

## Zadání praktické ročníkové- maturitní práce

**Název práce: Dvoustupňový zesilovač s kapacitní vazbou v zapojení SE**

**Úkol:** Proveďte rozbor přenosových vlastností dvoustupňového zesilovače s bipolárními tranzistory v zapojení SE.

**Při řešení úlohy proveďte :**

**1. Rozbor zadaného zapojení zesilovače**

- 1.1 Stejnoseměrné parametry zesilovacích stupňů, definujte parametry klidového pracovního bodu
- 1.2 Vlastnosti obvodů záporné zpětné vazby a její vliv na přenosovou funkci zesilovače
- 1.3 Výpočet dynamických vlastností zesilovacích stupňů s využitím náhradního obvodu zesilovačů v dynamickém režimu. Vypočítejte  $R_{sig.vst.}$ ,  $R_{sig.vyst.}$ , napěťové zesílení obvodu  $A_u$ , proudové zesílení  $A_i$ , výkonové zesílení  $A_p$ , dolní a horní mezní kmitočty zesilovače.
- 1.4 V simulačním programu Elektronik Workbench sestavte navržený zesilovač a proveďte ověření všech statických a dynamických parametrů
- 1.5 Namodelujte základní přenosové parametry v simulačním programu, výsledné hodnoty uveďte v dokumentaci maturitní práce.

**2. Na základě výpočtů a ověření funkce v simulačním programu, proveďte zhotovení funkčního vzorku**

- 2.1 Funkční vzorek zhotovte na zkušební desce a instalujte do standardní modulové krabice tak, aby vzorek umožnil výměnu jednotlivých vazebních a ostatních prvků, které mají zásadní vliv na přenosové funkce zesilovače.
- 2.2 Na zkušební vzorku proveďte měření přenosových charakteristik dle zadání a porovnejte naměřené hodnoty s hodnotami zjištěnými v simulačním programu a hodnotami vypočtenými.
- 2.3 Pomocí osciloskopu proveďte tvar výstupního signálu a proveďte zhodnocení naměřených údajů.

## 1) Popis obvodu:

Na obr.1 je nakresleno schéma zapojení dvoustupňového zesilovače s bipolárními tranzistory vodivosti NPN- BC 107 v zapojení se společným emitorem. Vazba mezi stupni je tzv.odporově kapacitní , přes elektrolytický kondenzátor  $5\mu\text{F}$ . V uvedeném zapojení jsou aplikovány dvě stejnosměrné záporné zpětné vazby a to v prvním stupni záporná zpětná vazba napěťová paralelní a ve druhém stupni záporná zpětná vazba proudová sériová.

Způsob vazby mezi oběma stupni a zavedení zpětné vazby má podstatný vliv na přenosové vlastnosti zesilovačů. Uvedené zapojení je možno použít pro zesílení harmonických signálů od nejnižších kmitočtů akustického pásma 30Hz , až do kmitočtů řádově MHz. Vzhledem k takto širokému pásmu dochází v zapojení omezení přenosové charakteristiky jak v oblasti dolních kmitočtů  $f_d$ , tak i v oblasti horních kmitočtů  $f_h$  . Protože zesilovač pracuje s velmi malou úrovní vstupního signálu , je praktické zapojení velmi citlivé na působení rušivých napětí, převážně způsobených nízkými kmitočty, nejčastěji kmitočtem sítě 50 Hz. Při konstrukci zesilovače je tedy nutné tuto skutečnost zohlednit , správným způsobem vedení přívodních vodičů, konstrukcí plošného spoje a použitím odpovídajících součástek. Přenosové vlastnosti zesilovače posuzujeme s ohledem na útlumovou charakteristiku a fázovou charakteristiku.

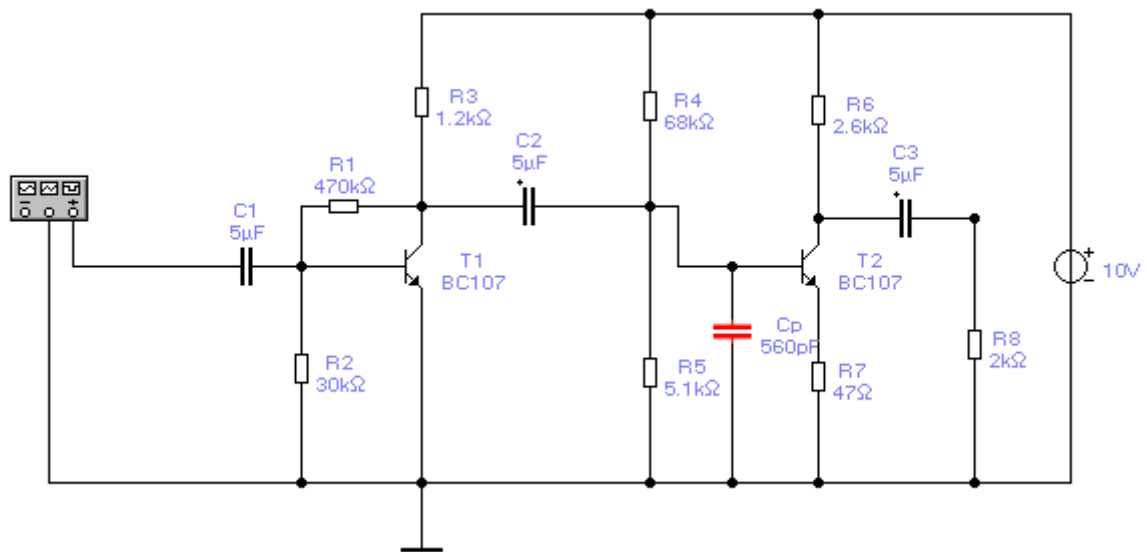
**Útlumová-přenosová** charakteristika je ovlivněna v oblasti dolních kmitočtů tzv.podélnými kapacitami obvodu, vazebními kondenzátory  $C_1, C_2, C_3$  , v oblasti horních kmitočtů celkovou příčnou kapacitou obvodu, která je dána mezielektrodovými kapacitami aktivních prvků a kapacitou spojů . V zesilovacích obvodech se tato kapacita řeší jako celková příčná kapacita  $C_p$ . Na přenos v oblasti dolních kmitočtů má dále vliv i kapacita emitorového kondenzátoru, který se v obvodech zapojuje z důvodu potlačení dynamické záporné zpětné vazby proudové. Volbou kapacity emitorového kondenzátoru je možno ovlivnit přenosovou charakteristiku zesilovače, provádí se tzv.kompenzace přenosu, většinou u širokopásmových zesilovačů.

