega$  a  $\beta_F = 200$ .



Obrázek 2.22: Příklad zapojení jednoduchého zesilovače se společným kolektorem (a) a náhradní zapojení pro výpočet pracovního bodu (b).

### Řešení

Nejprve je nutné určit pracovní bod. Tranzistor nahradíme lineárním modelem a

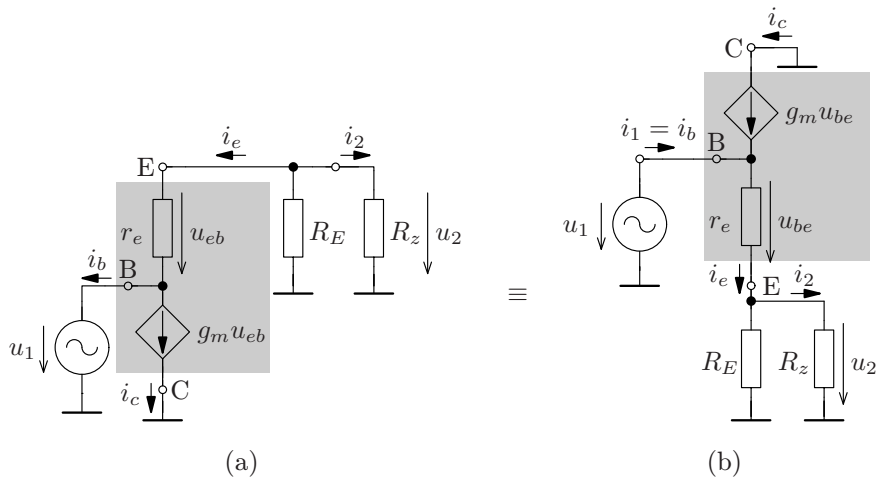
dostaneme náhradní schéma 2.22, z něhož určíme proud kolektoru v pracovním bodě

$$I_C = \beta_F I_B = \alpha_F I_E = \frac{\beta_F}{\beta_F + 1} \frac{U_{RE}}{R_E} = \frac{\beta_F}{\beta_F + 1} \frac{U_N - 0,7}{R_E} \doteq 0,76 \text{ mA.}$$

Pro výpočet byl použit lineární model tranzistoru, který předpokládá aktivní režim tranzistoru. Tuto podmínku je nutné ověřit. Zde je situace zřejmá. Napájecí napětí je větší než 0,7 V, přechod báze-emitor se jistě otevře. Báze je stejnosměrně uzemněna a kolektor je připojen přímo na záporné napětí – kolektorový přechod je tedy zcela jistě polarizován v závěrném směru (jedná se o tranzistor PNP), což je důkaz toho, že tranzistor je v aktivním režimu.

Nyní lze tranzistor nahradit linearizovaným modelem a dostaneme linearizované schéma zesilovače pro malé změny obvodových veličin ve SKP, které je uvedeno na obrázku 2.23. Hodnoty prvků modelu tranzistoru určíme podle uvedených vztahů z první přednášky:  $g_m = 30,6 \text{ mS}$  a  $r_e \doteq 32 \Omega$ .

Náhradní obvod je uveden dvakrát. Obrázek 2.23 (a) obdržíme prostým nahrazením linearizovaného modelu namísto PNP tranzistoru. Pokud však změním orientaci obvodových veličin na kladnou – řídicí napětí  $u_{eb} = -u_{be}$  a proudy  $i_b$  a  $i_e$ , změní se i orientace řízeného proudu  $i_c$  (je řízen opačným napětím  $u_{be}$ ) a dostaneme obvod 2.23. Ten odpovídá náhradě tranzistoru modelem pro NPN tranzistor. Je evidentní, že oba obvody jsou shodné a tím i oba náhradní modely tranzistoru.



Obrázek 2.23: Náhradní zapojení zesilovače z obrázku 2.22 pro malé změny obvodových veličin ve SKP (a) a stejné zapojení s kladnou orientací obvodových veličin (b).

