

## ZAPOJENÍ TRANZISTORU JAKO DVOJBRANU (SE,SB,SC)

Díváme-li se na tranzistor jako na čtyřpól (dvojbran), lze jeho vlastnosti vyjádřit pomocí čtyřpólových rovnic. Ve většině případů jsou udávány parametry tranzistoru ve tvaru t.zv. h-parametrů, neboli smíšených parametrů.

Soustava těchto rovnic má tvar:

$$u_1 = h_{11} \cdot i_1 + h_{12} \cdot u_2$$

$$i_2 = h_{21} \cdot i_1 + h_{22} \cdot u_2$$

Z těchto rovnic můžeme odvodit vzorce pro výpočet jednotlivých parametrů.

Vzorce pro výpočet jednotlivých parametrů h a jejich význam:

$h_{11} = \frac{u_1}{i_1}$  pro  $u_2 = 0$ . Jedná se tedy vstupní odpor tranzistoru při výstupu nakrátko.

$h_{12} = \frac{u_1}{u_2}$  pro  $i_1 = 0$ . Jedná se o zpětný napěťový přenos při vstupu naprázdno.

$h_{21} = \frac{i_2}{i_1}$  pro  $u_2 = 0$ . Jedná se o proudový zesilovací činitel při výstupu nakrátko.

$h_{22} = \frac{i_2}{u_2}$  pro  $i_1 = 0$ . Jedná se o výstupní vodivost tranzistoru při vstupu naprázdno.

Parametry  $h_{ij}$  jsou střídavé parametry, určované v okolí pracovního bodu.

Při vysokých frekvencích nelze dobře dodržet definiční podmínky jednotlivých parametrů, protože měřicí generátory i voltmetry mají vždy určitou kapacitu, která vstup nebo výstup zkratovává a není splněna podmínka vstupu naprázdno. Proto udává výrobce u všech tranzistorů parametry admitanční, které jsou definovány následovně:

$$i_1 = y_{11} \cdot u_1 + y_{12} \cdot u_2$$

$$i_2 = y_{21} \cdot u_1 + y_{22} \cdot u_2$$

Z těchto základních rovnic lze opět odvodit vzorce pro výpočet jednotlivých parametrů. Význam parametrů y je následující:

$$Y_{11} = \frac{i_1}{u_1} \quad \text{pro } u_2 = 0. \text{ Je to vstupní vodivost tranzistoru při výstupu nakrátko.}$$

$$Y_{12} = \frac{i_1}{u_2} \quad \text{pro } u_1 = 0. \text{ Je to t.zv. inverzní přenosová vodivost při vstupu nakrátko.}$$

$$Y_{21} = \frac{i_2}{u_1} \quad \text{pro } u_2 = 0. \text{ Je to přímá přenosová vodivost při výstupu při výstupu nakrátko.}$$

$$Y_{22} = \frac{i_2}{u_2} \quad \text{pro } u_1 = 0. \text{ Je to výstupní vodivost při vstupu nakrátko}$$

Je vidět, že všechny definiční podmínky parametrů vyžadují vstup nebo výstup nakrátko, což se snadno realizuje pomocí kondenzátorů.

Tyto vf parametry udává výrobce obvykle v grafech a to v polárních nebo v pravoúhlých souřadnicích. Mezi h-parametry a y-parametry existují jednoznačné vztahy pro vzájemný přepočet.

$$\Delta Y = Y_{11} \cdot Y_{22} - Y_{12} \cdot Y_{21} = \frac{h_{22}}{h_{11}}$$

$$Y_{11} = \frac{1}{h_{11}} \quad Y_{12} = -\frac{h_{12}}{h_{11}} \quad Y_{21} = \frac{h_{21}}{h_{11}} \quad Y_{22} = \frac{\Delta h}{h_{11}}$$

$$\Delta h = h_{11} \cdot h_{22} - h_{12} \cdot h_{21} = \frac{Y_{22}}{Y_{11}}$$

$$h_{11} = \frac{1}{Y_{11}} \quad h_{12} = -\frac{Y_{12}}{Y_{11}} \quad h_{21} = \frac{Y_{21}}{Y_{11}} \quad h_{22} = \frac{\Delta Y}{Y_{11}}$$

Tranzistorové zesilovače mohou pracovat ve třech možných zapojeních. V zapojení se společným emitorem (SE), společným kolektorem (SC) nebo se společnou bází (SB). V katalogích bývají uváděny pouze parametry pro zapojení se společným emitorem. Pro ostatní dvě zapojení se parametry přepočítají podle následujících vzorců:

Pro přepočet parametrů SE na SC a SB platí tyto vztahy:

$$h_{11C} = h_{11e} \quad h_{12C} = 1 - h_{12e}$$

$$h_{21C} = -(1+h_{21e}) \quad h_{22C} = h_{22e}$$

$$h_{11B} = \frac{h_{11e}}{1+h_{21e}} \quad h_{12B} = \frac{h_{11e} \cdot h_{22e}}{1+h_{21e}} - h_{12e}$$

$$h_{21B} = -\frac{h_{21e}}{1+h_{21e}} \quad h_{22B} = \frac{h_{22e}}{1+h_{21e}}$$

Ze známých h-parametrů lze vypočítat parametry zesilovače  $A_U, A_i, r_1, r_2$ .

