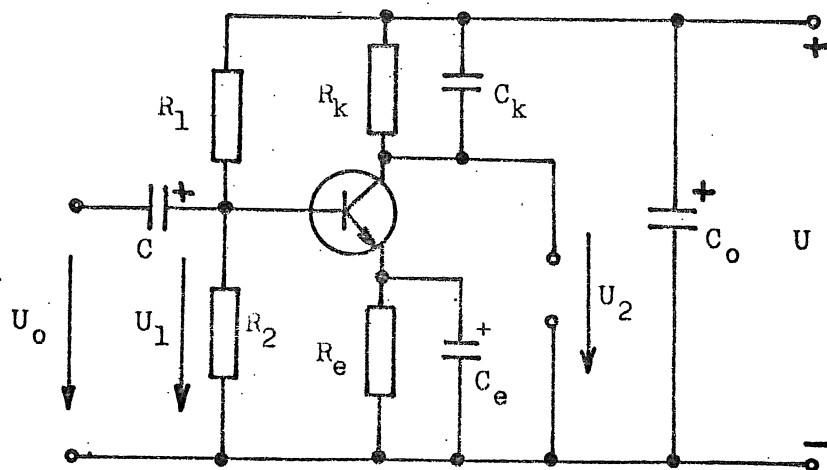


IV. TRANZISTOROVÝ ZESILOVAČ A JEHO PŘENOSOVÉ VLASTNOSTI

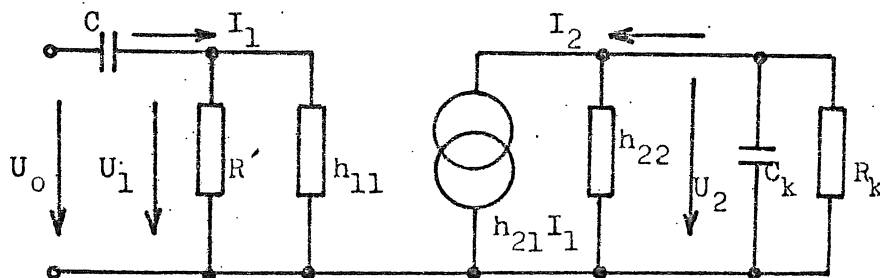
Jednostupňový zesilovač s tranzistorem je zapojen podle schématu na obr. 14. Na vstup zesilovače je přivedeno napětí U_0 (komplexní am-



Obr. 14

plituda při symbolickém vyjádření), výstupní napětí je U_2 . Kondenzátor C odděluje zdroj signálu od stejnosměrných napájecích napětí. Pracovní bod tranzistoru je stabilizován odpory R_1 , R_2 a R_e . Pracovní odpor je R_k . Kondenzátor C_k nebývá běžně připojován jako samostatná součástka, při některých měřeních dosáhneme připojením C_k omezení přenosu vysokých kmitočtů zesilovačem. Kondenzátor C_0 připojený paralelně ke zdroji napájecího napětí představuje prakticky zkrat pro zesilované střídavé signály.

Za předpokladu, že kapacita kondenzátoru C_e je dostatečně velká, můžeme pro oblast středních kmitočtů užít náhradního obvodu podle obr. 15. Použijeme malých hodnot odporů R_k , takže vliv vnitřní zpětné vazby



Obr. 15

v tranzistoru můžeme zanedbat, $h_{12e} \cdot U_2 \approx 0$. Při dalším značení parametrů bude index e vynechán, avšak všechny parametry se budou týkat jen zapojení tranzistoru se společným emitorem.

Pro $C_k \cong 0$ a pro dostatečně nízké frekvence, kdy parametry tranzistoru jsou vyjádřeny reálnými čísly, je napěťové zesílení A_u dáno vztahem

$$A_u = \frac{U_2}{U_1} = - \frac{h_{21} R_k}{h_{11} (1 + h_{22} R_k)} \quad (4.1)$$

Přenos napětí může být obecně vyjádřen komplexním číslem, přičemž jeho absolutní hodnota (modul) je zesílení napětí, poměr imaginární a reálné části výrazu pro přenos je pak tangentou fázového posuvu mezi výstupním a vstupním napětím.