*Zesilovač s PNP tranzistorem je z hlediska zpracovávaného signálu ekvivalentní se zesilovačem s tranzistorem NPN – dosáváme naprosto shodné náhradní obvody.*

Nyní určíme požadované parametry. Vzhledem k podobnosti výsledného náhradního schématu a schématu 2.21 (b) lze využít výše uvedeného odvození. Napěťové zesílení je obdobou vztahu (2.32)

$$A_u = \frac{u_2}{u_1} = \frac{R_z}{r_e + R'_z}, \quad \text{kde } R'_z = R_E || R_z.$$

Podobně bude modifikován vstupní odpor  $R_{in} = (\beta + 1)(r_e + R'_z)$ . Vztah pro proudové zesílení nakrátko ( $R_z \rightarrow 0$ ) je evidentně shodný se vztahem (2.34) a výstupní odpor je zmenšen díky rezistoru  $R_E$ ,  $R_{out} = r_e || R_E$ .

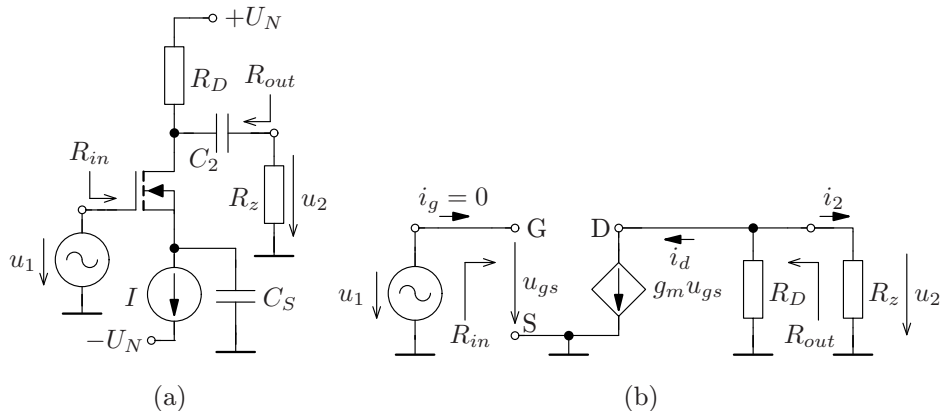
Dosazením numerických hodnot dostáváme:

$$A_u \doteq 140, \quad R_{in} \doteq 910 \text{ k}\Omega, \quad A_i \doteq 1, \quad R_{out} \doteq 32 \Omega.$$

## 2.3. Zesilovače s unipolárními tranzistory

### 2.3.1. Zesilovač se společným sourcem

Vydeme ze zapojení 2.10 pro nasvení pracovního bodu. Celkové zapojení je uvedeno na obrázku 2.24 (a).



Obrázek 2.24: Elementární zapojení zesilovače se společným sourcem (a) a jeho náhradní zapojení pro střídavé veličiny ve SKP (b).

Pokud je tranzistor v saturační oblasti, což budeme předpokládat, lze ho nahradit linearizovaným modelem pro malé změny obvodových veličin ve SKP, stejně jako u tranzistoru bipolárního. Opět nebudeme pro jednoduchost uvažovat výstupní odpor tranzistoru. V tomto případě dostaneme náhradní linearizovaný obvod, uvedený na obrázku 2.24 (b).

Z náhradního obvodu je evidentní, že  $u_{gs} = u_1$ ,  $i_d = g_m u_1$  a  $u_2 = -i_d(R_D || R_z)$ . Vztah pro napěťové zesílení je tudíž ekvivalentní vztahu pro napěťové zesílení zapojení se společným emitorem:

$$A_u = \frac{u_2}{u_1} = \frac{-g_m u_{gs} R'_z}{u_{gs}} = -g_m R'_z, \quad \text{kde } R'_z = R_D || R_z \quad (2.36)$$

Vzhledem k charakteru vstupní svorky je  $i_g = 0$  a vzhledem k tomu, že v tomto případě  $i_1 = i_g$ , jde vstupní odpor i proudové zesílení nade všechny meze.

