

## Zjednodušený výpočet tranzistorového zesilovače

Přesný výpočet tranzistorového zesilovače vychází z určení dvojbranových parametrů tranzistoru a pokračuje sestavením matice obvodu a řešením této matice. Při zjednodušeném řešení lze některé parametry zanedbat a sestavené náhradní schéma pak řešit libovolnou metodou. Přesto dostaneme výsledky s přesností, která pro obvyklé technické řešení postačuje. Při výpočtu tranzistorového zesilovače pro malé signály lze používat dynamické parametry, které v dostatečně malé oblasti kolem zvoleného pracovního bodu nahrazují nelineární charakteristiky přímkami. Tím provedeme linearizaci v pracovním bodě a obvod můžeme řešit metodami pro lineární obvody. Při návrhu využijeme princip superpozice a budeme řešit odděleně nastavení stejnosměrného pracovního bodu a zesílení malých střídavých signálů.

Parametry současných křemíkových tranzistorů umožňují následující zjednodušení:

- $y_{11} u_1 \gg y_{12} u_2$  - zanedbání zpětného přenosu
- $y_{21} u_1 \gg y_{22} u_2$  - zanedbání výstupní vodivosti
- $h_{21} = y_{21} / y_{11}$  - proudový přenos bude v celém rozsahu konstantní
- $U_{BE} = 0,6 \text{ V}$  - pro křemíkové tranzistory malých výkonů při proudech kolem 1 mA

V následujících výpočtech budeme pracovat v oblasti kmitočtově nezávislých parametrů.

Uvedené podmínky jsou vyhovující pro nízkofrekvenční tranzistorové zesilovače malých signálů. Pro vysokofrekvenční zesilovače a zesilovače signálů s velkou amplitudou, např. koncové zesilovače, je třeba použít komplikovanější metody výpočtu.

### A. Nastavení stejnosměrného pracovního bodu tranzistoru

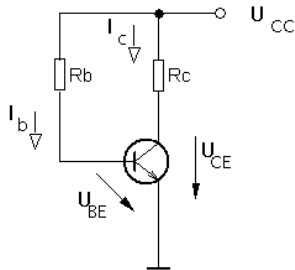
Požadujeme, aby se klidový proud kolektoru při změně napájecího napětí a při změnách teploty měnil co nejméně. Dále je vhodné volit prvky obvodu tak, aby byly zachovány pracovní podmínky pro libovolný tranzistor vybraného typu, a to pro celý rozsah proudového zesílení. U křemíkových tranzistorů jsou zbytkové proudy při normální teplotě malé. Ve výpočtu budou tedy zanedbány. Při zvýšené teplotě, kdy se tyto proudy mohou uplatnit, lze použít princip superpozice.

Volíme  $R_c \leq 0,1 R_z$ ;  $U_{CE} \approx U_{CC} / 2$ ;  $U_{BE} = 0,6 \text{ V}$ .

Výpočet ostatních hodnot viz **postup a)**.

Proud kolektoru  $I_c$  by se měl pohybovat v řádu jednotek mA u nf předzesilovačů, pro nízkošumové vstupní zesilovače volíme  $I_c$  v desetinách mA. Pokud by díky malé hodnotě  $R_c$  proud  $I_c$  nevyhovoval, je třeba buď změnit velikost  $U_{CE}$  (ale jen tak, aby nebyl omezen rozkmit signálu), nebo zvolit  $I_c$  a spočítat  $R_c$  - **postup b)**. Pokud bude  $R_c$  srovnatelný s  $R_z$ , ovlivní napěťové zesílení stupně.

## 1. Základní zapojení



Obr. 1 – základní zapojení tranzistoru SE

### Postup a)

Volíme  $R_c$

$$I_c = \frac{U_{CC} - U_{CE}}{R_c}$$

### Postup b)

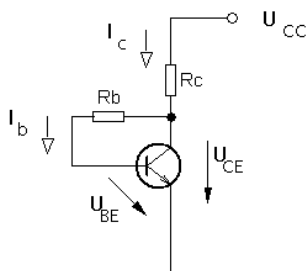
Volíme  $I_c$

$$R_c = \frac{U_{CC} - U_{CE}}{I_c}$$

$$R_b = h_{21E} \frac{U_{CC} - U_{BE}}{I_c}$$

Základní zapojení se obvykle nepoužívá, protože je citlivé na rozptyl hodnot součástek, především proudového zesilovacího činitele  $h_{21E}$ .