Vztah (4.1) můžeme ještě zjednodušit, neboť $h_{22} R_k$ bývá hodně menší než 1. Potom

$$A_u \cong - \frac{h_{21} R_k}{h_{11}} \quad (4.1a)$$

V oboru nízkých kmitočtů se uplatní vliv kondenzátoru C , napětí U_0 se rozdělí na kondenzátor a na vstupní odpor zesilovače. Podle obr. 14 a obr. 15 je vstupní odpor zesilovače složen z paralelně zapojených odporů h_{11} a R' , přičemž R' představuje dvojici paralelně zapojených odporů R_1 a R_2 , pro vstupní odpor R tedy platí

$$R = \frac{h_{11} R'}{h_{11} + R'}, \quad \text{kde} \quad R' = \frac{R_1 R_2}{R_1 + R_2}$$

Pro podíl absolutních hodnot napětí U_0 a U_1 dostaneme

$$\left| \frac{U_1}{U_0} \right| = \frac{R}{\sqrt{R^2 + \frac{1}{\omega^2 C^2}}} \quad (4.2)$$

Dolní mezní frekvence ω_d , pro kterou nastane pokles přenosu o 3 dB proti střednímu přenosu, t.j. pro

$$\left| \frac{U_1}{U_0} \right| = \frac{1}{\sqrt{2}}$$

je při $\frac{1}{(\omega CR)^2} = 1$, tedy $f_d = \frac{1}{2\pi RC}$ (4.3)

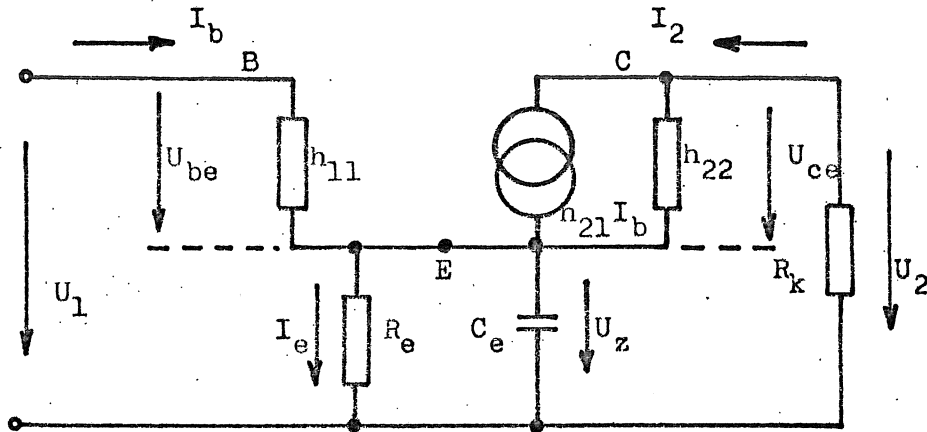
V oblasti vysokých kmitočtů způsobí pokles zesílení kapacita C_k , která bývá tvořena mezelektrodovými kapacitami tranzistoru a kapacitami okolních součástek. Při měření její hodnotu uměle zvětšíme zapojením přídatného kondenzátoru C_k . Přenos napětí zesilovacím stupněm je potom

$$\hat{A}_u = - \frac{h_{21} \hat{Z}_k}{h_{11}}, \quad \text{kde} \quad \hat{Z}_k = \frac{R_k}{1 + j\omega C_k R_k} \quad (4.4)$$

Pokles zesílení o 3 dB nastane pro ω_h , pro které $\omega_h C_k R_k = 1$,
(předpokládáme vysokou mezní frekvenci tranzistoru) takže

$$f_h = \frac{1}{2\pi C_k R_k} \quad (4.5)$$

Pro sledování vlivu R_e a C_e použijeme náhradního obvodu podle obr. 16. Značeny jsou opět komplexní amplitudy napětí a proudů.



Obr. 16

Zanedbáváme opět vliv h_{12} a C_k a předpokládáme reálné hodnoty parametrů tranzistoru.

