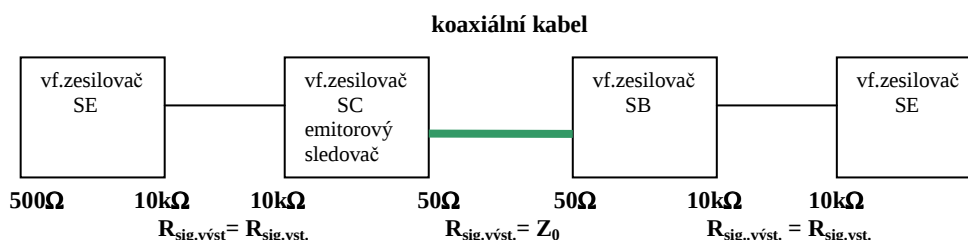


Zesilovač se společným kolektorem-emitorový sledovač

1. Úvod

Dalším používaným zapojením, je zapojení se společným kolektorem, tzv. emitorový sledovač. Toto zapojení se používá pro transformaci impedance, mezi obvody s velkou výstupní impedancí a obvody s malou vstupní impedancí. Typickým příkladem jsou obvody vf. zesilovačů, např. ve vysílačích, kde jednotlivé obvody jsou od sebe vzhledem ke konstrukci vzdáleny několik desítek cm. Pro jejich spojení se používá koaxiální kabel, jehož impedance je v řádech ohmů, např. 50Ω . Koaxiální kabel s takovým odporem není z důvodu výkonového přizpůsobení, možno připojit přímo na výstup zesilovače, jehož výstupní signálový odpor je řádově několik $k\Omega$. Takové spojení by pro zesilovač např. SE znamenalo na výstupu signálový zkrat a to je nepřijatelné. Připojíme-li na výstup vf. zesilovače v zapojení SE emitorový sledovač se vstupním signálovým odporem $R_{sig.vst.}$, jehož hodnota bude odpovídat výstupnímu signálovému odporu $R_{sig.výst.}$ vf. zesilovače SE, vytvoříme obvod s impedančním přizpůsobením s minimálními ztrátami.

Obvod emitorového sledovače má nulový fázový posuv mezi vstupním a výstupním signálovým napětím, jeho napěťové zesílení je menší než 1, proudové zesílení několik desítek. Podstatné však je, že jeho výstupní impedanci je možno navrhnout tak, aby odpovídala impedanci nízkoimpedančního vedení, např. koaxiálního kabelu. Z důvodů impedančního přizpůsobení je však nutné na výstupu kabelu připojit zesilovač s malou vstupní a velkou výstupní impedancí, což splňuje zesilovač v zapojení společná báze SB, kterým se budeme zabývat později. Blokové schéma soustavy je na obr.1



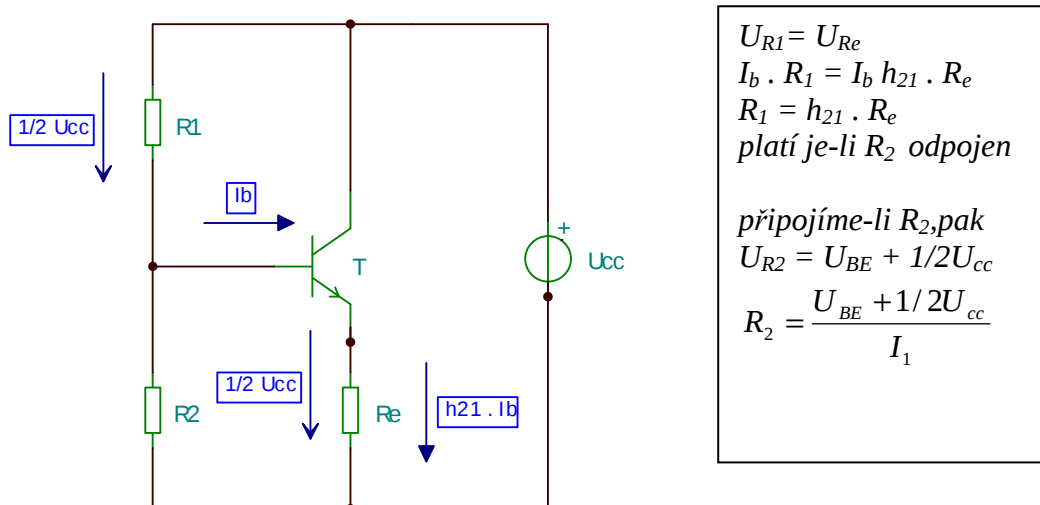
obr.1 Blokové schéma zapojení zesilovacího řetězce s impedančním přizpůsobením v kombinaci SE-SC, SC-SB, SB-SE