**Fázová charakteristika** - průběh fázové charakteristiky je ovlivněn dvěma skutečnostmi. Podstatný vliv má typ zapojení zesilovačů a dále se projevuje vliv amplitově fázové konverze AFK, to je vliv vnitřních mezielektrodových kapacit tranzistorů  $C_{cb}$  v závislosti na amplitudě zesilovaného signálu. Základní teoretický fázový posuv mezi vstupním a výstupním signálem v zapojení SE je  $\pi$ , tedy  $180^\circ$ . Ve skutečnosti je tento fázový posuv vlivem již zmíněné AFK menší, změna závisí na celkovém zesílení stupně.

Vzhledem k požadavku zadání maturitní práce- vysvětlit a zdůvodnit přenosové vlastnosti zesilovače SE použijeme zapojení, kde je možné všechny podstatné závislosti popsat, vypočítat a změřit.

## 2) Postup při rozboru vlastností:

- 2.1 Stanovení stejnosměrných parametrů zesilovacích stupňů, parametry pracovního bodu  $P_0$
- 2.2 Řešení obvodů záporné zpětné vazby
- 2.3 Výpočet dynamických vlastností zesilovače
- 2.4 Metodika měření
- 2.5 Rozbor vlastností zesilovače v simulačním programu Elektronice Workbench
- 2.5 Tabulky naměřených hodnot
- 2.6 Grafické průběhy
- 2.7 Zhodnocení práce, závěrečné porovnání a rozbor.

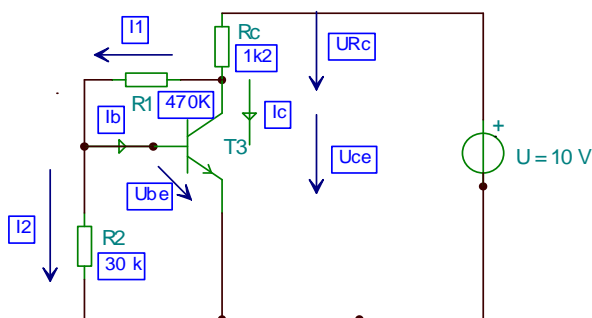


obr.1 Schéma zapojení dvoustupňového zesilovače v zapojení SE

### 2.1 Výpočet stejnosměrných parametrů zesilovačů, parametry klidového pracovního bodu $P_0$

#### 2.1.1 Stejnosměrné parametry prvního stupně

Při řešení stejnosměrných parametrů prvního stupně vyjdeme ze základního zapojení zesilovače pro obvod stejnosměrného proudu obr.2



obr.2 Schéma zapojení prvního stupně zesilovače ve stejnosměrném režimu

**Zadané parametry: Tranzistor BC 107 ;  $h_{21} = 250$ ,  $U_{cc} = 10V$ ,  $U_{be} = 0,57V$**

Pro podmínku , že  $I_c$  je podstatně větší než  $I_b$  platí, že proud rezistorem  $R_1$  ( $I_1$ ) je stejný jako proud protékající rezistorem  $R_2$  ( $I_2$ )

Podmínka řešení  $I_1 = I_2$ . Za této podmínky platí pro kolektorový obvod obvodová rovnice podle II.Kirchhoffova zákona :

$$U_{CE} = I_1 R_1 + U_{be} = I_2 R_1 + U_{be}$$

Z této rovnice vypočítáme proud děličem v obvodu báze  $I_2$

$$I_2 = \frac{U_{be}}{R_2} = \frac{0,57}{30} mA = 0,019 mA = 19 \mu A$$

Nyní vypočítáme napětí mezi emitorem a kolektorem  $U_{ce}$

$$U_{ce} = 0,019 mA \cdot 470 k\Omega + U_{be} = 9,5V$$

Napětí  $U_{ce}$  můžeme také určit z výrazu

$$U_{ce} = U_{be} \left( 1 + \frac{R_1}{R_2} \right) = 0,57 \left( 1 + \frac{470 k\Omega}{30 k\Omega} \right) = 9,5V$$

K určení klidové polohy pracovního bodu musíme dále vypočítat hodnotu kolektorového proudu  $I_c$ . Tento proud vypočítáme pomocí úbytku napětí na kolektorovém rezistoru  $R_c$ .

$$U_{Rc} = U_{CC} - U_{CE} = 10V - 9,5V = 0,5V$$

potom

$$I_c = \frac{U_{Rc}}{R_c} = \frac{0,5V}{1,2 k\Omega} = 0,416 mA$$

ze zadané hodnoty proudového zesilovacího činitele  $h_{21}$ , vypočítáme zbývající parametr  $I_b$ .

$$h_{21} = \frac{I_c}{I_b} \quad \text{potom} \quad I_b = \frac{I_c}{h_{21}} = \frac{0,416 mA}{250} = 1,66 \mu A$$

Klidová poloha pracovního bodu 1.stupně zesilovače je tedy dána:

$$P_o ( U_{be} = 0,57V ; I_b = 1,66 \mu A ; U_{ce} = 9,5V ; I_c = 416 \mu A )$$

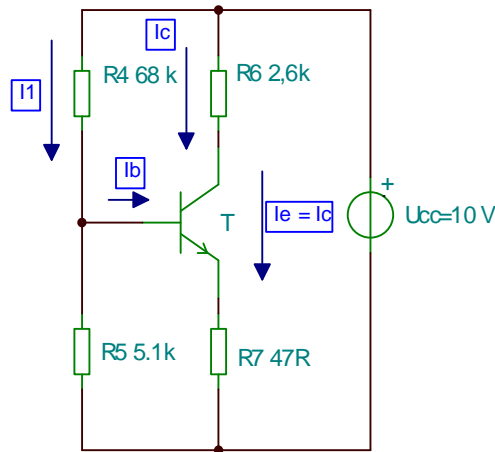
Vypočítané hodnoty se příliš neliší od hodnot naměřených na modelu zesilovače v simulačním programu Electronics Workbench.