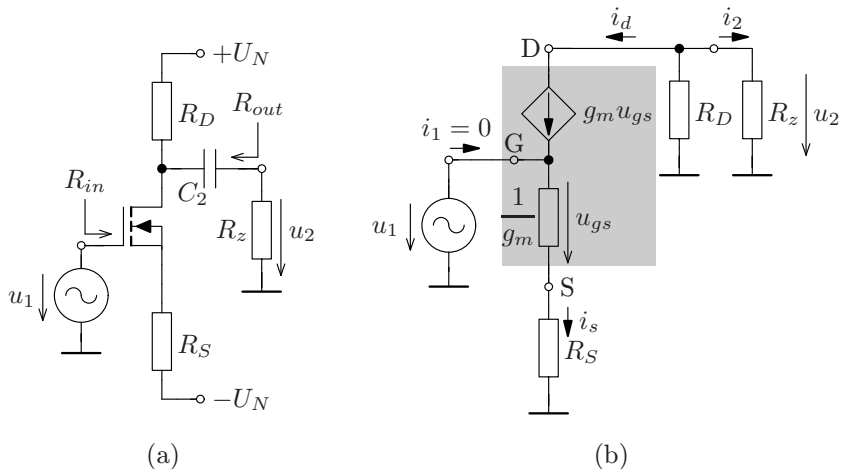
$$R_{in} = \frac{u_1}{i_1} \rightarrow \infty, \quad A_i = \frac{i_2}{i_1} \rightarrow \infty. \quad (2.37)$$

Zbývá určit výstupní odpor, obdobně jako v zapojení SE, viz obrázek 2.16. Vstupní zdroj nulujeme a budíme pomocným zdrojem  $u_2$  do výstupních svorek, potom bude  $u_{gs} = 0$  a tudíž i  $i_d = g_m u_{gs} = 0$  a proud  $i_2$  je dán pouze proudem rezistoru  $R_D$ , podobně jako v zapojení SE. Výstupní odpor je

$$R_{out} = \frac{u_2}{i_2} = R_D \quad (2.38)$$

### Příklad 2.10

Určete napěťový přenos a výstupní odpor zesilovače, jestliže  $U_N = 5\text{ V}$ ,  $R_D = 5\text{ k}\Omega$ ,  $R_S = 4\text{ k}\Omega$ ,  $R_z = 20\text{ k}\Omega$ ,  $K_p = 1,6\text{ mA/V}^2$ ,  $W = 160\text{ }\mu\text{m}$ ,  $L = 10\text{ }\mu\text{m}$  a  $U_{TO} = 1,9\text{ V}$ .



Obrázek 2.25: Zapojení jednotranzistorového zesilovače se společným sourcem, s neblokovaným rezistorem v obvodu source (a) a jeho náhradní zapojení pro střídavé veličiny ve SKP (b).

## Řešení

Pracovní bod byl určen v příkladu 2.3 na straně 14, tj.  $I_D \doteq 0,72 \text{ mA}$ . Z toho určíme  $g_m \doteq 6 \text{ mS}$ . Náhradní obvod pro střídavé veličiny je uveden na obrázku 2.25 (b), kde tranzistor byl nahrazen linearizovaným modelem T.

Při výpočtu napětového zesílení postupujeme obdobně jako v příkladu 2.7. Určíme řídicí napětí  $u_{gs}$  a pak výstupní napětí  $u_2 = -i_d R'_z = g_m u_{gs} R'_z$ , potom

$$u_{gs} = u_1 \frac{1/g_m}{1/g_m + R_S}, \quad u_2 = -i_d R'_z = -u_1 \frac{R'_z}{1/g_m + R_S}, \quad \text{kde } R'_z = R_C || R_z,$$
$$A_u = \frac{u_2}{u_1} = -\frac{R'_z}{1/g_m + R_S} \doteq -\frac{R'_z}{R_S}, \quad \text{pro } \alpha \rightarrow 1, \quad r_e \ll R_S, \quad (2.39)$$

což je obdobou výše uvedeného vztahu (2.24) až na činitel  $\alpha$ , který je roven přesně 1, protože v případě unipolárních tranzistorů je  $i_g \rightarrow 1$  a  $i_d = i_s$ .