2. Nastavení pracovního bodu

Nastavení pracovního bodu emitorového sledovače pracujícího ve třídě A můžeme realizovat dvěma způsoby. Pro zajištění teplotní stabilizace pracovního bodu, můžeme zařadit do obvodu báze tvrdý dělič napětí obr.2, tvořený odpory R_1 a R_2 , nebo řešit nastavení pracovního bodu odporem R_1 . Jak již víme z řešení zesilovače v zapojení SE, tvrdý dělič v obvodu báze musí plnit podmínku- příčný proud děliče:

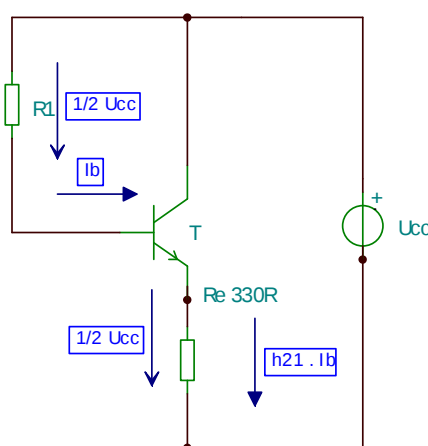
$$I_1 = 10 \times I_b$$

Pokud tuto podmínku nesplníme, vznikne určitý rozdíl mezi vypočítanými a naměřenými hodnotami parametrů pracovního bodu, který však ve většině případů bude v toleranci použitých součástek



obr.2 Nastavení pracovního bodu emitorového zesilovače děličem v obvodu báze

příklad.1 Ve schématu na obr.3 vypočítejte hodnotu rezistoru R_1 , pro nastavení pracovního bodu do třídy A, zadáno $h_{21} = 200$



obr.3 Zapojení emitorového sledovače k příkladu 1

řešení: pro zapojení emitorového sledovače ve třídě „A“ platí $U_{Rb} = U_{Re}$. Protože z dřívějšího výkladu víme, že:

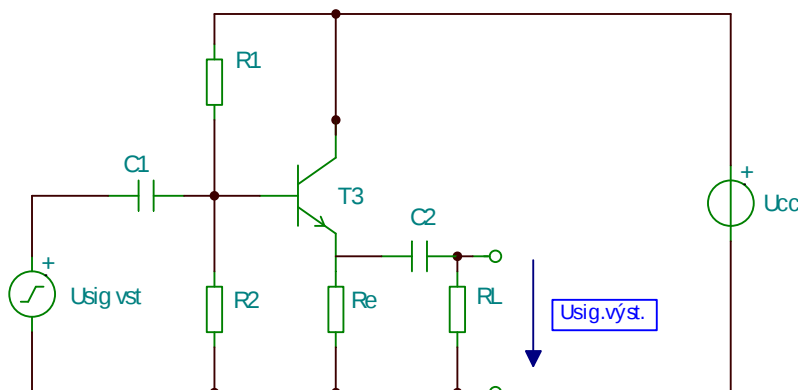
$$I_b = \frac{I_c}{h_{21}} \quad \text{a} \quad U_{Re} = I_c \cdot R_e \quad (\text{předpokládáme, že } I_b \text{ je zanedbatelné})$$

pak platí $I_b \cdot R_b = I_c \cdot R_e$ po dosazení $\frac{I_c}{h_{21}} \cdot R_b = I_c \cdot R_e$ (I_c krátíme)