### 2.1.2 Stanovení stejnosměrných parametrů druhého stupně.

Při řešení stejnosměrných parametrů 2. stupně jsou zadané hodnoty:

**Tranzistor BC 107 ;  $h_{21} = 250$ ,  $U_{cc} = 10V$ ,  $U_{be} = 0,57V$ .**

Zapojení zesilovacího stupně s můstkovou stabilizací pracovního bodu na obr.3. Obvodové veličiny jsou uvedeny ve schématu.



obr.3 Schéma zapojení druhého stupně zesilovače ve stejnosměrném režimu

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

a) stanovení proudu  $I_1$

$$I_1 = \frac{U_{cc}}{R_4 + R_5} = \frac{10V}{68k\Omega + 5,1k\Omega} = 0,136mA$$

b) vypočítáme napětí na odporu  $R_5$ , vytvořené proudem  $I_1$

$$U_{R5} = I_1 R_5 = 0,136 mA \cdot 5,1 k\Omega = 0,693 V$$

c) Vzhledem k tomu, že napětí na odporu  $R_5$  se podle II.Kirchhoffova zákona rozdělí na napětí  $U_{be}$  a na napětí na emitorovém odporu, určíme napětí  $U_{Re}$ .

$$U_{Re} = U_{R5} - U_{be} = 0,693 V - 0,57 V = 0,103 V$$

d) protože u zesilovače v zapojení se společným emitorem dle obr.3 je 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:

$$U_{cc} - U_{Rc} - U_{ce} - U_{Re} = 0, \text{ tedy } U_{ce} = U_{cc} - U_{Re} - U_{Rc} = 10V - 0,103V - 5,46V = 4,43V$$

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  $I_c$ .

$$I_e = I_c = \frac{U_{Re}}{R_e} = \frac{0,103V}{47\Omega} = 2,2mA$$

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

$$I_b = \frac{I_c}{h_{21}} = \frac{2,2mA}{250} = 8,8\mu A$$

Vzhledem k tomu, že vypočítaná hodnota proudu báze je podstatně 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. 4. Naměřené a vypočítané hodnoty se liší méně než o 10%.

$$P_o ( U_{be} = 0,57V ; I_b = 8,8 \mu A ; U_{ce} = 4,43V ; I_c = 2,2mA )$$

#### *Porovnání parametrů pracovních bodů z vypočítaných a naměřených hodnot.*

##### **1.stupeň**

vypočítané hodnoty:  $P_o( I_b = 1,66A, U_{be} = 0,57 V, I_c = ,0416 mA, U_{ce} = 9,5 V)$

naměřené hodnoty:  $P_o( I_b = 1,9\mu A, U_{be} = 0,496V, I_c = 0,453 mA, U_{ce} = 9,46V)$

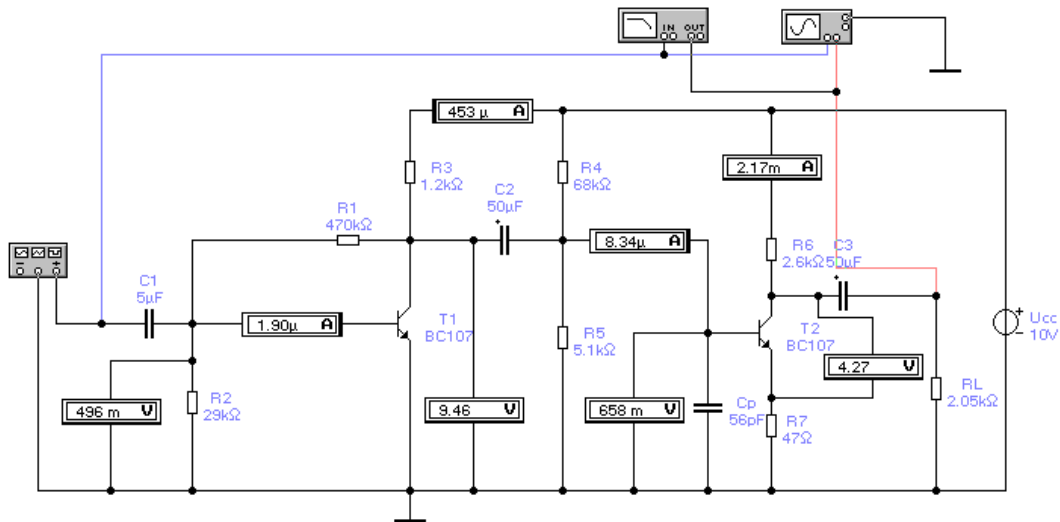
##### **2.stupeň**

vypočítané hodnoty:  $P_o( I_b = 8,8\mu A, U_{be} = 0,57 V, I_c = 2,2 mA, U_{ce} = 4,43 V)$

naměřené hodnoty:  $P_o( I_b = 8,34\mu A, U_{be} = 0,658V, I_c = 2,17 mA, U_{ce} = 4,27V)$

#### **Závěr:**

Z hlediska nastavení pracovních bodů, můžeme konstatovat, že vypočítané a naměřené hodnoty se významně neliší. Odchytky mezi vypočítanými a naměřenými hodnotami jsou způsobeny rozdílnými hodnotami parametrů použitých tranzistorů.



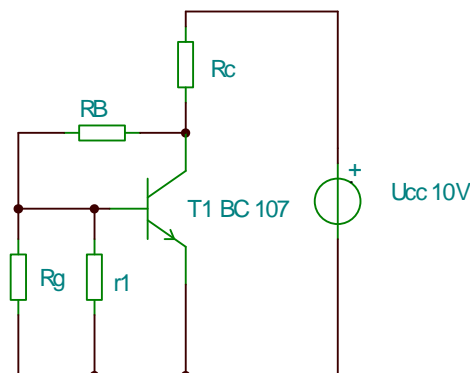
obr.4 Základní zapojení dvoustupňového zesilovače se zobrazením stejnosměrných parametrů pracovních bodů

## 2.2 Řešení obvodů zpětné vazby

V obvodech měřeného zesilovače jsou zavedeny dvě záporné zpětné vazby. Vazby byly zavedeny z důvodu teoretického rozboru vlivu záporné zpětné vazby na vlastnosti zesilovačů ve statickém i dynamickém režimu. Ve statickém režimu mají zpětné vazby vliv na stabilitu polohy pracovního bodu zesilovače a současně se významným způsobem podílí na hodnotách vstupního a výstupního odporu zesilovače a celkových hodnotách napěťového a proudového zesílení. Při řešení obvodů zpětné vazby určujeme velikost činitele zpětné vazby  $\beta$ , a současně určujeme stupeň zavedené vazby vyjádřený koeficientem N.

V další části práce je proveden rozbor zpětných vazeb zavedených v zadaném zesilovači.