## 2. Zapojení s napět'ovou zpětnou vazbou



Obr. 2 – zapojení tranzistoru SE s napět'ovou zpětnou vazbou

### Postup a)

Volíme  $R_c$

$$I_c = \frac{U_{CC} - U_{CE}}{R_c}$$

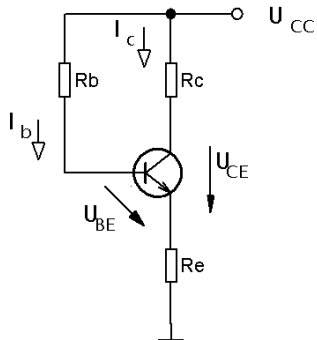
### Postup b)

Volíme  $I_c$

$$R_c = \frac{U_{CC} - U_{CE}}{I_c}$$

$$R_b = h_{21E} \frac{U_{CE} - U_{BE}}{I_c}$$

### 3. Zapojení s proudovou zpětnou vazbou



Obr. 3 – zapojení tranzistoru SE s proudovou zpětnou vazbou

Koeficient  $k_R$  určuje poměr  $R_c$  ku  $R_e$

$$k_R = \frac{R_c}{R_e}$$

Volíme  $k_R$  v rozsahu 10 až 5.

#### **Postup a)**

Volíme  $R_c$

$$R_e = \frac{R_c}{k_R}$$

$$I_c = \frac{U_{CC} - U_{CE}}{(1 + k_R) R_e}$$

#### **Postup b)**

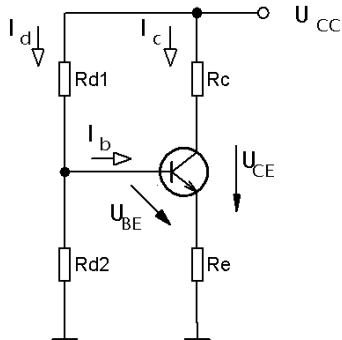
Volíme  $I_c$

$$R_e = \frac{U_{CC} - U_{CE}}{(1 + k_R) I_c}$$

$$R_c = k_R R_e$$

$$R_b = h_{21E} \frac{U_{CC} - U_{BE} - R_e I_c}{I_c}$$

#### 4. Můstkové zapojení



Obr. 4 – tranzistor SE v můstkovém zapojení

Koeficient  $k_R$  určuje poměr  $R_c$  ku  $R_e$  :

$$k_R = \frac{R_c}{R_e}$$

Volíme  $k_R$  v rozsahu 10 až 5.

##### Postup a)

Volíme  $R_c$

$$R_e = \frac{R_c}{k_R}$$

$$I_c = \frac{U_{CC} - U_{CE}}{(1 + k_R) R_e}$$

##### Postup b)

Volíme  $I_c$

$$R_e = \frac{U_{CC} - U_{CE}}{(1 + k_R) I_c}$$

$$R_c = k_R R_e$$

$$I_b = \frac{I_c}{h_{21E}}$$

$$I_d \geq 10 I_b$$

$$R_d = R_{d1} + R_{d2} = \frac{U_{CC}}{I_d}$$

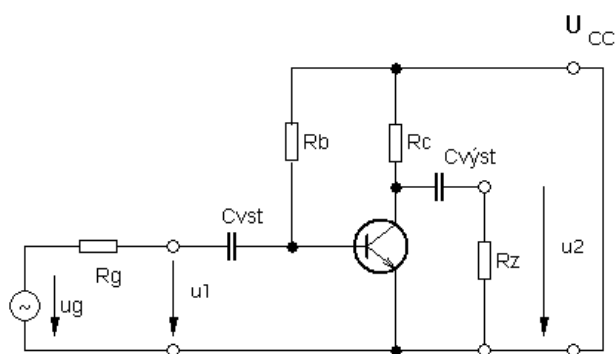
$$R_{d2} = \frac{U_{BE} + R_e I_c}{I_d}$$

$$R_{d1} = R_d - R_{d2}$$

Můstkové zapojení je nejobvyklejší způsob stabilizace pracovního bodu. Nejlépe splňuje podmínky, zmíněné v úvodu.