Výstupní odpor je v dán vztahem (2.38), tj.

$$A_u \doteq -1, \quad R_{out} = 5 \text{ k}\Omega.$$

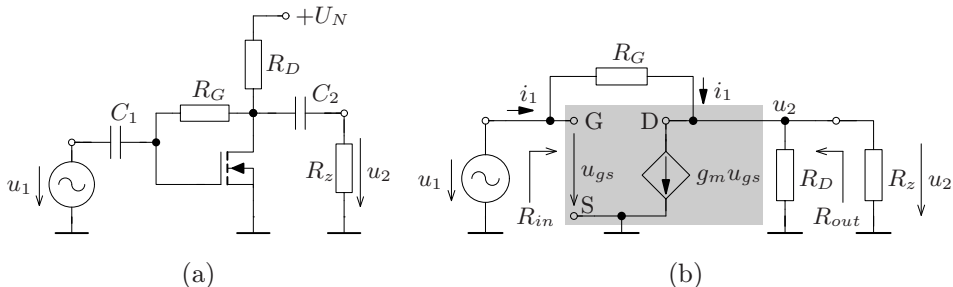
Zesilovač obrací fázi, což je typické pro zapojení SE, resp. SS, nicméně napětové zesílení je však velmi malé (rovno jedné), což je dáno neblokovaným rezistorem  $R_S$ . Pokud by byl rezistor  $R_S$  blokován kapacitorem, ve střídavém náhradním schématu by se neuplatnil (byl by zkratován), potom by platilo:

$$A_u = -R'_z g_m \doteq -24 \quad \text{pro } R_S \rightarrow 0.$$



### Příklad 2.11

Určete napěťový i proudový přenos, vstupní a výstupní odpor zesilovače na obrázku 2.26, jestliže  $U_N = 10\text{ V}$ ,  $R_D = 5\text{ k}\Omega$ ,  $R_G = 1\text{ M}\Omega$ ,  $R_z = 43\text{ k}\Omega$ ,  $K_p = 1,6\text{ mA/V}^2$ ,  $W = 160\text{ }\mu\text{m}$ ,  $L = 10\text{ }\mu\text{m}$  a  $U_{TO} = 1,9\text{ V}$ .



Obrázek 2.26: Zapojení jednotranzistorového zesilovače se společným source, se zpětnovazebním rezistorem  $R_G$  (a) a jeho náhradní zapojení pro střídavé veličiny ve SKP (b).

### Řešení

Pracovní bod byl určen v příkladu 2.4 na straně 17, tj.  $I_D \doteq 1,55\text{ mA} \Rightarrow g_m \doteq 8,9\text{ mS}$ . Náhradní obvod pro střídavé veličiny je uveden na obrázku 2.25 (b), kde tranzistor byl nahrazen linearizovaným modelem II.

Vztah pro napětové zesílení odvodíme z rovnice pro uzlové napětí  $u_2$ , kde  $R'_z = R_C || R_z$ :

$$\frac{u_2 - u_1}{R_B} + g_m u_1 + \frac{u_2}{R'_z} \implies u_1 = \left( g_m - \frac{1}{R_G} \right) = -u_2 \left( \frac{1}{R'_z} + \frac{1}{R_G} \right),$$

$$A_u = \frac{u_2}{u_1} = -\frac{g_m - \frac{1}{R_G}}{\frac{1}{R_G} + \frac{1}{R'_z}} \doteq -g_m (R_G || R'_z) \doteq -g_m R'_z, \quad \text{pro } R_G \gg \frac{1}{g_m}, \quad R_G \gg R'_z. \quad (2.40)$$

Vstupní odpor je zde konečný, daný proudem  $i_1$ , při  $i_g = 0$ . Evidentně platí

$$R_{in} = \frac{u_1}{i_1} = \frac{u_1}{\frac{u_1 - u_2}{R_G}} = \frac{u_1 R_G}{u_1 (1 - A_u)} \doteq \frac{R_G}{1 + g_m R'_z}, \quad \text{pro } R_G \gg \frac{1}{g_m}, \quad R'_z, \quad (2.41)$$

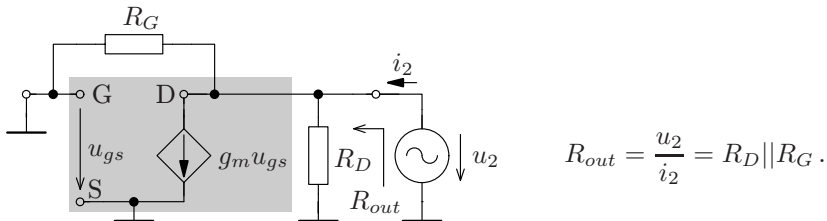
tj. vstupní odpor je ( $|A_u| + 1$ )-krát ( $A_u < 0$ ) menší než hodnota rezistoru  $R_G$ ! Je to způsobeno zpětnou vazbou, kterou tento rezistor zavádí.