### 2.2.1 Záporná zpětná vazba napěťová paralelní, zavedená v 1.stupni zesilovače



obr.5 Základní schéma zapojení obvodu napěťové záporné zpětné vazby paralelní

Vazba vzniká působením rezistoru  $R_B$ , kterým se přivádí ke vstupnímu obvodu proud, úměrný výstupnímu napětí. Hodnotu činitele zpětné vazby  $\beta$  určíme pomocí všech prvků, které v obvodu zpětné vazby působí.

$$\beta = \frac{\frac{R_g r_1}{R_g + r_1}}{\frac{R_g r_1}{R_g + r_1} + R_B} = \frac{R_g r_1}{R_g r_1 + R_B (R_g + r_1)}$$

Ve výrazu dosadíme za  $R_g$  a  $r_1$

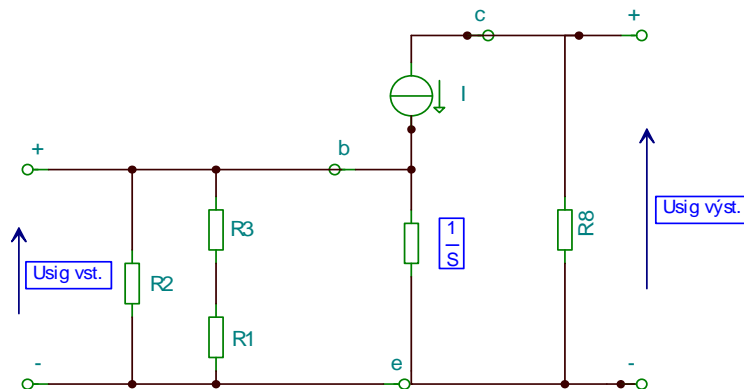
$$R_g = \frac{R_1 R_2}{R_1 + R_2} = \frac{470 \cdot 30}{470 + 30} \text{ k}\Omega = 28,2 \text{ k}\Omega$$

$$r_1 = h_{21} \frac{1}{S} = 250 \cdot 60 = 15 \text{ k}\Omega$$

$$\beta = \frac{R_g \cdot r_1}{R_g \cdot r_1 + R_B (R_g + r_1)} = \frac{28,2 \cdot 15}{28,2 \cdot 15 + (28,2 + 15)} = 0,02$$

**Stupeň zavedené záporné zpětné vazby určíme z výrazu  $N = 1 + \beta \cdot A_u$**

$$N = 1 + 0,02 \cdot 21,6 = 1,432$$



obr.6 Náhradní obvod zesilovače pro střídavý signál

Z náhradního obvodu určíme signálový vstupní odpor zesilovače  $R_{sig.vst.}$

$$R_{sig.vst.} = R_2 // (R_1 + R_c) // h_{21} \cdot \frac{1}{S}$$

Vstupní odpor přechodu báze-emitor, odpovídá odporu polovodičové diody v obvodu střídavého proudu. Pro stanovení tohoto odporu můžeme použít tzv. přibližný vzorec:



$$R_{sigd} = \frac{25mV}{I(mA)}$$

Pro stanovení tohoto odporu, musíme znát hodnotu celkového stejnosměrného proudu  $I_e$ , který přechodem prochází. Toto přiblížení můžeme použít u tranzistorů, takže v prvním přiblížení platí

$$\frac{1}{S} = \frac{25mV}{I_e mA}$$

Protože hodnotu emitorového proudu prvního stupně jsme již vypočítali, použijeme vypočtenou hodnotu  $I_e$  k určení parametru  $\frac{1}{S}$ .  $I_c = I_e = 0,416 \text{ mA}$ .

$$\frac{1}{S} = \frac{25mV}{0,416mA} = 60\Omega$$

hodnotu proudového zesilovacího činitele jsme použili při řešení stejnosměrných parametrů  $h_{21} = 250$ .

Pro výpočet signálového vstupního odporu prvního stupně zesilovače použijeme vypočítané a zadané hodnoty:

$$R_2 = 30k\Omega, R_1 = 470k\Omega, R_3 = 1,2k\Omega, h_{21} = 250, \frac{1}{S} = 60\Omega$$

$$R_{sig.vst.} = R_2 // (R_1 + R_c) // h_{21} \cdot \frac{1}{S} = 30k\Omega // 470k\Omega // h_{21} \cdot 60 = 9,8k\Omega$$

Napět'ové zesílení obvodu bez zavedení záporné zpětné vazby  $A_U$  je vyjádřeno vztahem

$$A_U = \frac{U_{sig.vyst.}}{U_{sig.vst.}} = - \frac{I_{sigc} \cdot (R_c // R_L)}{I_{sigc} \cdot \frac{1}{S}} = -(R_c // R_L) \cdot S$$

(záporné znaménko definuje fázový posuv výstupního napětí proti vstupnímu napětí o  $\pi$  tj. o  $180^\circ$ )

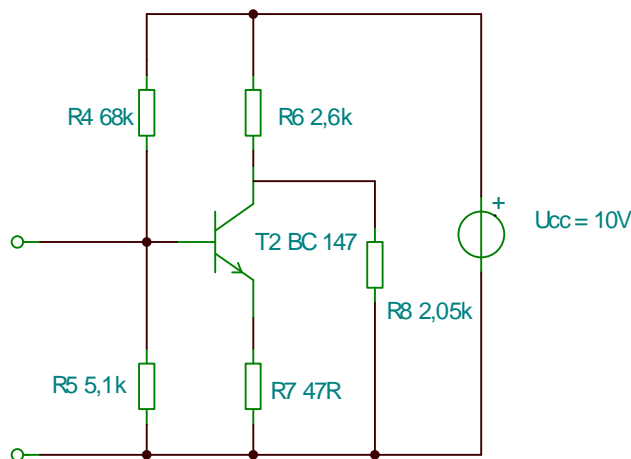
Hodnotu zatěžovacího odporu  $R_L$  nahradíme ve výrazu vstupním odporem druhého stupně, který má hodnotu  $3,4k\Omega$ . (vypočítáme v následující části výpočtu vlastností 2.stupně)

$$A_U = - (R_c // R_L) \cdot S = -1,3 k\Omega \cdot 16,6 \text{ mS} = 21,6$$

toto je zesílení zesilovače bez záporné zpětné vazby

Záporná zpětná vazba zavedená v prvním stupni zesilovače zmenšuje  $R_{sig.vst.}$ ,  $R_{sig.výst.}$  a současně klesá i napěťové zesílení  $A_U$  a proudové zesílení  $A_I$ . tato vazba je výhodná vzhledem k malé hodnotě  $R_{sig.výst.}$  při proudovém buzení vstupu u koncových zesilovacích stupňů. Zavedením této vazby se zlepšuje stabilita klidového pracovního bodu  $P_O$ .