## B. Výpočet střídavých parametrů

Zdroj střídavého signálu je oddělen kapacitou, stejně jako zátěž. Oddělení kapacitou je nutné, aby se neovlivnilo nastavení stejnosměrného pracovního bodu. Hodnoty součástek byly určeny při výpočtu pracovního bodu a zároveň určují základní střídavé zesílení pro pásmo středních frekvencí. Když požadujeme střídavé zesílení větší, zmenšíme impedanci v emitoru paralelním připojením sériové kombinace kapacity a odporu – viz obr. 6. Tento postup se nazývá „blokování emitorového odporu“. Blokování emitorového odporu lze provést také tak, že emitorový odpor rozdělíme na dva odpory, z nichž jeden blokuje kapacitou. Vazební kapacity tvoří se vstupním a zatěžovacím odporem horní propusti, omezující velikost signálu na nízkých frekvencích. Další horní propust je tvořena impedancí v emitoru tranzistoru.



Obr. 5 – základní zapojení tranzistoru SE pro střídavé signály

Podle principu superpozice nahradíme při výpočtu střídavého zesílení zdroj napájecího napětí zkratem, který je naznačen propojením svorek. Napájecí napětí se při změnách signálu nemění, jeho potenciál je pro střídavé signály konstantní, tedy stejný jako potenciál země. Hodnota vazebních kondenzátorů musí být tak velká, aby se ve frekvenčním pásmu zesílení neuplatňovaly. Pro výpočet zesílení v tomto pásmu lze tedy provést další zjednodušení, a to nahrazení vazebních kapacit zkratem.

Napěťové zesílení tranzistoru v základním zapojení SE (obr. 5) je:

$$A_u = \frac{u_2}{u_1} = \frac{-h_{21e} R_{cv}}{h_{11e}}$$

kde  $R_{cv} = \frac{R_c R_z}{R_c + R_z + h_{22e} R_c R_z}$  je paralelní kombinace  $R_c$ ,  $R_z$  a  $h_{22e}$ .

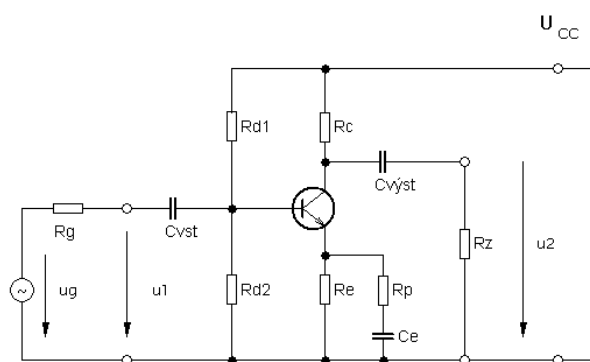
Vstupní odpor zesilovacího stupně je dán paralelní kombinací vstupního odporu vlastního tranzistoru  $R_{vt} = h_{11e}$  a odporu  $R_b$ :

$$R_{vst} = \frac{h_{11e} R_b}{h_{11e} + R_b}$$

Výstupní odpor je paralelní kombinace výstupní admitance  $h_{22}$  a kolektorového odporu  $R_c$ :

$$R_{vyst} = \frac{R_c}{1 + h_{22e} R_c}$$

Jestliže je vnitřní odpor zdroje signálu  $R_g$  mnohem menší než  $R_{vst}$ , je možné vliv vstupního odporu zanedbat. Když nelze odpor zdroje zanedbat, je nutné počítat zeslabení signálu děličem, který je složen z  $R_g$  a  $R_{vst}$ . V tomto případě se nepříznivě projeví značný rozptyl vstupního odporu, který je způsoben velkým rozptylem proudového zesilovacího činitele.