$$R_b = R_e \cdot h_{21} = 330 \Omega \cdot 200 = 66 \text{ k}\Omega$$

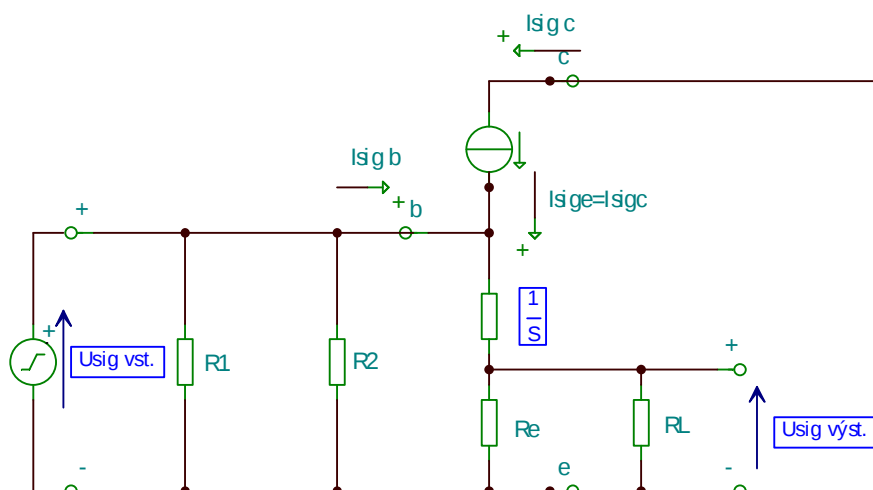
2. Vlastnosti zesilovače v obvodu střídavého proudu

Při řešení zesilovače předpokládáme, že výstup zesilovače je zatížen rezistorem R_L , a ze vstupní strany je buzen ze zdroje signálového napětí se zanedbatelným vnitřním odporem.



obr.4 Schéma zapojení emitorového sledovače pro obecné řešení parametrů střídavého režimu.

Ze zapojení na obr.4 nakreslíme náhradní obvod pro střídavý proud



obr.5 Náhradní schéma zapojení emitorového sledovače pro obecné řešení parametrů střídavého režimu

Z hlediska výstupního obvodu vidíme, že emitorový odpor R_e a pracovní zatěžovací odpor R_L jsou spojeny paralelně. Tento stav zapíšeme:

výsledný zatěžovací odpor emitorového sledovače $R_v = R_e // R_L$

2.1 Signálový vstupní odpor zesilovače se společným kolektorem -emitorového sledovače

Signálový vstupní odpor je při pohledu ze strany zdroje signálového napětí, dán paralelní kombinací rezistorů v obvodu báze R_1, R_2 , k nimž je připojen odpor zesilovacího prvku $\frac{1}{S}$ v sérii s celkovým odporem v obvodu emitoru R_v . Budeme-li porovnávat praktické hodnoty jednotlivých odporů, tak zjistíme, že poměr $\frac{1}{S}$ je proti hodnotě R_v zanedbatelný a signálový vstupní odpor

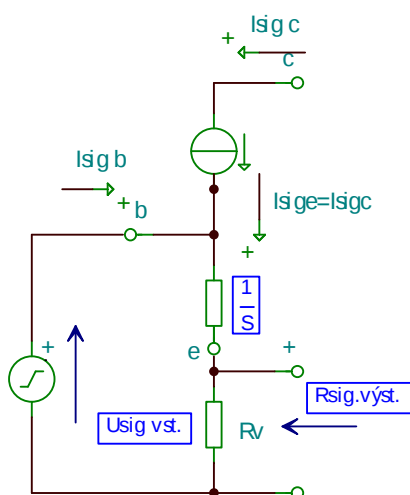
$$R_{sig.vst.} = R_1 // R_2 // (h_{21} \cdot R_V)$$

Protože odpor R_V je ve výrazu násoben zesilovacím činitelem h_{21} , je celkový vstupní signálový odpor zapojení velký, (dosahuje hodnot řádově v kΩ) a je silně ovlivněn proudovým zesilovacím činitelem h_{21} .

2.2 Signálový výstupní odpor zesilovače se společným kolektorem- emitorového sledovače

Při určování výstupního signálového odporu $R_{sig.výst.}$, vycházíme obvykle z předpokladu, že zdroj signálového napětí má nulový vnitřní odpor (v další části výkladu si ukážeme i případ, kdy tento předpoklad neplatí). Bude-li $R_{ig} = 0$, pak výstupní odpor je roven poměru h_{11}/h_{21} . Jak vyplývá z náhradního obvodu pro řešení $R_{sig.výst.}$ na obr.5, je možno za určitých podmínek vyjádřit signálový výstupní odpor, jako paralelní kombinaci poměru $1/S$ a emitorového odporu R_e .

$$R_{sig.výst.} = \frac{1}{S} // R_e$$



obr. 6 Náhradní obvod zesilovače SC pro určení signálového výstupního odporu

Vzhledem k tomu, že celkový zatěžovací odpor zesilovače SC R_V je tvořen paralelní kombinací emitorového odporu R_e a odporu zátěže R_L , je možno konstatovat, že signálový výstupní odpor zesilovače SC je dán převážně malým odporem $1/S$, takže výstupní odpor zapojení SC je malý.