### 2.2.2 Záporná zpětná vazba proudová sériová, zavedená ve 2.stupni zesilovače



obr.7 Schéma zapojení druhého stupně zesilovače pro stanovení obvodových parametrů v dynamickém režimu

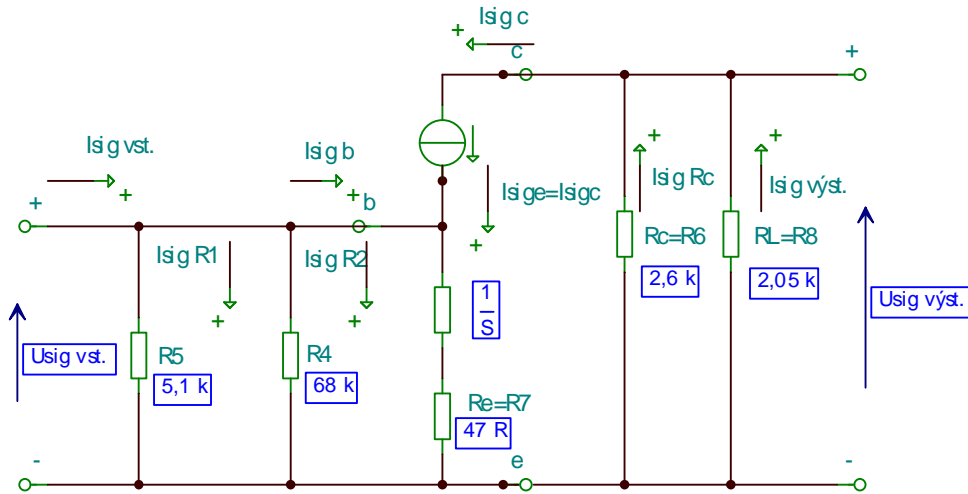
Záporná zpětná vazba proudová sériová vzniká na neblokovaném emitorovém rezistoru  $R_7$  při průtoku emitorového proudu. Úbytek napětí působí proti vstupnímu signálu a zmenšuje tak okamžitou hodnotu napětí  $U_{be}$ , tím i hodnotu bázového proudu  $I_b$  a v jeho důsledku i kolektorového proudu  $I_c$ .

Činitel zpětné vazby  $\beta$  určíme stejně jako u prvního stupně z obvodových parametrů zesilovače.

$$\beta = \frac{R_{E'}}{R_Z} \quad \text{hodnotu } R_{E'} \text{ určíme z náhradního obvodu zesilovače pro střídavý proud, jako}$$

paralelní kombinaci rezistoru  $R_E = R_7$  a všech uplatňujících se rezistorů náhradního obvodu.

**hodnotu  $R_Z$**  určíme pomocí kolektorového odporu  $R_C = R_6$  a všech paralelních rezistorů v náhradním obvodu dle obr.8



obr.8 Náhradní obvod zesilovače pro střídavý proud

$$R_{E'} = \left( R_e + \frac{1}{S} \right) // R_5 // R_4 = (47\Omega + 11,4\Omega) // 5,1\text{ k}\Omega // 68\text{ k}\Omega = 58\Omega$$

$$R_Z = R_C // R_L = R_6 // R_8 = 2,6\text{ k}\Omega // 2,05\text{ k}\Omega = 1,13\text{ k}\Omega$$

Vypočítané hodnoty  $R_{E'}$  a  $R_Z$  dosadíme do výrazu pro výpočet činitele zpětné vazby  $\beta$

$$\text{Činitel zpětné vazby} \quad \beta = \frac{R_{E'}}{R_Z} = \frac{58\Omega}{1130\Omega} = 0,05$$

$$\text{Stupeň zpětné vazby ve 2.stupni} \quad N_2 = 1 + \beta A_U = 1 + 0,05 \cdot 19,4 = 1,97$$

Zavedením záporné zpětné vazby se zvětší  $R_{\text{sig.vst.}}$ ,  $R_{\text{sig.vyst.}}$ , napěťové zesílení se podstatně zmenší a kmitočtové pásmo zesilovače se rozšíří. Tato vazba je vhodná pro obvody ve kterých je potřebný velký  $R_{\text{sig.vst.}}$ , například pro obvody předzesilovačů, které jsou buzeny ze zdroje s malým vnitřním odporem  $R_i$ . Neblokovaným emitorovým odporem se zlepšuje stabilita nastavení pracovního bodu.



Hodnotu zatěžovacího odporu  $R_L$  nahradíme ve výrazu vstupním odporem druhého stupně, který má hodnotu  $3,35k\Omega$ . ( vypočítáme v následující části výpočtu vlastností 2.stupně)

$$A_U = - (R_C // R_L) \cdot S = -0,957 k\Omega \cdot 16,6 mS = 14,66$$

Zesílení prvního stupně po zavedení záporné zpětné vazby  $A_U'$  určíme pomocí zesílení před zavedením záporné zpětné vazby  $A_U$  a vypočítaného stupně zpětné vazby  $N_1$

$$A_U' = \frac{A_U}{1 + \beta A_U} = \frac{A_U}{N} = \frac{16}{1,432} = 10,24$$

Napěťové zesílení prvního stupně zesilovače po zavedení záporné zpětné vazby napěťové paralelní má hodnotu 10,24, zisk prvního stupně  $A_U(\text{dB})$

$$A_U(\text{dB}) = 20 \log A_U' = 20 \log 10,24 = 20,2\text{dB}$$

### 2.3.2 Řešení dynamických parametrů 2.stupně zesilovače

#### 2.3.21 Vstupní odpor zesilovací součástky-tranzistoru $h_{11}$

$$h_{11e} = \left( \frac{1}{S} + R_e \right) h_{21e} = (11,4 + 47) \cdot 250 = 14,6k\Omega$$

$$\text{poměr } \frac{1}{S} = \frac{25mV}{I_e} = \frac{25mV}{2,2mA} = 11,4\Omega$$

ve vztahu pro výpočet  $h_{11e}$  je vidět, že poměr  $\frac{1}{S}$  není možno zanedbat. Pokud není zadána hodnota strmosti  $S$ , pak

$$h_{11e} = R_e \cdot h_{21e} = 47\Omega \cdot 250 = 11,5 k\Omega$$

#### 2.3.22 Vstupní odpor 2.stupně zesilovače v dynamickém režimu $R_{\text{sig.vst.}}$

$$R_{\text{sig.vst.2}} = R_4 // R_5 // h_{11e} = 68 k\Omega // 5,1 k\Omega // 11,5 k\Omega = 3,35k\Omega$$

Vidíme, že se vstupní odpor zesilovače podstatně zvětšil

**Záporná zpětná vazba proudová sériová tedy zvyšuje vstupní odpor zesilovače.**

2.3.23 Výstupní odpor zesilovače  $R_{sig.výst.}$  se zavedením záporné zpětné vazby proudové nezměnil.

$$R_{sig.výst.} = R_C = 2,6k\Omega$$

2.3.24 Napěťové zesílení zesilovače  $A_U$  po zavedení záporné zpětné vazby :

$$A_U = \frac{U_{sig.výst.}}{U_{sig.vst.}} = \frac{-I_{sig.c.} \cdot (R_C // R_L)}{I_{sig.c.} \cdot \left( \frac{1}{S} + R_e \right)} = \frac{-(R_C // R_L)}{\frac{1}{S} + R_e}$$

Protože poměr  $\frac{1}{S}$  proti hodnotě emitorového odporu  $R_e$  není zanedbatelný určíme napěťové zesílení jako poměr celkové účinné zátěže tranzistoru k hodnotě odporu emitoru v součtu s poměrem  $1/S$ .

