

PŘEDZESILOVAČE

NÍZKOFREKVENČNÍ ZESILOVAČE – ÚVOD DO PROBLÉMU

Nízkofrekvenční zesilovače se navrhují pro zesilování signálů v kmitočtovém pásmu do několika set kilohertz, pro audiopásmo obvykle od 30 Hz do 20 kHz, pro méně náročné účely i pro pásmo užší.

Podle určení se dělí na:

■ předzesilovače

■ korekční zesilovače

■ koncové zesilovače

Předzesilovače používáme k dvěma základním účelům:

- 1) sejmutí signálu z čidel (antén, termočlánků, krystalových výbrusů ap.)
- 2) zesílení vstupních signálů na úroveň, schopnou dalšímu zpracování (úprava kmitočtového pásma, korekce amplitud, charakteristik a p.)

U předzesilovačů musíme hlavně dbát na provedení prvních stupňů, protože ty nám nejvíce ovlivňují šumové vlastnosti zesilovače.

Pro velké vstupní odpory (např. pro kondenzátorové mikrofony) se volí na vstupu tranzistory řízené elektrickým polem (např. KF 521), pro běžné vstupní odpory 1 - 10kΩ křemíkové nebo germaniové tranzistory s malým šumem, např. KC 509, BC 179 a j. a nastavujeme pracovní bod do optimální oblasti podle údajů výrobce.

Pro malé vstupní odpory, např. pro antény, termočlánky a p. používáme na vstupu zapojení se společnou bází.

ZESILOVACÍ STUPNĚ S BIPOLÁRNÍMI TRANZISTORY

1) Tranzistorový stupeň se společným emitorem

Společnou elektrodou vstupního a výstupního obvodu je emitor. Schéma zapojení je na obr.

Napětový přenos $A_U = \frac{u_2}{u_1}$ se určí z rovnic

$$u_1 = h_{11e} \cdot i_b + h_{12e} \cdot u_2$$

$$i_C = h_{21e} \cdot i_b + h_{22e} \cdot u_2$$

$$u_2 = -R_x \cdot i_C$$

Řešením rovnic dostaneme $A_U = -\frac{h_{21e} \cdot R_x}{h_{11e} + \Delta h_e \cdot R_x}$, kde $\Delta h_e = h_{11e} \cdot h_{22e} - h_{12e} \cdot h_{21e}$

Pro $R_x = 0$ je $A_{U\min} = 0$

pro $R_x \rightarrow \infty$ je $A_{U\max} = -\frac{h_{21e}}{\Delta h_e}$

V praxi velmi často platí, že $R_x \ll \frac{1}{h_{22e}}$ a $h_{12e} \cdot h_{21e} \cdot R_x \ll h_{11e}$. Potom je napěťový přenos dán vztahem

$A_U = -\frac{h_{21e}}{h_{11e}} \cdot R_x$. Znaménko minus znamená, že výstupní napětí má opačné znaménko než napětí vstupní, čili že dané zapojení otáčí napěťovou fází o 180°. Největší napěťové zesílení je u tranzistoru s velkým proudovým činitelem h_{21e} a malým vstupním odporem nakrátko. Nejvyšší hodnota bývá řádu stovek až tisíců.

Proudový přenos je definován vztahem $A_i = \frac{i_C}{i_b}$. Vypočítá se z rovnic

$$i_C = h_{21e} \cdot i_b + h_{22e} \cdot u_2$$

$$u_2 = i_C \cdot R_x$$

Dostaneme $A_i = \frac{h_{21e}}{1 + h_{22e} \cdot R_x}$

Minimální proudový přenos je při $R_x \rightarrow \infty$, t.j. $A_i = 0$. Maximální proudový přenos je při $R_x = 0$, potom $A_{i\max} = h_{21e}$.

Výkonový přenos je definován $A_P = \frac{P_2}{P_1} = A_U \cdot A_i = -\frac{h_{21e}^2 \cdot R_x}{h_{11e} + (\Delta h_e + h_{11e} \cdot h_{22e}) R_x + h_{22e} \cdot R_x^2}$

Pro $R_x = 0$ i $R_x \rightarrow \infty$ je $A_P = 0$.

Pro malé odpory R_x je $A_P \approx -\frac{h_{21e}^2}{h_{11e}} \cdot R_x$.

Při velkých R_x je $A_P \approx -\frac{h_{21e}^2}{\Delta h_e \cdot h_{22e}} \cdot \frac{1}{R_x}$.