2.3 Napět'ové zesílení zesilovače SC- emitorového sledovače.

Jak vyplývá z náhradního obvodu na obr.6, $U_{sig.vst.}$ je dáno součinem $I_{sig.e}$ a součtu celkového zatěžovacího odporu R_V plus odpor zesilovací součástky v pracovním bodě. Výstupní signálové napětí je pak dáno součinem signálového výstupního proudu $I_{sig.e}$ a celkového odporu zátěže R_V .

$$U_{sig.vst.} = I_{sig.e} \left(\frac{1}{S} + R_V \right) \quad U_{sig.výst.} = I_{sig.e} \cdot R_V$$

$$\text{napětíové zesílení zesilovače SC} \quad A_U = \frac{U_{\text{sig.výst.}}}{U_{\text{sig.vst.}}} = \frac{I_{\text{sig.e}} \cdot R_V}{I_{\text{sig.e}} \cdot \left(\frac{1}{S} + R_V \right)} = \frac{R_V}{\frac{1}{S} + R_V}$$

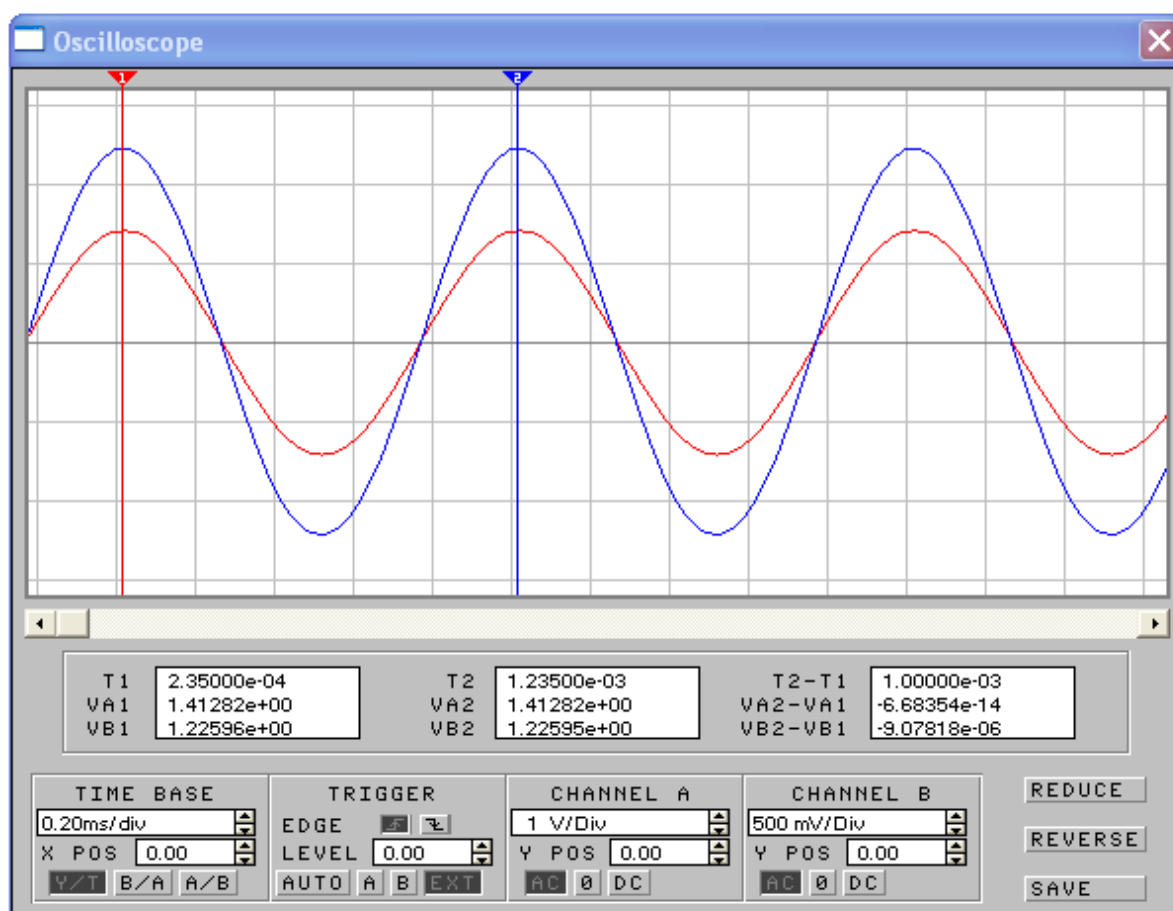
Jak vyplývá ze vztahu pro výpočet napětíového zesílení, bude A_U vždy menší než 1