Obr. 6 – můstkové zapojení tranzistoru SE pro střídavé signály

Při výpočtu střídavého zesílení tranzistorového stupně v můstkovém zapojení postupujeme stejným způsobem, jako u základního zapojení. Nejprve určíme základní zesílení bez blokování emitorového odporu, tzn. že nahradíme zkratem jenom vazební kondenzátory a blokovací člen vypustíme. Pro napět'ové zesílení platí:

$$A_{u0} = \frac{u_2}{u_1} = \frac{-h_{21e} R_{cv}}{h_{11e} + h_{21e} R_e} = \frac{-R_{cv}}{r_e + R_e}, \text{ kde } R_{cv} = \frac{R_c R_z}{R_c + R_z + h_{22e} R_c R_z}$$

a  $r_e$  je dynamický odpor emitoru:

$$r_e = \frac{h_{11e}}{h_{21e}}$$

Vstupní odpor samotného tranzistoru s emitorovým odporem:

$$R_{vt} = h_{11e} + h_{21e} R_e = h_{21e} (r_e + R_e)$$

Výsledný vstupní odpor zesilovače je roven paralelní kombinaci  $R_{vt}$  a odporu děliče  $R_b$ :

$$R_b = \frac{R_{d1} R_{d2}}{R_{d1} + R_{d2}}$$

$$R_{vst} = \frac{R_{vt} R_b}{R_{vt} + R_b}$$

Tuto hodnotu použijeme pro určení kapacity vstupního vazebního členu.

Výstupní odpor je paralelní kombinace výstupní admitance  $h_{22e}$  a kolektorového odporu  $R_c$ :

$$R_{výst} = \frac{R_c}{1 + h_{22e} R_c}$$

Při zablokování emitorového odporu je zesílení tranzistoru:

$$A_u = \frac{-h_{21e} R_{cv}}{h_{11e} + h_{21e} R_{ep}} = \frac{-R_{cv}}{r_e + R_{ep}}, \text{ kde } R_{ep} \text{ je paralelní kombinace odporů } R_e \text{ a } R_p.$$

Z poměru požadovaného a základního zesílení vypočteme velikost  $R_{ep}$ :

$$R_{ep} = \frac{A_{u0}}{A_u} (r_e + R_e) - r_e$$

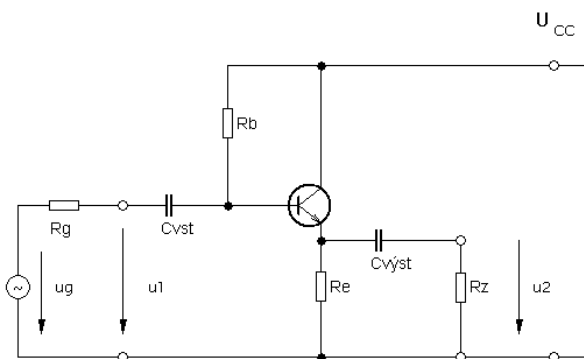
a dále  $R_p$ :

$$R_p = \frac{R_{ep} R_e}{R_e - R_{ep}}.$$

Vstupní odpor samotného tranzistoru s blokováním emitorovým odporem:

$$R_{vt} = h_{11e} + h_{21e} R_{ep} = h_{21e} (r_e + R_{ep}) \text{ a vstupní odpor celého stupně je roven paralelní}$$

kombinaci  $R_{vt}$  a  $R_d$ .



Obr. 7 - zapojení tranzistoru SC pro střídavé signály

Zapojení se společným kolektorem (obr. 7) se používá jako impedanční transformátor, požadujeme-li vysoký vstupní odpor zesilovače. Zesílení stupně SC je menší než 1:

$$A_u = \frac{h_{21e} R_e}{h_{11e} + h_{21e} R_e}$$

Vstupní odpor samotného tranzistoru:

$$R_{vt} = h_{11e} + h_{21e} R_e = h_{21e} (r_e + R_e)$$

a vstupní odpor celého stupně:

$$R_{vst} = \frac{R_{vt} R_b}{R_{vt} + R_b}$$

Výstupní odpor:

$$R_{vyst} = \frac{h_{11e} + R_g}{h_{21e}}$$

### C. Určení kapacit vazebních členů

Na dolních frekvencích se uplatňují tři články s derivačním charakterem, vstupní, výstupní a emitorový. Přenos vstupního a výstupního členu odpovídá derivačnímu članku. Pro zadanou dolní mezní frekvenci určíme hodnotu kapacity z napětového přenosu

$$A_u = \frac{u_2}{u_1} = \frac{j\omega\tau}{1+j\omega\tau}, \text{ kde } \tau = RC = 1/\omega_0$$