Výkon se zvětšuje s druhou mocninou parametru h_{21e} .

Vstupní odpor je dán vztahem

$$r_1 = \frac{u_1}{i_b} \quad \text{a určí se z rovnic} \quad u_1 = h_{11e} \cdot i_b + h_{12e} \cdot u_2$$

$$i_c = h_{21e} \cdot i_b + h_{22e} \cdot u_2$$

$$u_2 = -i_c \cdot R_x$$

$$\text{Řešením těchto rovnic dostaneme} \quad r_1 = \frac{h_{11e} + \Delta h_e \cdot R_x}{1 + h_{22e} \cdot R_x} = \frac{\Delta h_e + h_{11e} \cdot G_x}{h_{22e} + G_x}$$

Pro $R_x = 0$ a $R_x \rightarrow \infty$ je $r_{1\max} = h_{11e}$ a $r_{1\min} = \frac{\Delta h_e}{h_{22e}}$. Tento vstupní odpor nezahrnuje vliv napájecího odporu v bázi.

Výstupní odpor je definován vztahem $r_2 = \frac{u_2}{i_c}$ a určí se z rovnic

$$u_1 = h_{11e} \cdot i_b + h_{12e} \cdot u_2$$

$$u_1 = -i_b \cdot R_g$$

$$i_c = h_{21e} \cdot i_b + h_{22e} \cdot u_2$$

Řešením rovnic dostaneme vztah $r_2 = \frac{h_{11e} + R_g}{\Delta h_e + h_{22e} \cdot R_g}$. V mezních případech pro $R_g = 0$ a $R_g \rightarrow \infty$ je $r_{2\max} = \frac{h_{11e}}{\Delta h_e}$ a $r_{2\min} = \frac{1}{h_{22e}}$.

Uvedený vztah nezahrnuje kolektorový odpor R_C . Skutečný výstupní odpor je $R_{\text{výst}} = \frac{r_2 \cdot R_C}{r_2 + R_C}$. Často ovšem platí, že $r_2 \gg R_C$ a potom je $R_{\text{výst}} \approx R_C$.

Tento odpor je nutno rozlišovat od skutečného zatěžovacího odporu R_Z . Odpor R_C je odpor v kolektoru řešeného stupně a odpor R_Z je zatěžovací odpor řešeného stupně a paralelně vstupní odpor následujícího stupně.

$$R_Z = \frac{R_C \cdot r_1^{(2)}}{R_C + r_1^{(2)}}$$

Vstupní kapacita stupně v zapojení SE je dána vztahem $C_{\text{vst}} = C_{BE} + C_{BC}(1 + A_u)$

kde C_{BE} je kapacita báze - emitor tranzistoru. C_{BC} je průchozí kapacita tranzistoru. Tento druhý člen má rozhodující vliv u stupňů s velkým zesílením.

$$C_{\text{výst}} = C_{\text{CE}} + \frac{h_{21e} \cdot C_{\text{BC}}}{1 + \frac{h_{11e}}{R_g}}$$

Výstupní kapacita se určí ze vztahu . Obvykle bývá $h_{11e} \gg R_g$, potom $C_{\text{výst}} \approx C_{\text{CE}}$.

Jen v případě proudového buzení je $h_{11e} \ll R_g$ a potom má druhý člen tvar $h_{21e} \cdot C_{\text{BC}}$.

2) Tranzistorový zesilovací stupeň se společným kolektorem - SC

V katalogu udává výrobce pro tranzistory pouze v zapojení SE. Používáme-li tranzistor v zapojení SC nebo SB, přepočteme parametry pro zapojení SE na parametry pro zapojení SC (SB) a tyto parametry dosazujeme do vzorců pro A_U , A_i , A_p , r_1 , r_2 .

Dosažením přepočtených vztahů do vzorců pro A_U dostaneme:

pro $R_z = 0$ je $A_{U\text{min}} = 0$. Pro $R_z \rightarrow \infty$ je $A_{U\text{max}} = 1$. Napěťový přenos dosahuje maximálně 1, znaménko je kladné, t.zn. zapojení neotáčí fázi napětí.

Proudový přenos A_i je největší při $-(1+h_{21e})$ a $R_z < 1/h_{22e}$. S rostoucím R_z proudový zesilovací činitel klesá.