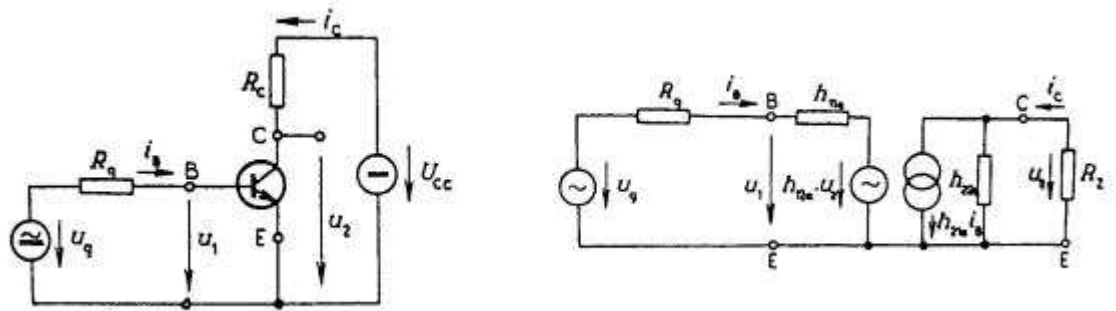
	h parametry	y parametry
$Z_{vstup}$	$\frac{\Delta h + h_{11} \cdot Y_z}{h_{22} + Y_z}$	$\frac{Y_{22} - Y_z}{\Delta y + y_{11} \cdot Y_z}$
$Z_{výst}$	$\frac{h_{11} + Z_g}{\Delta h + h_{22} \cdot Z_g}$	$\frac{Y_{11} - Y_g}{\Delta y + y_{22} \cdot Y_g}$
$A_U$	$\frac{-h_{21} \cdot Z_z}{h_{11} + \Delta h \cdot Z_z}$	$\frac{-Y_{21}}{Y_{22} + Y_z}$
$A_i$	$\frac{-h_{21} \cdot Y_z}{h_{22} + Y_z}$	$\frac{-Y_{21} \cdot Y_z}{\Delta y + y_{11} \cdot Y_z}$

$$A_y = \frac{Z_z}{Z_{vstup}} \cdot A_i^2$$

## Zesilovací stupně s bipolárními tranzistory.

1) Tranzistorový stupeň se společným emitorem.

Společnou elektrodou vstupního a výstupního obvodu je emitor.



Napět'ový přenos  $A_{U'} = \frac{u_2}{u_1}$  se určí z rovnic

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

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

$$u_2 = -R_z \cdot i_c$$

Řešením rovnic dostaneme  $A_{U'} = -\frac{h_{21e} \cdot R_z}{h_{11e} + \Delta h_e \cdot R_z}$ , kde  $\Delta h_e = h_{11e} \cdot h_{22e} - h_{12e} \cdot h_{21e}$

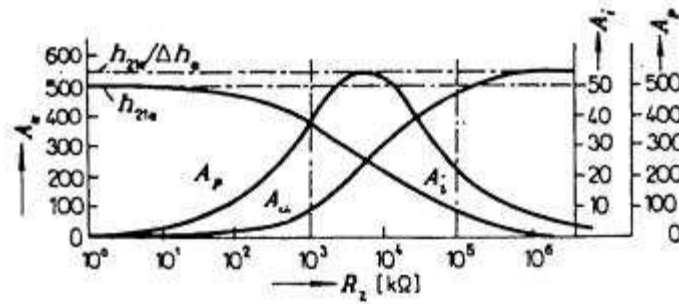
Pro  $R_z = 0$  je  $A_{U' \min} = 0$

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

V praxi velmi často platí, že  $R_z \ll \frac{1}{h_{22e}}$  a  $h_{12e} \cdot h_{21e} \cdot R_z \ll h_{11e}$ . Potom je napět'ový

přenos dán vztahem  $A_{U'} = -\frac{h_{21e}}{h_{11e}} \cdot R_z$ . Znaménko minus znamená, že výstupní napětí má opačné znaménko než napětí vstupní, čili že dané zapojení otáčí napět'ovou fází o  $180^\circ$ . Největší napět'ové zesílení je u tranzistoru s velkým proudovým činitelem  $h_{21e}$  a malým vstupním odporem nakrátko. Nejvyšší hodnota bývá řádu stovek až tisíců.