Vliv kapacity v emitorovém obvodu odvodíme ze zjednodušeného vzorce. Předpokládáme, že  $r_e \ll R_{ep}$  a můžeme ho proto zanedbat. Odpor  $R_e$  nahradíme impedancí  $Z_e$ :

$$Z_e = R_e \frac{1+j\omega R_p C_e}{1+j\omega C_e (R_p + R_e)}$$

Přenosová funkce napětového zesílení pak bude mít tvar:

$$A_u(j\omega) = \frac{R_c}{Z_e} = \frac{R_c}{R_e} \cdot \frac{1+j\omega C_e (R_p + R_e)}{1+j\omega R_p C_e}$$

Ze vzorce plyne, že dolní mezní frekvence bude určena výrazem ve jmenovateli, odpovídá tedy časové konstantě  $\tau_e = R_p C_e = 1/\omega_0$ .

Dolní mezní frekvence  $f_d$  celého zesilovače je dána poklesem zesílení o 3 dB. Mezní frekvence článků s derivačním účinkem musejí být voleny nižší. Pokud nejsou známy jiné požadavky, můžeme rozdělit pokles zesílení na všechny články rovnoměrně. To znamená, že v případě tří článků bude pokles na jednom článku 1 dB na frekvenci  $f_d$ , v případě pěti článků bude pokles na jednom článku 0,6 dB atd.

Pro rychlé určení poklesu zesílení a dolní mezní frekvence jednotlivých článků může sloužit tabulka 1. Zde je  $k = \omega/\omega_0$  kde  $\omega$  je frekvence, při které dochází k poklesu, uvedenému ve druhém sloupci a  $\omega_0$  je dolní mezní frekvence článku.



<b>k</b>	<b>pokles (dB)</b>
0,5	7
1	3
2	0,97
3	0,46
4	0,263
5	0,17
7	0,0877
10	0,0432

Tab. 1 – útlum derivačního článku

Dolní mezní frekvence článku je

$$f_d' = \frac{f_d}{k}.$$

Kapacity kondenzátorů vypočítáme ze vzorců:

$$C_{vst} = \frac{k}{2\pi f_d (R_g + R_{vst})}$$

$$C_{výst} = \frac{k}{2\pi f_d (R_{výst} + R_z)}$$

$$C_e = \frac{k}{2\pi f_d R_p}$$

Podle katalogu vybereme kondenzátory s vyšší hodnotou. Provozní napětí elektrolytických kondenzátorů musí být vyšší, než je stejnosměrné napětí, určené při výpočtu pracovního bodu.

#### D. Řešení vícestupňových zesilovačů

Střídavě vázané vícestupňové zesilovače se řeší tak, že se navrhuje stejnosměrný pracovní bod pro každý stupeň samostatně, stejně jako jednostupňový. U posledního stupně je třeba dbát na volbu  $U_{CE}$  tak, aby nedošlo k omezení signálu na výstupu. Řešení stejnosměrně vázaných zesilovačů je poněkud komplikovanější, protože pracovní body sousedních stupňů se navzájem ovlivňují.

Řešení střídavých parametrů zesilovače vyžaduje rozdělení zisku na jednotlivé stupně a výpočet každého stupně samostatně. Pokud tomu nebrání jiné požadavky (např. vyšší vstupní odpor prvního stupně), rozdělíme zisk rovnoměrně na všechny stupně.

Vstupní odpor následujícího stupně tvoří zatěžovací odpor stupně předchozího, výstupní odpor předchozího stupně tvoří vnitřní odpor zdroje signálu pro následující stupeň.

Pro určení  $f_d$  celého zesilovače je třeba brát v úvahu všechny derivační prvky v celém zesilovači (vstupní a výstupní kapacity, vazební kapacity mezi stupni a všechny kapacity v emitorech tranzistorů).