Výkonové zesílení A_p má největší hodnotu číselně rovnou parametru h_{21e} . Závislost vstupního odporu na zatěžovacím odporu a výstupního odporu na odporu R_g je uvedena na obr.

Výstupní impedance unipolárního zesilovač v zapojení SC.

Pro určení výstupní impedance odpojíme zátěž a předpokládáme, že na výstupních svorkách je připojen externí zdroj o napětí u_2 , který protlačuje do zesilovače proud i .

Velikost proudu je

$$i = \frac{u_2 + \mu \cdot u_{\text{GB}}}{R_i} \approx \frac{u_2(1 + \mu)}{R_i}, \text{ protože } u_{\text{GB}} \approx u_2.$$

Výstupní impedance mezi emitorem a je společnou svorkou je

$$r_2 = \frac{u_2}{i} = \frac{R_i}{1 + \mu} \approx \frac{R_i}{\mu} = \frac{1}{\beta}, \text{ protože platí } \beta = \mu.$$

Zatěžovací impedance $R_z = R_E$ je připojena k impedanci r_2 paralelně.

Vstupní impedance.

$$i_1 = \frac{u_1 - u_2}{R_g} = \frac{u_1 - A u_1}{R_g} = \frac{u_1(1 - A)}{R_g}$$

Do vstupu teče proud

Odtud vstupní odpor $r_1 = \frac{u_1}{i_1} = \frac{R_g}{1-A}$. Pro $A \rightarrow 1$ je $R_g \rightarrow \infty$.

Vstupní odpor tranzistoru je v tomto zapojení o tři řády větší, než odpor h_{11e} a je ovlivňován hlavně proudovým zesilovacím činitelem.

Výstupní odpor je pro $R_g = 0$ roven h_{11e}/h_{21e} a pro $R_g \rightarrow \infty$ je $1/h_{22e}$.

Tento stupeň se také nazývá emitorový sledovač, protože emitorové napětí sleduje fázi vstupního napětí. Napěťový přenos je vždy < 1 . Vstupní odpor je tím větší a výstupní tím menší, čím je větší h_{21e} .

3) Tranzistorový stupeň se společnou bází - SB

Teoreticky se hodnota napěťového přenosu liší málo od zapojení SE, pouze zde není fázový posuv mezi vstupním a výstupním napětím. Pro $R_z \rightarrow \infty$ je napěťový přenos přibližně $h_{21e}/\Delta h_e$ a pro $R_z = 0$ je napěťový přenos roven 0. Závislost napěťového zesílení A_U na R_z je na obr. Proudové přenosy pro $R_z = 0$ jsou

$A_i = -\frac{h_{21e}}{1+h_{21e}}$ a pro $R_z \rightarrow \infty$ je $A_i = 0$. Výkonové zesílení v zapojení SB se pohybuje ve stovkách.

Vstupní odpor má pro $R_z = 0$ hodnotu h_{11e}/h_{21e} a pro $R_z \rightarrow \infty$ je $\Delta h_e/h_{22e}$. Při zatěžovacích odporech do $10^4 \Omega$ je vstupní odpor malý (desítky ohmů). Při větších odporech R_z je stovky ohmů.

Výstupní odpor se pohybuje v hodnotách jednotek až stovek ohmů. Závislosti odporů jsou rovněž na obrázku.

Shrnutí vlastností jednotlivých zapojení

Zapojení SE:

Výkonové zesílení je největší ze všech sledovaných zapojení, ale je velmi závislé na parametru h_{21e} . Napěťové zesílení se pohybuje ve stovkách, ale zapojení otáčí fázi napětí. Proudové zesílení je rovněž velké, výstupní proud je ve fázi se vstupním. Vstupní odpor je řádově jednotky kilohmů, výstupní odpor jsou desítky kilohmů.

Zapojení SC:

Napěťové zesílení je vždy menší než jedna, výstupní napětí je ve fázi s napětím vstupním. Proudové zesílení je velké, výstupní proud je v protifázi oproti vstupnímu. Vstupní odpor je velký (o několik řádů větší, než u zapojení SE), výstupní odpor je malý. Zapojení se používá buď k snímání signálu ze zdrojů s velkým vnitřním odporem (např. krystalové přenosky) nebo k přizpůsobení výstupu zesilovače na malý zatěžovací odpor (např. na koaxiální kabel).