$$A_U' = \frac{-(R_C // R_L)}{R_e + \frac{1}{S}} = \frac{1130}{58,4} = -19,4$$

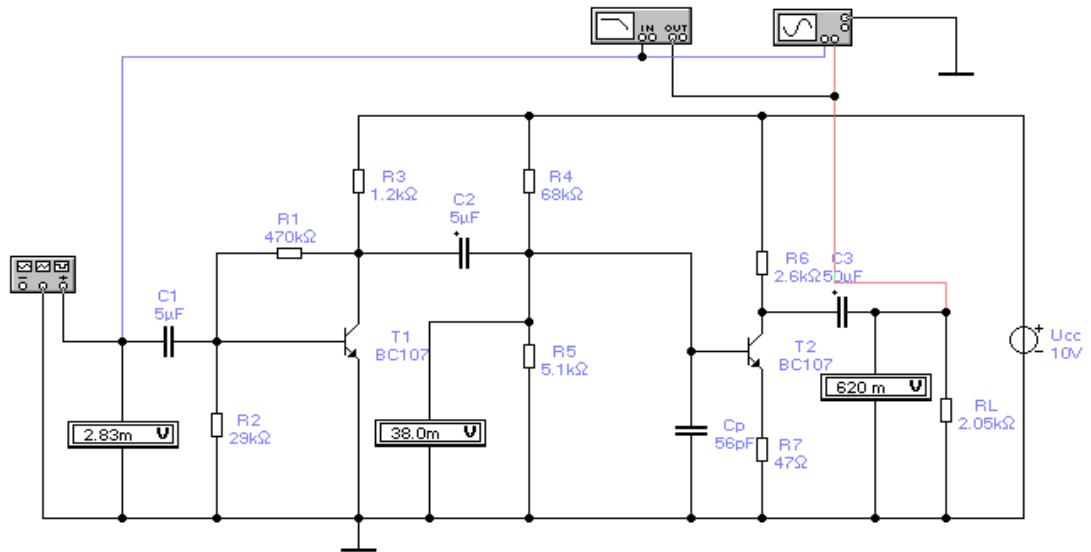
Napěťové zesílení zesilovače po zavedení záporné zpětné vazby má hodnotu -19,4  
Napěťový zisk druhého stupně zesilovače po zavedení záporné zpětné vazby  $A_{U2}(\text{dB})$

$$A_{U2}(\text{dB}) = 20 \log A_U' = 20 \log 19,4 = 25,75 \text{ dB}$$

Celkové zesílení zesilovače  $A_C = A_1 \cdot A_2 = 10,24 \cdot 19,4 = 198,65$

Celkový zisk zesilovače  $A_U(\text{dB}) = A_{U1}(\text{dB}) + A_{U2}(\text{dB}) = 20,2 + 25,75 = 45,96 \text{ dB}$

V další části provedeme kontrolu jak se zavedení takto silné záporné zpětné vazby projevilo v celkovém chování zesilovače, v simulačním programu:



obr.10 Schéma zapojení dvoustupňového zesilovače v simulačním programu Elektronice Workbench

Na obr.10 odečteme efektivní hodnotu výstupního signálového napětí,

$$U_{sig.výst.} = 620mV$$

Vstupní úroveň signálu  $U_{sig.vst.} = 2,83 mV$

Celkové napět'ové zesílení vypočítané z naměřených hodnot

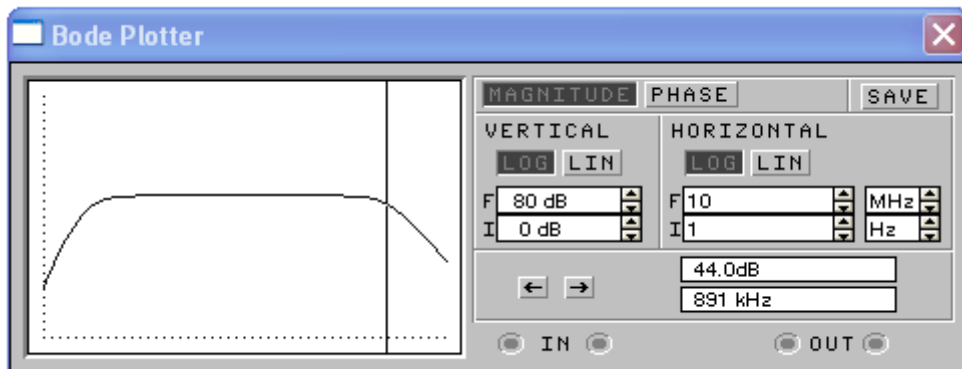
$$A_U = \frac{U_{sig.výst.}}{U_{sig.vst.}} = \frac{620mV}{2,9mV} = 214 \quad (\text{vypočítaná hodnota } 199)$$

Napět'ový přenos  $A_U(dB) = 20 \log A_U = 20 \log 214 = 46,6 dB$  (vypočítaná hodnota 46 dB)

Shodu obou výsledků jak teoretického výpočtu, tak i výpočtu z naměřených hodnot potvrzuje přenosová charakteristika na obr.11 . Kurzor nastavený na kmitočet vstupního signálu 1kHz, ukazuje na přenos 47 dB. Všechny hodnoty napět'ového přenosu vykazují velmi dobrou shodu. Šířka pásma zesilovače po zavedení záporné zpětné vazby je ovlivněna hodnotou podélných vazebních prvků  $C_2$  ,  $C_3$  a hodnotou příčné paralelní kapacity  $C_p$ .

Vliv těchto prvků na přenosové vlastnosti zesilovače byl předmětem měření, a je uveden v jednotlivých grafech- přenosových charakteristikách.

V textu uvedeme jeden příklad přenosové charakteristiky pro  $C_1 = C_2 = C_3 = 5\mu F$  a  $C_p = 56 pF$ .