Průběh přenosu je na obr.



Závislost napětového, proudového a výkonového přenosu na zatěžovacím odporu u stupně SE

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

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

$$u_2 = i_C \cdot R_Z$$

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

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

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

Pro  $R_Z = 0$  i  $R_Z \rightarrow \infty$  je  $A_p = 0$ .

Pro malé odpory  $R_Z$  je  $A_p \sim - \frac{h_{21e}^2}{h_{11e}} \cdot R_Z$ .

Při velkých  $R_Z$  je  $A_p \sim - \frac{h_{21e}^2}{\Delta h_e \cdot h_{22e}} \cdot \frac{1}{R_Z}$ .

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

Vstupní odpor je dán vztahem

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

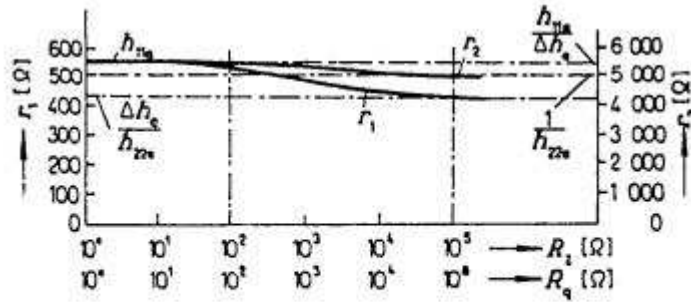
$$i_C = h_{21e} \cdot i_B + h_{22e} \cdot u_2$$

$$u_2 = -i_C \cdot R_Z$$

Řešením těchto rovnic dostaneme

$$r_1 = \frac{h_{11e} + \Delta h_e \cdot R_z}{1 + h_{22e} \cdot R_z} = \frac{\Delta h_e + h_{11e} \cdot G_z}{h_{22e} + G_z}$$

Pro  $R_z = 0$  a  $R_z \rightarrow \infty$  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. Průběh vstupního odporu je na obr.



Závislost vstupního odporu  $r_1$  na zatěžovacím odporu  $R_z$  stupně SE a závislost výstupního odporu  $r_2$  na odporu generátoru  $R_g$  u stupně SE.

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  $R_{vyst} = \frac{r_2 \cdot R_C}{r_2 + R_C}$ . Často ovšem platí, že  $r_2 \gg R_C$  a potom je  $R_{vyst} \sim R_C$ .

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

$$C_{vst} = C_{BE} + C_{BC}(1 + A_u)$$

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.

Výstupní kapacita se určí ze vztahu

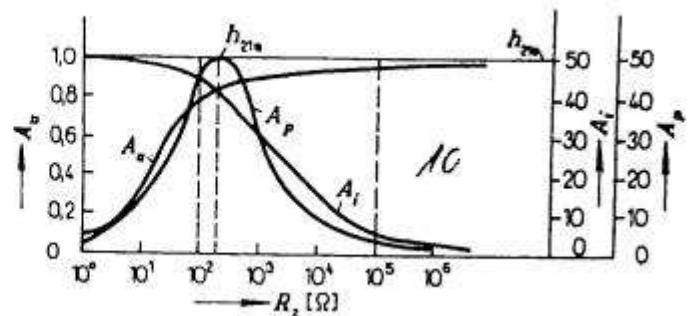
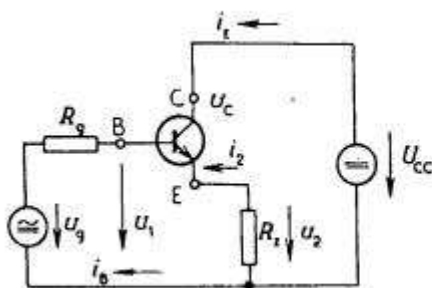
$$C_{vst} = C_{CE} + \frac{h_{21e} \cdot C_{BC}}{1 + \frac{h_{11e}}{R_g}} . \text{ Obyčejně bývá } h_{11e} \gg R_g, \text{ potom } C_{vst} \sim C_{CE}.$$

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

## 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  $A_u$ ,  $A_i$ ,  $A_p$ ,  $r_1$ ,  $r_2$ .

Schéma zapojení zesilovacího stupně v zapojení SC .