$$A_U < 1 \quad \text{je v intervalu od } 0 \text{ do } 1$$

Pro $R_V = 0$ je $A_{U(\min)} = 0$

Pro $R_V \rightarrow \infty$ se $A_U \rightarrow 1$

Jak bylo již dříve definováno, zesilovač v zapojení SC se také nazývá emitorový sledovač. Napětí na výstupu zesilovače SC se téměř rovná napětí na vstupu zesilovače a to jak z hlediska velikosti napětí, tak i z hlediska vzájemného fázového stavu. Průběh napětí na vstupu a výstupu zesilovače SC je na obr.7



obr.7 Průběh vstupního a výstupního napětí zesilovače se společným kolektorem SC

Na obrazovce dvoukanálového osciloskopu vidíme, že výstupní i vstupní signál jsou ve fázi. Po odečtení maximální amplitudy vstupního a výstupního signálu je možné určit i napětíové zesílení.

$$U_{\text{vst.}} \text{ kanál A } U_{\text{max}} = 1,41\text{V} , U_{\text{výst.}} \text{ kanál B } U_{\text{max}} = 1,22\text{V}$$

$$\text{Napět'ové zesílení } A_U = \frac{U_{\max. \text{výst.}}}{U_{\max. \text{vst.}}} = \frac{1,22}{1,41} V = 0,865 - \text{porovnejte s výpočtem } A_U \text{ v př.2}$$

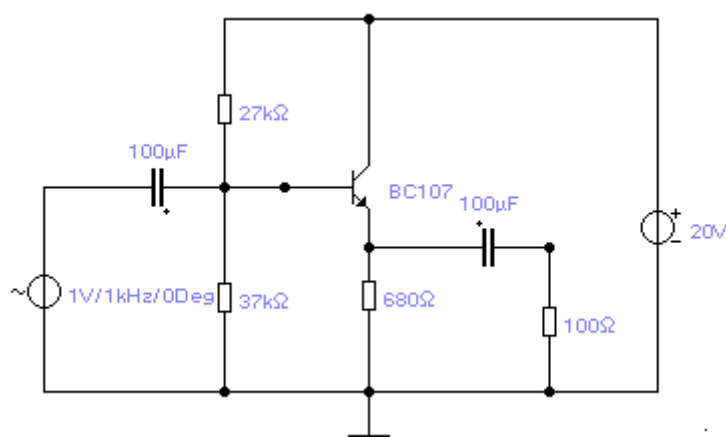
3. Příklad pro zjištění vlastností zesilovače v zapojení SC,emitorového sledovače

příklad 2. Pro zapojení na obr.8 vypočítejte parametry stejnosměrného pracovního bodu a určete hodnoty zadaného obvodu v dynamickém režimu. Pro výpočet obvodu jsou dány tyto hodnoty: $U_{be} = 0,732V$

$$h_{21} = 384$$

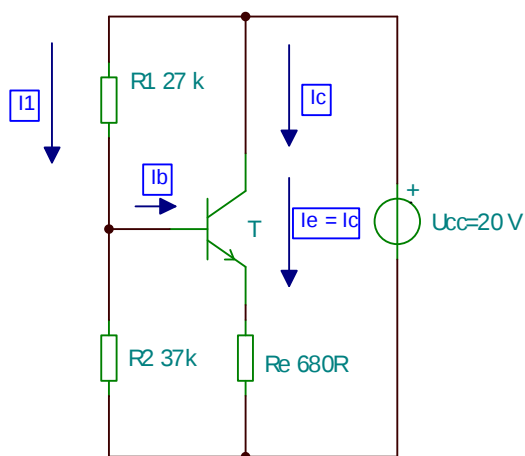
$$S = 65 \text{ mA/V}$$

$$U_{\text{sig.vst.}} = 1V/1kHz$$



obr.8 Schéma zapojení zesilovače se společným kolektorem dle př. 2

3.1 postup řešení: 1) nejdříve určíme parametry klidového pracovního bodu. Pro tento případ předpokládáme, že kapacity v obvodu představují nekonečně velkou impedanci. Nakreslíme schéma zapojení pro řešení pracovního bodu



obr.9 Schéma zapojení pro řešení parametrů pracovního bodu

Při řešení předpokládejme, že v obvodu báze je tvrdý dělič napětí, to znamená, že proud báze I_b je podstatně menší než proud děličem I_1 . Ke splnění podmínky tvrdého děliče použijeme již dříve danou podmínku, že proud I_1 je alespoň 5-10x menší než I_b .