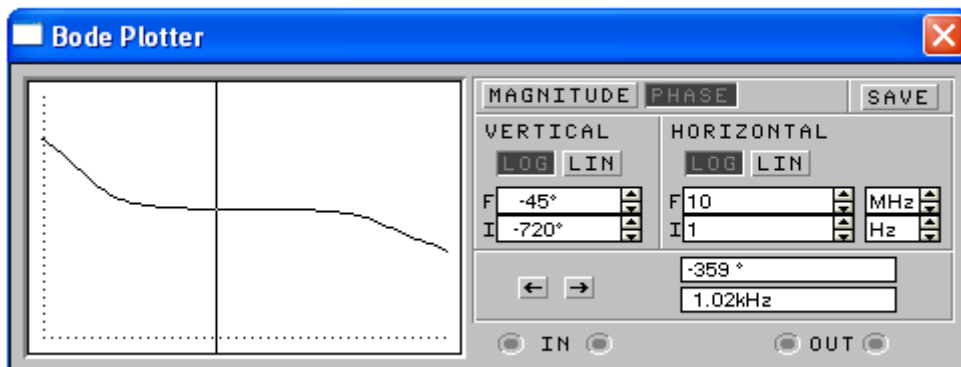


obr.11 Přenosová charakteristika zesilovače s výše uvedenými hodnotami vazebních prvků

Horní mezní kmitočet  $f_h$  pro pokles přenosu o -3dB je 891 kHz . provedeme kontrolu výpočtem

$$f_h = \frac{1}{2\pi R_{sig.vst} \cdot C} = \frac{1}{2\pi \cdot 3,35k\Omega \cdot 56pF} = 848kHz$$

Na obr.12 je zobrazena fázová charakteristika zesilovače. Vzhledem k tomu, že zesilovač je dvoustupňový v zapojení SE je teoretický fázový posuv na kmitočtu 1kHz  $\varphi = 360^\circ$

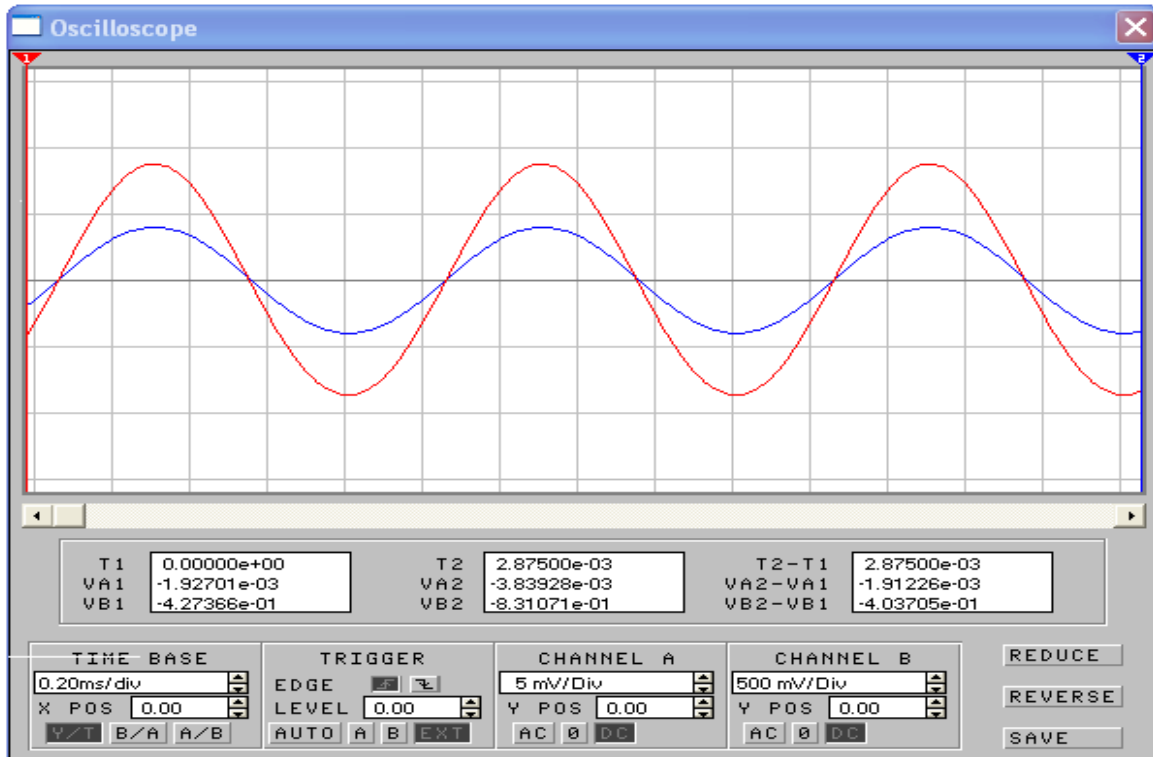


obr.12 Fázová charakteristika dvoustupňového zesilovače v zapojení SE

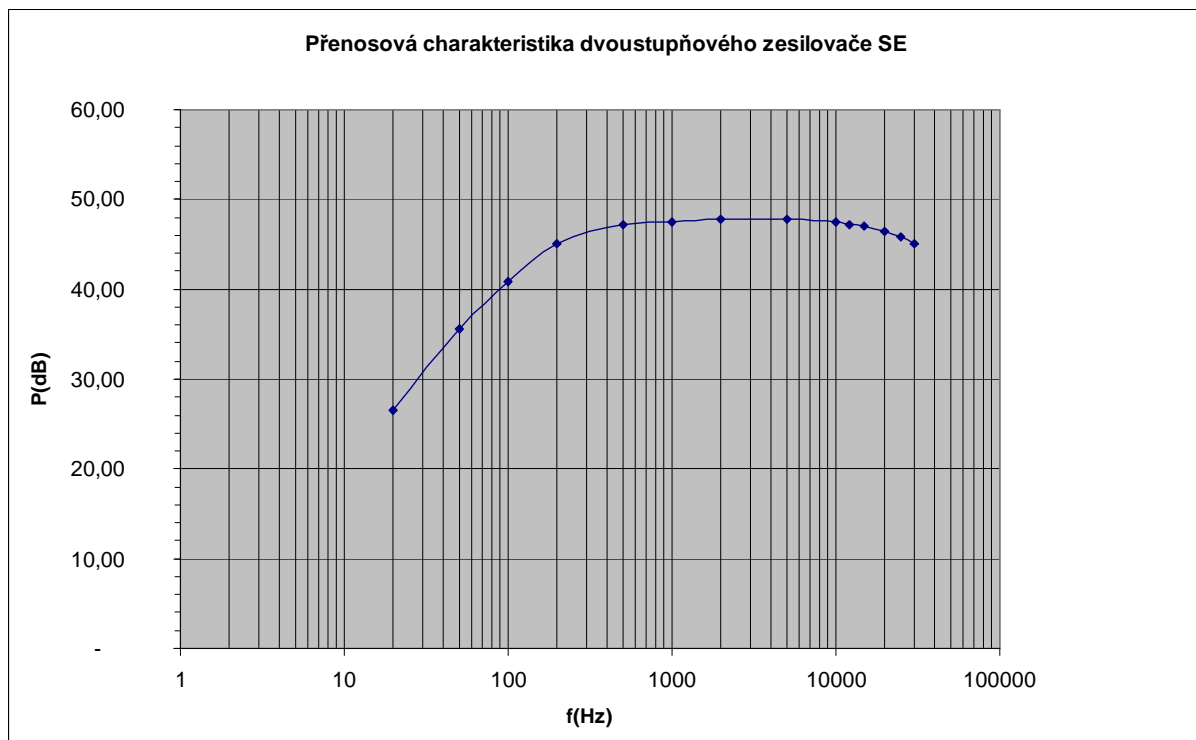
Výsledná hodnota odpovídá teoretickému předpokladu