Proudový přenos nakrátko je definován při  $R_z \rightarrow 0$  a tudíž  $u_2 = 0$  a  $i_1 = u_1/R_G$ ,  $i_2 = i_1 - g_m u_{gs}$  z čehož vyplývá

$$A_i = \frac{i_2}{i_1} = \frac{u_1 \left( \frac{1}{R_G} - g_m \right)}{\frac{u_1}{R_G}} = 1 - g_m R_G \doteq g_m R_G, \quad \text{pro } R_G \gg \frac{1}{g_m}, \quad (2.42)$$

což je očekávaný výsledek – vstupní proud je, jak bylo uvedeno,  $i_1 = u_1/R_G$ , a pokud jeho velikost zanedbáme vůči proudu řízeného zdroje je  $i_2 \doteq -g_m u_1$  a proudový přenos nakrátko je tudíž dán poměrem vodivostí  $g_m$  a  $1/R_G$ .<sup>1</sup>

Výstupní odpor určíme z náhradního schématu (2.27). Jelikož je vstupní napětí nulované, je nulový i proud drainem  $i_d = g_m u_{gs} = 0$  a pro výstupní odpor platí



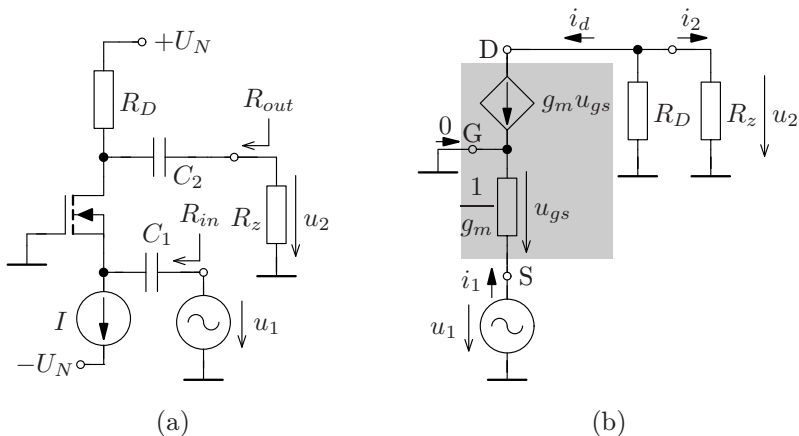
Obrázek 2.27: Náhradní linearizované zapojení zesilovače z obrázku 2.26 (a) pro určení výstupního odporu ve SKP.

Numerické hodnoty jednotlivých veličin jsou následující:

$$A_u \doteq -40, \quad R_{in} \doteq 24 \text{ k}\Omega, \quad A_i \doteq 8900, \quad R_{out} \doteq 5 \text{ k}\Omega.$$

<sup>1</sup>Je nutné si uvědomit, že pro  $u_2 = 0$  je obvod bez zpětné vazby a tudíž je vstupní odpor dán pouze hodnotou rezistoru  $R_G$ .

### 2.3.2. Zesilovač se společným gate



Obrázek 2.28: Elementární zapojení zesilovače se společným gate (a) a jeho náhradní zapojení pro střídavé veličiny ve SKP (b).

Z náhradního schématu je evidentní, že  $u_{gs} = -u_1$ ,  $i_d = -g_m u_1$  a výstupní napětí  $u_2 = -i_d(R_D || R_z)$ . Vztah pro napěťové zesílení je tudíž ekvivalentní vztahu pro napěťové zesílení zapojení se společnou bází:

$$A_u = \frac{u_2}{u_1} = \frac{-g_m u_{gs} R'_z}{-u_{gs}} = g_m R'_z, \quad \text{kde } R'_z = R_D || R_z \quad (2.43)$$

I když zde také platí  $i_g = 0$ , má gate nulový potenciál a pro vstupní odpor evidentně platí

$$R_{in} = \frac{u_1}{i_1} = \frac{1}{g_m}, \quad (2.44)$$

jelikož  $i_1 = -i_s = -i_d = -u_{gs} g_m$ . Z toho lze psát vztak pro proudové zesílení nakrátko

$$A_i = \frac{i_2}{i_1} = \frac{-i_d}{-i_s} = 1, \quad \text{pro } R_z = 0. \quad (2.45)$$