a) stanovení proudu I_1

$$I_1 = \frac{U_{cc}}{R_1 + R_2} = \frac{20V}{27k\Omega + 37k\Omega} = 312,5\mu A$$

b) vypočítáme napětí na odporu R_2 , vytvořené proudem I_1

$$U_{R2} = I_1 \cdot R_2 = 312,5\mu A \cdot 37k\Omega = 11,56V$$

c) Vzhledem k tomu, že napětí na odporu R_2 se podle II.Kirchhoffova zákona rozdělí na napětí U_{be} a na napětí na emitorovém odporu, určíme napětí U_{Re} .

$$U_{Re} = U_{R2} - U_{be} = 11,56V - 0,732V = 10,8V$$

d) protože u zesilovače v zapojení se společným kolektorem dle obr.9 není v obvodu kolektoru zařazen kolektorový odpor, můžeme napětí mezi kolektorem a emitorem U_{ce} vypočítat podle II.Kirchhoffova zákona z pohledu na obvod zesilovače ze strany zdroje U_{cc} . Platí tedy rovnice:

$$U_{cc} - U_{ce} - U_{Re} = 0 \quad \text{tedy} \quad U_{ce} = U_{cc} - U_{Re} = 20V - 10,8V = 9,2V$$

e) současně vypočítáme z úbytku napětí na emitorovém odporu a zadané hodnoty emitorového odporu emitorový proud I_e , který budeme považovat při zanedbání proudu báze za také za proud I_c .

$$I_e = I_c = \frac{U_{Re}}{R_e} = \frac{10,8V}{680\Omega} = 15,92mA$$

f) ze zadané hodnoty proudového zesilovacího činitele h_{21} určíme velikost proudu v obvodu báze a tento proud porovnáme s velikostí proudu I_1 .

$$I_b = \frac{I_c}{h_{21}} = \frac{15,92mA}{384} = 41,47\mu A$$

Vzhledem k tomu, že vypočítaná hodnota proudu báze je téměř 8x menší než proud děličem I_1 , je možno považovat výpočet parametrů pracovního bodu za korektní. Vypočítané hodnoty porovnáme s hodnotami naměřenými v simulačním modelu na obr. 8. Naměřené a vypočítané hodnoty se liší méně než o 10%.

Porovnání parametrů pracovního bodu z vypočítaných a naměřených hodnot.

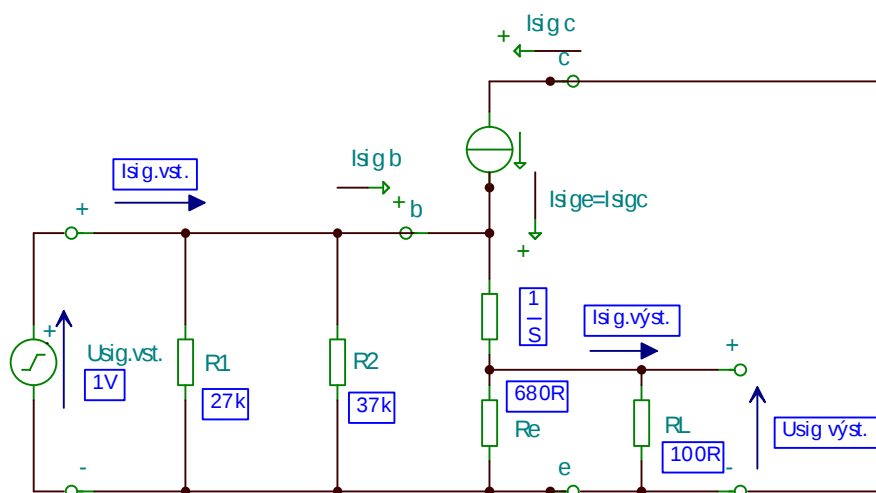
vypočítané hodnoty: Po($I_b = 41,5\mu A$, $U_{be} = 0,732V$, $I_c = 16mA$, $U_{ce} = 9,2V$)

naměřené hodnoty: Po($I_b = 46,7\mu A$, $U_{be} = 0,732V$, $I_c = 14,8mA$, $U_{ce} = 9,9V$)

3.2. V další části příkladu provedeme výpočet parametrů zesilovače v obvodu střídavého buzení.

Vypočítáme celkový odpor činné zátěže R_v , hodnotu vstupního signálového odporu $R_{sig.vst.}$, hodnotu výstupního signálového odporu $R_{sig.výst.}$, velikost napětového zesílení A_U , proudového zesílení A_I a výkonového zesílení A_P .