V symbolickém vyjádření je přenos napětí

$$\hat{A}'_u = \frac{U_2}{U_1} = \frac{A_u}{1 + \hat{\beta} \cdot A_u} \quad (4.6)$$

A_u je zesílení dané vztahem (4.1a)

$$A_u = \frac{U_{ce}}{U_{be}} \quad ; \quad \hat{\beta} = \frac{U_z}{U_{ce}}$$

Za předpokladu, že $Z_e = R_e$ (kondenzátor je vynechán) a $R_e \ll R_k$ můžeme činitel zpětné vazby vyjádřit místo z poměrů napětí z poměrů odporů

$$\hat{\beta} = \frac{U_z}{U_{ce}} \approx \frac{R_e}{R_k}$$

Potom zesílení při zavedené zpětné vazbě odporem R_e je

$$A'_u = \frac{A_u}{1 + \frac{R_e}{R_k} A_u} \quad (4.6a)$$

Je-li zesílení A_u bez zavedení zpětné vazby velké, můžeme vztah dále zjednodušit až na přibližný výraz

$$A'_u \approx \frac{R_k}{R_e} \quad (4.6b)$$

Pro obecnou hodnotu \hat{Z}_e určíme činitel zpětné vazby z hodnot U_z a U_{ce} . Podle obr. 16 platí

$$U_z = U_2 - U_{ce} \quad , \quad U_2 = -I_2 R_k$$

$$I_2 = h_{21} I_b + U_{ce} h_{22} \quad .$$

Z těchto vztahů určíme U_z ,

$$U_z = -R_k (h_{21} I_b + U_{ce} h_{22}) - U_{ce} \quad .$$

$R_k h_{22} \ll 1$, takže pro $R_k \ll 1/h_{22}$ je

$$U_z = -R_k h_{21} I_b - U_{ce} \quad . \quad (4.7)$$

Pro uzel \underline{E} podle obr. 16 platí $I_b + I_2 - I_e = 0$. Odtud po vyjádření proudů z napětí a odporů dostaneme

$$I_b = U_z \left(\frac{1}{R_k} + \frac{1}{\hat{Z}_e} \right) + \frac{U_{ce}}{R_k} \quad . \quad (4.8)$$

Dosadíme-li tento výraz do (4.7), potom po úpravách a za předpokladu, že h_{21} bývá hodně větší než 1 obdržíme

$$U_z \left[1 + h_{21} \left(1 + \frac{R_k}{\hat{Z}_e} \right) \right] = -U_{ce} h_{21} \quad . \quad (4.7a)$$

Činitel zpětné vazby je potom

$$\hat{\beta} = \frac{-h_{21}}{1 + h_{21} \left(1 + \frac{R_k}{\hat{Z}_e} \right)} = \frac{-1}{\frac{1}{h_{21}} + 1 + \frac{R_k}{\hat{Z}_e}} = \frac{-1}{1 + \frac{R_k}{\hat{Z}_e}} \quad (4.9)$$

Pokud je $R_k \gg |Z_e|$ můžeme (4.9) dále zjednodušit, přičemž $1/R_e = G_e$

$$\hat{\beta} \approx -\frac{\hat{Z}_e}{R_k} = -\frac{1}{R_k (G_e + j\omega C_e)} = -\frac{R_e}{R_k} \cdot \frac{1}{(1 + j\omega C_e R_e)} \quad (4.9a)$$

Takto určenou hodnotu činitele zpětné vazby dosadíme do (4.6), potom

$$\hat{A}'_u = A_u \cdot \frac{1}{1 - \frac{R_e}{R_k} \cdot \frac{1}{1 + j\omega C_e R_e}} \quad (4.10)$$

Přenos napětí \hat{A}'_u je vyjádřen komplexním číslem a zřejmě závisí na frekvenci. Pro stanovení dolní mezní frekvence je nutné si uvědomit, že zesílení (modul přenosu napětí) nabývá jistých extrémních hodnot. Minimální hodnoty nabývá pro $\omega = 0$ (stejnoseměrné napětí)

$$A'_{u\min} = A_u \frac{1}{1 - \frac{R_e}{R_k} \cdot A_u} \quad (4.11)$$

což odpovídá vztahu (4.6a). Dosazením za A_u podle (4.1a) dostaneme

$$A'_{umin} = - \frac{h_{21} R_k}{h_{11} + R_e h_{21}} \quad (4.11a)$$

Maximální hodnoty nabývá modul přenosu napětí pro vysoké frekvence, při nichž kondenzátor C_e představuje zkrat, takže záporná zpětná vazba na odporu R_e se nemůže uplatnit. Platí tedy

$$A'_{umax} = - \frac{h_{21} R_k}{h_{11}} = A_u \quad (4.12)$$

Stanovit dolní mezní frekvenci danou hodnotami součástek R_e a C_e z poklesu zesílení o 3 dB nemusí být vždy možné. Zesílení klesá od hodnoty A'_{umax} k hodnotě A'_{umin} , rychlost poklesu nutně bude záviset na těchto extrémních hodnotách. Pro stanovení průběhu zesílení upravíme rovnici (4.10) pro přenos napětí.