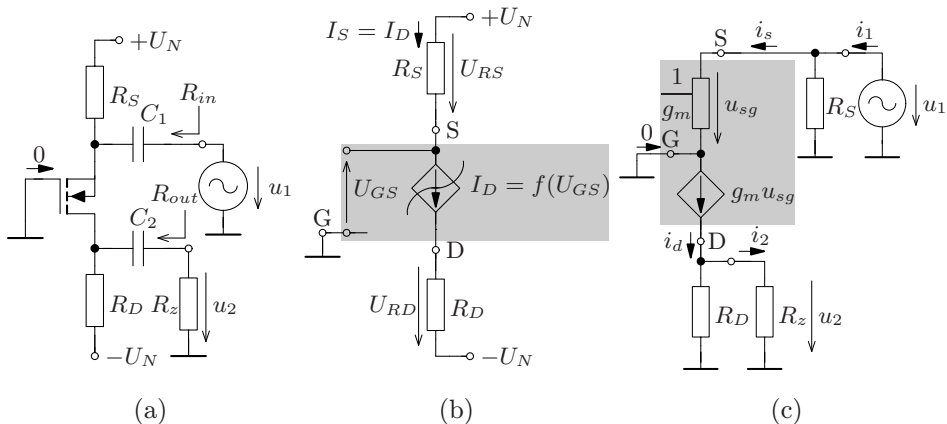
Zbývá určit výstupní odpor, který určíme obdobně jako v předchozím zapojení pro  $u_1 = 0$  při buzení do výstupních svorek. Pro výstupní odpor platí

$$R_{out} = \frac{u_2}{i_2} = R_D, \quad (2.46)$$

tj. shodný vztah se vztahy pro zapojení SE, SB a SS.

### Příklad 2.12

Určete napěťový přenos, vstupní a výstupní odpor zesilovače na obrázku 2.29, jestliže  $U_N = 5\text{ V}$ ,  $R_D = 5\text{ k}\Omega$ ,  $R_S = 4\text{ k}\Omega$ ,  $R_z = 20\text{ k}\Omega$ ,  $K_p = 1,6\text{ mA/V}^2$ ,  $W = 160\text{ }\mu\text{m}$ ,  $L = 10\text{ }\mu\text{m}$  a  $U_{TO} = -1,9\text{ V}$ .



Obrázek 2.29: Zapojení jednotranzistorového zesilovače se společným gate s neblokováním rezistorem v obvodu source (a), jeho náhradní zapojení pro určení pracovního bodu tranzistoru (b) a náhradní schéma pro střídavé veličiny ve SKP (c).

## Řešení

Pracovní bod řešíme zcela obdobně, nahradíme tranzistor náhradním modelem, dostaneme zapojení 2.29 (c) a pro proud  $I_D$  evidentně platí:

$$I_D = \frac{1}{2} K_P \frac{W}{L} (U_{GS} - U_{TO})^2, \quad \text{kde } U_{GS} = -U_N + R_S I_D. \quad (2.47)$$