Při řešení vyjdeme z náhradního obvodu zesilovače pro střídavý, dynamický režim, obr.8



obr.10 Náhradní schéma zapojení emitorového sledovače pro řešení parametrů střídavého režimu

3.2.1 Vstupní signálový odpor zesilovače SC v dynamickém režimu

Z hlediska výstupního obvodu vidíme, že emitorový odpor $R_e = 680\Omega$ a pracovní zatěžovací odpor $R_L = 100\Omega$ jsou spojeny paralelně. Tento stav zapíšeme: $R_v = R_e // R_L$

výsledný zatěžovací odpor emitorového sledovače $R_v = R_e // R_L = 680\Omega // 100\Omega = 87,2\Omega$

Pro stanovení vstupního signálového odporu si dále vypočítáme poměr $\frac{1}{S}$, pro zadanou hodnotu

strmosti $S = 65 \text{ mA/V}$, je poměr $\frac{1}{S} = \frac{1}{65 \text{ mA/V}} = 15,38\Omega$

Potom $R_{sig.vst.} = R_1 // R_2 // [h_{21}(\frac{1}{S} + R_e // R_L)] = 27\text{k}\Omega // 37\text{k}\Omega // [384(87,2\Omega + 15,38\Omega)] = 15,6\text{k}\Omega // 39,39\text{k}\Omega = 11,17\text{k}\Omega$

$$R_{sig.vst.} = 11,17\text{k}\Omega$$

3.2.2 Výstupní signálový odpor zesilovače SC v dynamickém režimu

Jak vyplývá z náhradního obvodu pro řešení $R_{sig.výst.}$ na obr.4, je možno za určitých podmínek vyjádřit signálový výstupní odpor, jako paralelní kombinaci poměru $1/S$ a emitorového odporu R_e .

$$R_{sig.výst.} = \frac{1}{S} // R_e = 15,38\Omega // 680\Omega = 15\Omega$$

3.2.3 Napět'ové zesílení zesilovače SC (emitorového sledovače) v dynamickém režimu

$$\text{napět'ové zesílení zesilovače SC } A_U = \frac{U_{sig.výst.}}{U_{sig.vst.}} = \frac{I_{sig.e} \cdot R_V}{I_{sig.e} \cdot \left(\frac{1}{S} + R_V \right)} = \frac{R_V}{\frac{1}{S} + R_V}$$

$$= \frac{87,2}{15,34 + 87,2} = 0,85$$

napět'ové zesílení emitorového sledovače je $A_U = 0,85$ Napět'ový přenos $A_U(\text{dB}) = 20 \log A_U$

$$A_U(\text{dB}) = 20 \log 0,85 = -1,41 \text{ dB}$$

Ze zadané hodnoty vstupního signálového napětí $U_{sig.vst.} = 1\text{V}$ a vypočítané hodnoty napět'ového zesílení určíme hodnotu výstupního signálového napětí $U_{sig.výst.}$

$$U_{sig.výst.} = U_{sig.vst.} \cdot A_U = 1\text{V} \cdot 0,85 = 0,85\text{V} = 850 \text{ mV}$$

Vypočítaná hodnota velmi dobře koresponduje s hodnotou výstupního signálového napětí naměřenou na simulačním modelu emitorového sledovače na obr.11

$$U_{sig.výst.naměřené} = 867 \text{ mV} \quad U_{sig.výst.vypočítané} = 850 \text{ mV}$$

3.2.4 Proudové zesílení zesilovače v zapojení SC

Pro stanovení proudového zesílení vypočítáme velikost vstupního signálového proudu $I_{sig.vst.}$

$$I_{sig.vst.} = \frac{U_{sig.vst.}}{R_{sig.vst.}} = \frac{1\text{V}}{11,17\text{k}\Omega} = 89,52 \mu\text{A}$$

Naměřená hodnota v simulačním programu obr.11

$$I_{sig.vst.} = 96,1 \mu\text{A}$$

Dále stanovíme velikost výstupního signálového proudu, který prochází zatěžovacím odporem zesilovače $R_L = 100 \Omega$

$$I_{sig.výst.} = \frac{U_{sig.výst.}}{R_L} = \frac{850\text{mV}}{100\Omega} = 8,5\text{mA}$$