Na obr.13 je zobrazen oscilogram vstupního( modrého) a výstupního (červeného) signálu



obr.13 Průběh výstupního a vstupního signálu zobrazený dvoukanalovým osciloskopem



obr.14 Přenosová charakteristika měřeného zesilovače pro  $C_1 = 100\text{nF}$ ,  $C_2 = 5\mu\text{F}$ ,  $C_3 = 5\mu\text{F}$ ,  $C_p = 6,8\text{ nF}$

## Tabulky naměřených hodnot

<b>Měření 1</b> $C_v = 2,2\mu F$ $C_p = 560pF$			<b>Měření 2</b> $C_v = 2,2\mu F$ $C_p = 4,7nF$			<b>Měření 3</b> $C_v = 2,2\mu F$ $C_p = 68pF$		
f [Hz]	Au [dB]	Uo [mV]	f [Hz]	Au [dB]	Uo [mV]	f [Hz]	Au [dB]	Uo [mV]
10	40,3	207	10	40,42	210	10	40,23	207
15	45,34	370	15	45,34	370	15	45,58	380
20	47,6	480	20	47,6	480	20	47,6	480
30	49,25	580	30	49,25	580	30	49,25	580
50	49,96	630	50	50,24	650	50	50,37	660
100	50,88	700	100	50,88	700	100	50,82	695
200	51	710	200	51	710	200	51	710
500	51,13	720	500	51,13	720	500	51,13	720
800	51,13	720	800	51,13	720	800	51,13	720
1000	51,13	720	1000	51,13	720	1000	51,13	720
2000	51,13	720	2000	51,13	720	2000	51,13	720
4000	51,13	720	4000	51,13	720	4000	51,13	720
8000	51	710	8000	50,88	700	8000	51,13	720
10000	50,94	705	10000	50,76	690	10000	51,13	720
20000	50,88	700	20000	49,97	630	20000	51	710
40000	50,82	695	40000	47,96	500	40000	50,94	705
80000	50,5	670	80000	43,26	291	80000	50,88	700
100000	50,24	650	100000	41,58	240	100000	50,76	690
200000	48,3	520	200000	35,56	120	200000	49,83	620
400000	42,5	267	400000	28,63	54	400000	47,42	470
800000	34,8	110	800000	22,28	36	800000	41,25	231
1000000	32,15	81	1000000	21,21	23	1000000	39,23	183
2000000	26,02	40	2000000	20,83	22	2000000	32,77	87
4000000	24,86	35	4000000	20,42	21	4000000	24,86	35
8000000	24,61	34	8000000	20,42	21	8000000	20	20
10000000	24,35	33	10000000	20,42	21	10000000	20	20

Teoretické zpracování zadání ročníkové práce  
Tranzistorový dvoustupňový zesilovač v zapojení se společným emitorem

<b>Měření 5</b> $C_v = 22\mu\text{F}$ $C_p = 4,7\text{nF}$			<b>Měření 6</b> $C_v = 22\mu\text{F}$ $C_p = 68\text{pF}$			<b>Měření 7</b> $C_v = 220\text{nF}$ $C_p = 560\text{pF}$		
f [Hz]	Au [dB]	Uo [mV]	f [Hz]	Au [dB]	Uo [mV]	f [Hz]	Au [dB]	Uo [mV]
10	49,69	610	10	40,55	213	10	13,98	10
15	50,5	670	15	45,58	380	15	14,81	11
20	50,63	680	20	47,6	480	20	16,9	14
30	50,88	700	30	49,25	580	30	21,94	25
50	51	710	50	50,37	650	50	30,24	65
100	51,13	720	100	50,82	690	100	39,38	186
200	51,13	720	200	51	710	200	46,44	420
500	51,13	720	500	51,13	720	500	50,1	640
800	51,13	720	800	51,13	720	800	50,63	680
1000	51,13	720	1000	51,13	720	1000	50,76	690
2000	51,13	720	2000	51,13	720	2000	51	710
4000	51,13	720	4000	51,13	720	4000	51,13	720
8000	50,88	700	8000	51,13	720	8000	51,13	720
10000	50,76	690	10000	51,13	720	10000	51	710
20000	49,97	630	20000	51	710	20000	50,88	700
40000	47,96	500	40000	50,88	700	40000	50,76	690
80000	43,35	294	80000	50,76	690	80000	50,37	660
100000	41,69	243	100000	50,63	680	100000	50,24	650
200000	35,78	123	200000	49,83	620	200000	48,3	520
400000	28,94	56	400000	47,23	460	400000	42,11	255
800000	23,23	29	800000	41,14	228	800000	34,4	105
1000000	22,92	28	1000000	39,37	186	1000000	31,6	76
2000000	22,23	26	2000000	32,76	87	2000000	20,83	22
4000000	22,23	26	4000000	24,86	35	4000000	14,81	11
8000000	22,23	26	8000000	20,42	21	8000000	13,98	10
10000000	22,23	26	10000000	20	20	10000000	13,98	10

Teoretické zpracování zadání ročníkové práce  
Tranzistorový dvoustupňový zesilovač v zapojení se společným emitorem

Měření 8  $C_v=220\text{nF}$   $C_p=4,7\text{nF}$

f [Hz]	Au [dB]	Uo [mV]
10	13,98	10
15	14,81	11
20	16,9	14
30	21,94	25
50	30,24	65
100	39,23	183
200	46,02	400
500	49,83	620
800	50,5	670
1000	50,76	690
2000	51	710
4000	51	710
8000	50,88	700
10000	50,63	680
20000	49,83	620
40000	47,78	490
80000	43,14	288
100000	41,58	240
200000	35,56	120
400000	28,3	52
800000	18,59	17
1000000	16,26	13
2000000	13,98	10
4000000	13,98	10
8000000	13,98	10
10000000	13,98	10

Měření 9  $C_v=220\text{nF}$   $C_p=68\text{pF}$

f [Hz]	Au [dB]	Uo [mV]
10	15,56	12
15	16,26	13
20	17,5	15
30	21,94	25
50	29,97	63
100	39,08	180
200	49,24	410
500	49,83	620
800	50,5	670
1000	50,76	690
2000	51,13	720
4000	51,13	720
8000	51,13	720
10000	51,13	720
20000	51	710
40000	50,94	705
80000	50,88	700
100000	50,63	680
200000	49,83	620
400000	47,23	460
800000	41,25	231
1000000	39,37	186
2000000	32,57	85
4000000	29,23	29
8000000	14,81	11
10000000	14,81	11