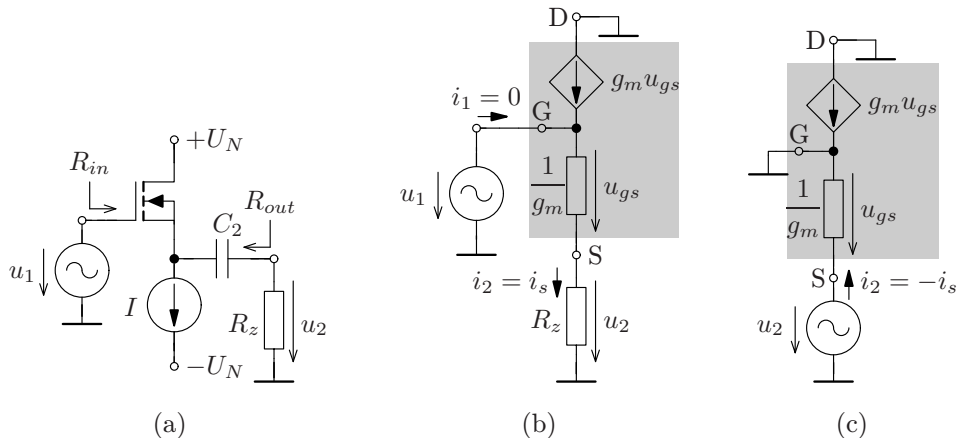
Vzhledem k tomu, že se jedná o kvadratickou rovnici, proud drainem vyjde stejně jako v příkladu 2.10, resp. 2.3 na straně 14, tj.  $I_D \doteq 0,72 \text{ mA}$ . Napětí mezi elektrodami tranzistoru v pracovním bodě pak je  $U_{GS} \doteq -2,14 \text{ V}$  a  $U_{DS} \doteq -3,56 \text{ V}$ , což vyhovuje podmínce pro saturační oblast tranzistoru ( $U_{DS} \leq U_{GS} - U_{TO}$  a  $U_{GS} \leq U_{TO}$ ). Z pracovního bodu určíme hodnotu převodní vodivosti  $g_m \doteq 6 \text{ mS}$ . Náhradní obvod pro střídavé veličiny je uveden na obrázku 2.29 (c). Pro napěťové zesílení platí tedy vztah (2.43) a pro výstupní odpor vztah (2.46).

$$R_{in} = \frac{u_1}{i_1} = \frac{R_S/g_m}{1/g_m + R_S} = \frac{R_S}{1 + g_m R_S}. \quad (2.48)$$

$$A_i = \frac{i_2}{i_1} = \frac{i_s}{i_1} = \frac{R_S}{1/g_m + R_S}, \quad \text{pro } R_z = 0. \quad (2.49)$$

$$A_u \doteq 24, \quad R_{out} = 5 \text{ k}\Omega, \quad R_{in} \doteq 159 \Omega, \quad A_i \doteq 0.96.$$

### 2.3.3. Zesilovač se společným drainem



Obrázek 2.30: Elementární zapojení zesilovače se společným drainem (a), jeho náhradní zapjení pro střídavé veličiny ve SKP (b), (c) – zapojení pro určení výstupního odporu.

Z náhradního schématu je evidentní, že  $u_1 = u_{gs} + u_2$ , tj. napěťové zesílení je menší než jedna, stejně jako v případě zapojení se společným kolektorem:



$$A_u = \frac{u_2}{u_1} = \frac{u_1 \frac{R_z}{1/g_m + R_z}}{u_1} = \frac{R_z}{1/g_m + R_z} < 1 \quad (2.50)$$

Vzhledem k tomu, že vstupní proud  $i_1 = i_g = 0$ , roste vstupní odpor i proudové zesílení nade všechny meze ( $R_{in} \rightarrow \infty$ ,  $A_i \rightarrow \infty$ ).

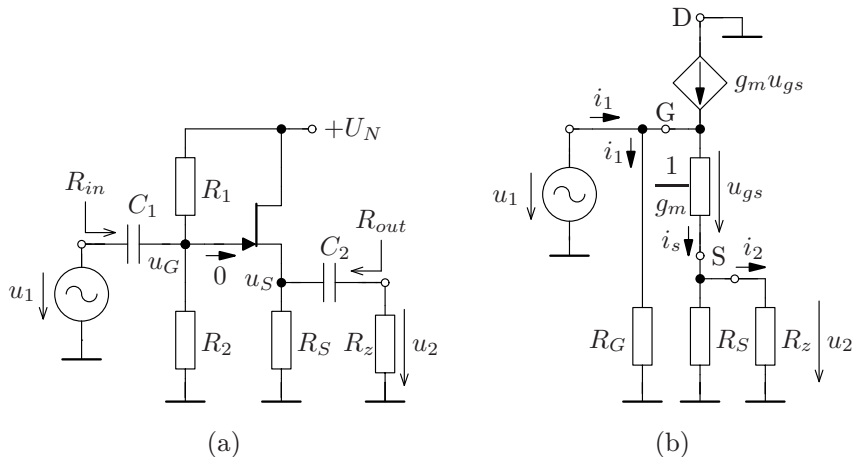
Ze základních parametrů zbývá určit výstupní odpor, který určíme obdobně jako v předchozích zapojení pro  $u_1 = 0$  při buzení do výstupních svorek. Na obrázku 2.30 (c) je uvedeno odpoovídající náhradní zapojení platné ve SKP. Pro výstupní odpor platí

$$R_{out} = \frac{u_2}{i_2} = \frac{1}{g_m}, \quad (2.51)$$

tj. podobně jako pro zapojení SC ( $r_e \rightarrow 1/g_m$  pokud  $\beta \rightarrow \infty$ , což je případ unipolárních tranzistorů).