Naměřená hodnota v simulačním programu obr.11 $I_{sig.výst.} = 8,67 \text{ mA}$

Proudové zesílení zesilovače se společným kolektorem (SC) A_I

$$A_I = \frac{I_{sig.výst.}}{I_{sig.vst.}} = \frac{8,5mA}{0,0895mA} = 95$$

Proudový přenos $A_I(dB) = 20 \log A_I = 20 \log 95 = 39,55 \text{ dB}$

3.2.5 Výkonové zesílení zesilovače se společným kolektorem (SC) A_P

Výkonové zesílení určíme jako součin napětového a proudového zesílení

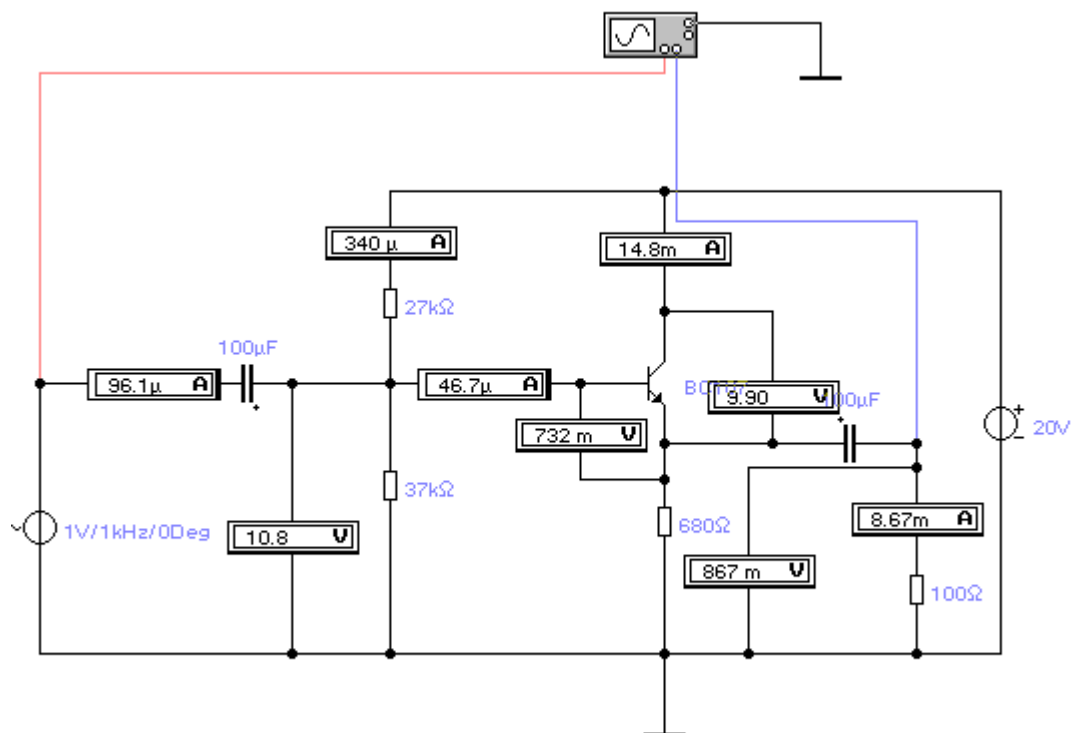
$$A_P = A_U \cdot A_I = 0,85 \cdot 95 = 80,75$$

Výkonový přenos $A_P(dB) = 10 \log A_P = 10 \log 80,75 = 19,07 \text{ dB}$

3.2.5 Závěrečné hodnocení

Pro ověření vypočítaných hodnot jsme sestrojili model zesilovače v simulačním programu Electronics Workbench. Při simulaci vznikají určité chyby, protože použitý tranzistor BC 107 nemá přesné hodnoty, např. strmosti a dalších parametrů. Rozdíl parametrů v řádech procent vzniká při výrobě, žádný tranzistor stejného typu a označení nemá úplně shodné parametry s jiným tranzistorem téže řady.

Při porovnání naměřených a vypočítaných hodnot vidíme, že mezi nimi vzniká velmi malá odchylka, což potvrzuje korektnost výpočtu. Při výpočtu jste si opět ověřili platnost zvolených početních postupů. Z celého řetězce zesilovacích stupňů nám tak již zbývá poslední stupeň a to zesilovač v zapojení se společnou bází označený SB.



obr.11 Schéma zapojení zesilovače se společným kolektorem dle př. 2