Zapojení SB:

Napěťové zesílení je velké (jako u zapojení SE), výstupní signál je ale ve fázi se vstupním. Proudové zesílení je vždy menší než jedna. Vstupní odpor je malý (jednotky až desítky ohmů), výstupní odpor je velký (stovky kilohmů až jednotky megohmů). Zapojení se používá k snímání signálů zdrojů s malým vnitřním odporem (antény, termočlánky).

ZESILOVACÍ STUPNĚ S UNIPOLÁRNÍMI TRANZISTORY

Napišeme-li čtyřpólové rovnice pro unipolární tranzistor ve tvaru pro y -parametry, odpadá první rovnice, protože vstupní proud $i_1 = 0$ a vstupní vodivost y_{11} je rovněž nula. Zůstává pouze druhá rovnice

$$i_C = Y_{21e} \cdot U_{GE} + Y_{22e} \cdot U_{CE}$$

U unipolárních tranzistorů (stejně jako u elektronek) se zavádí pojmy:

$$S = Y_{21e} = \frac{\Delta i_C}{\Delta U_{GE}} \quad \text{při } U_{CE} = 0 \quad \text{strmost,}$$

$$R_i = \frac{1}{Y_{22e}} = \frac{\Delta U_{CE}}{\Delta i_C} \quad \text{při } U_{GE} = 0 \quad \text{vnitřní odpor.}$$

$$\mu = \frac{Y_{21e}}{Y_{22e}} = \frac{\Delta U_{CE}}{\Delta U_{GE}} \quad \text{při } i_C = 0 \quad \text{zesilovací činitel}$$

Mezi těmito vztahy platí tzv. Barkhauzenův vztah $S \cdot R_i = \mu$. Pomocí těchto veličin lze nakreslit náhradní schéma unipolárního tranzistoru. Tranzistor nahradíme mezi kolektorem a emitorem buď zdrojem konstantního napětí μU_{GE} v sérii s vnitřním odporem R_i , nebo zdrojem konstantního proudu $S U_{GE}$ s paralelně připojeným odporem R_i (viz obr.)

1) Zesilovací stupeň s unipolárním tranzistorem v zapojení SE

Z náhradního schématu lze napsat rovnici:

$$u_2 = -u_{GE} \cdot \frac{R_c}{R_i + R_c}, \quad A_U = \frac{u_2}{u_{GE}} = -\frac{\mu \cdot R_c}{R_i + R_c} = -\frac{Y_{21e} \cdot R_c}{1 + Y_{22e} \cdot R_c}$$

Výstupní odpor $r_2 = R_i$. Vstupní odpor je velmi vysoký, je dán typem tranzistoru a bývá $10^{11} - 10^{13} \Omega$. Protože není přesně definován, zapojuje se na vstupu odpor R_1 , který potom vstupní odpor přesně definuje. Volí se obvykle $10^{10} \Omega$, abychom neztratily celkový požadovaný vysoký vstupní odpor.

$$\text{Pro } R_c \ll R_i \text{ je } A_U = -S R_c, \quad \text{pro } R_c \rightarrow \infty \text{ je } A_U = -\mu = -\frac{Y_{21e}}{Y_{22e}}$$

2) Zesilovací stupeň s unipolárním tranzistorem v zapojení SC

Řídící napětí je dáno rozdílem ($u_1 - u_2$). Z náhradního schématu lze napsat rovnici:

$$u_2 = \mu(u_1 - u_2) \frac{R_z}{R_i + R_z}, \text{ z čehož } A_U = \frac{u_2}{u_1} = \frac{\mu R_z}{R_i + (\mu + 1) R_z}$$

Pro $R_z = 0$, je $A_U = 0$. Pro $R_z \rightarrow \infty$ je $A_U = \frac{\mu}{\mu + 1}$.

Pro vstupní odpor lze odvodit vztah $r_1 = \frac{u_1}{i_1} = \frac{R_i}{1 - A_U}$.

Výstupní odpor je dán vztahem $r_2 = \frac{u_2}{i_2} = \frac{1}{S + \frac{1}{R_i}} = \frac{1}{Y_{21e} + Y_{22e}}$.

3) Zesilovací stupeň s unipolárním tranzistorem v zapojení SG

Z náhradního schématu lze napsat rovnici:

$$u_2 = (\mu + 1) u_1 \frac{R_c}{R_i + R_c}, \quad A_U = \frac{(\mu + 1) R_c}{R_i + R_c}$$

Zdroj: <http://moryst.sweb.cz/elt2/stranky1/elt024.htm>