Vztah (4.11) můžeme psát ve tvaru

$$A'_{umin} = \frac{A'_{umax}}{1 - A'_{umax} \frac{R_e}{R_k}}$$

odkud po úpravách dostaneme

$$\frac{1}{A'_{umax}} - \frac{1}{A'_{umin}} = \frac{R_e}{R_k} \quad (4.13)$$

Tento výraz dosadíme do vztahu pro přenos napětí a po úpravách obdržíme pro poměr zesílení

$$\left| \frac{\hat{A}'_u}{A'_{umax}} \right| = \frac{A'_{umin}}{A'_{umax}} \cdot \sqrt{\frac{1 + \omega^2 C_e^2 R_e^2}{1 + \left(\frac{A'_{umin}}{A'_{umax}} \right)^2 \cdot \omega^2 C_e^2 R_e^2}} \quad (4.14)$$

Pro frekvenci ω , pro kterou klesne zesílení na požadovanou hodnotu $A'_u = |\hat{A}'_u|$ nakonec dostaneme

$$\omega = \frac{1}{C_e R_e} \sqrt{\frac{\left(\frac{A'_u}{A'_{umin}} \right)^2 - 1}{1 - \left(\frac{A'_u}{A'_{umax}} \right)^2}} \quad (4.15)$$

Pro měření vlastností zesilovače použijeme přípravku, na kterém můžeme vyměňovat odpory pro nastavení a stabilizaci pracovního bodu tranzistoru R_1 , R_2 a R_e , kondenzátor C_e , pracovní odpor tranzistoru R_k (k němuž

případně připojujeme paralelní kondenzátor C_k). Na vstup zesilovače přivádíme napětí z tónového generátoru přes kondenzátor C . Výstupní napětí zesilovače měříme elektronovým voltmetrem. Napájecí napětí volíme asi 12 V. Volbou odporů pro nastavení pracovního bodu tranzistoru nastavíme jeho kolektorový proud asi na 1 mA. Ostatní hodnoty součástek budou zadány.

Úkoly :

1. Pro $C = 10 \mu\text{F}$ a $C_e = 500 \mu\text{F}$ určete zesílení při frekvenci 1 kHz. Ze zadaných hodnot parametrů tranzistoru a hodnot součástek (R_k) vypočtete zesílení podle vztahu (4.1a) a srovnajte s naměřenou hodnotou. Pro $C = 10 \mu\text{F}$ a $C_e = 500 \mu\text{F}$ stanovte závislost zesílení na frekvenci. Měřte v rozsahu použitelnosti měřících přístrojů, výsledky vynesete do grafu s logaritmickými stupnicemi.
2. Kapacitu kondenzátoru snižte na $0,1 \mu\text{F}$ (i méně) a měřte závislost zesílení na frekvenci. Z grafu nebo přímým měřením stanovte dolní mezní frekvenci. Zjištěnou hodnotu porovnejte s hodnotou vypočtenou podle (4.3).
3. Horní mezní frekvenci snižte zapojením $C_k = 10 \text{nF}$. Závislost zesílení na frekvenci vynesete do téhož grafu jako v předchozím případě a opět určete horní mezní frekvenci. Naměřenou hodnotu srovnajte s vypočtenou ze vztahu (4.5).
4. Pro $C = 10 \mu\text{F}$ a $C_e = 0$ stanovte zesílení pro $f=10 \text{kHz}$. Výsledek měření porovnejte s hodnotou vypočtenou ze vztahu (4.6a) nebo (4.11a).
5. Kapacitu kondenzátoru C_e snižte na $0,1 \mu\text{F}$ a stanovte jeho vliv na průběh frekvenční charakteristiky. Ověřte platnost vztahu (4.15).

Při všech měřeních udržujte vstupní napětí zesilovače na tak nízké úrovni, aby výstupní napětí nepřekročilo hodnotu asi 1 V při napájecím napětí 12 V. Zkreslení výstupního napětí bude potom zanedbatelné a neovlivní podstatně výsledky měření.

Při zapojování elektrolytických kondenzátorů dbejte na polaritu!