### Příklad 2.13

Určete napěťový přenos, proudový přenos nakrátko a vstupní i výstupní odpor zesilovače na obrázku 2.31, jestliže  $U_N = 5\text{ V}$ ,  $R_1 = 3\text{ M}\Omega$ ,  $R_2 = 1\text{ M}\Omega$ ,  $R_S = 1\text{ k}\Omega$ ,  $R_z = 20\text{ k}\Omega$ ,  $K_p = 1,5\text{ mA/V}^2$  a  $U_{TO} = -2,3\text{ V}$ .



Obrázek 2.31: Můstkové zapojení tranzistorového zesilovače se společným drainem (a) a jeho náhradní zapojení pro střídavé veličiny ve SKP (b).

## Řešení

Pracovní bod určíme obdobně jako v příkladě 2.5. Nahradíme tranzistor modelem pro výpočet pracovního bodu, přičemž budeme předpokládat, že je tranzistor v saturační oblasti. Pak lze psát

$$I_D = K_\beta(U_G - U_S - U_{TO})^2, \quad \text{kde} \quad U_G = U_N \frac{R_2}{R_1 + R_2} \quad \text{a} \quad U_S = R_S I_D.$$

$$I_D = \begin{cases} I_{D1} \doteq 2,3 \text{ mA} & \text{a} \quad U_{GS1} \doteq -1,06 \text{ V}, \\ I_{D2} \doteq 5,5 \text{ mA} & \text{a} \quad U_{GS2} \doteq -4,2 \text{ V}. \end{cases}$$

Je zřejmé, že  $I_D = I_{D1} \doteq 2,3 \text{ mA}$ , jelikož  $U_{GS2} < U_{TO}$ . Naopak  $U_{GS1} - U_{TO} \doteq 0,95 < U_{DS} = U_N - I_D R_S \doteq 2,7 \text{ V}$ , čímž je ověřen předpoklad, že tranzistor je v saturační oblasti.

Z proudu  $I_D$  v pracovním bodě určíme hodnotu převodní vodivosti  $g_m \doteq 3,7 \text{ mS}$ . Náhradní obvod pro střídavé veličiny je uveden na obrázku 2.25 (b), kde tranzistor byl opět nahrazen linearizovaným modelem T a kde rezistor  $R_G = R_1 || R_2$  představuje paralelní spojení rezistorů  $R_1$  a  $R_2$ .

Napětového zesílení určíme stejně jako pro schéma na obrázku 2.30. Podle vztahu (2.50) lze psát

$$A_u = \frac{u_2}{u_1} = \frac{R'_z}{1/g_m + R'_z}, \quad \text{kde} \quad R'_z = R_S || R_z.$$

Stejně jako v předchozím případě určíme i výstupní odpor (napětí  $u_1$  vynulujeme a budíme místo zátěže). Pro výstupní odpor platí obdobný vztah jako (2.51)

$$R_{out} = \frac{1}{g_m} \parallel R_S = \frac{R_S}{1 + g_m R_S}.$$

Jelikož je vstupní brána zatížena rezistorem  $R_G$ , je vstupní proud  $i_1$  nenulový a pro vstupní odpor evidentně platí  $R_{in} = R_G$ . Proudový přenos nakrátko určíme jednoduše z náhradního schématu pro  $R_z \rightarrow 0$ , tj.  $i_2 = i_s = i_d = g_m u_{gs}$ ,  $u_2 = 0$  a  $u_{gs} = u_1$ . Potom platí

$$A_i = \frac{i_2}{i_1} = \frac{g_m u_1}{u_1 / R_G} = g_m R_G.$$

Numerické hodnoty jednotlivých veličin jsou následující:

$$A_u \doteq 0,78, \quad R_{out} \doteq 212 \Omega, \quad R_{in} = 750 \text{ k}\Omega, \quad A_i \doteq 2800.$$