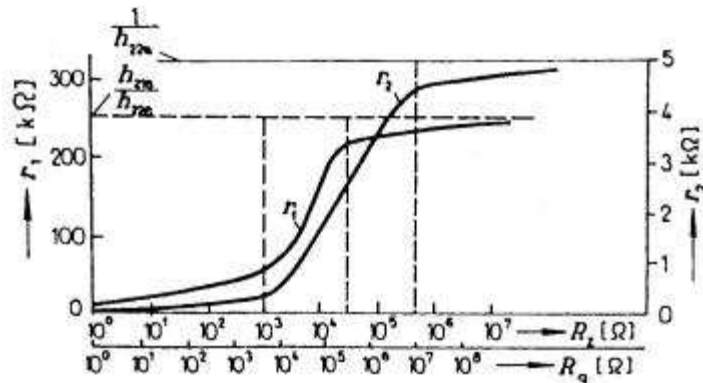


Dosazením přepočtených vztahů do vzorců pro  $A_u$  dostaneme:

pro  $R_g = 0$  je  $A_{vmin} = 0$ . Pro  $R_g \rightarrow \infty$  je  $A_{vmax} = 1$ . 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

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

Výstupní impedance mezi emitorem a je společnou svorkou je

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

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

## Vstupní impedance.

$$i_1 = \frac{u_1 - u_2}{R_g} = \frac{u_1 - Au_1}{R_g} = \frac{u_1(1 - A)}{R_g}.$$

Do vstupu teče proud



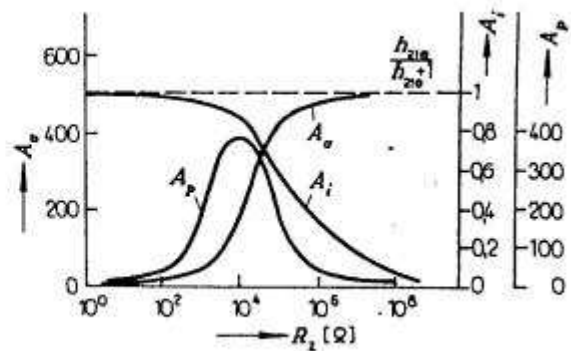
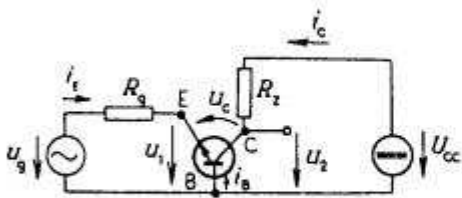
Odtud vstupní odpor  $r_1 = \frac{u_1}{i_1} = \frac{R_g}{1-A}$ . Pro  $A \rightarrow 1$  je  $R_g \rightarrow \infty$ .

stupní 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.

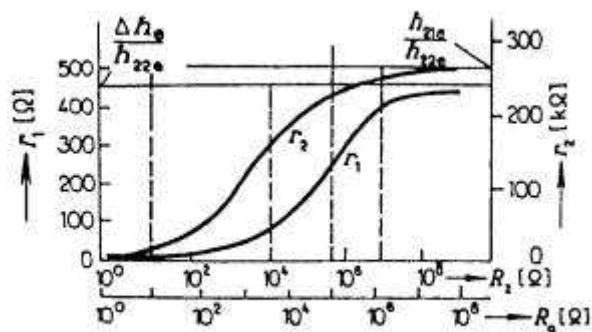


Teoreticky se hodnota napěťového přenosu liší málo od zapojení SE, pouze zde není fázový posuv mezi vstupním a výstupním napětím. Pro  $R_z \rightarrow \infty$  je napěťový přenos přibližně  $h_{21e}/\Delta h_e$  a pro  $R_z = 0$  je napěťový přenos roven 0. Závislost napěťového zesílení  $A_U$  na 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

Čtyřpólové parametry tranzistoru jsou závislé na pracovním bodě. Proto bývají v katalozích jejich hodnoty udávány pro definovaný pracovní bod. Je-li pracovní bod tranzistoru jiný, udává výrobce převodní grafy, z nichž se odečtou koeficienty, kterými se v závislosti na jiný kolektorový proud nebo jiné napětí kolektor-emitor vynásobí udané čtyřpólové parametry.

V prvním kvadrantu jsou uvedeny výstupní charakteristiky. Z nich lze odečíst parametr  $h_{22e}$ . Ve druhém kvadrantu je uvedena převodní charakteristika. Z ní lze odečíst v pracovním bodě parametr  $h_{21e}$ . Ve třetím kvadrantu jsou uvedeny vstupní charakteristiky a v pracovním bodě lze odečíst parametr  $h_{11e}$ . Ve čtvrtém kvadrantu je uvedena zpětná charakteristika a v pracovním bodě lze odečíst parametr  $h_{12e}$ .

Závislost h-parametrů na frekvenci.

Při nízkých frekvencích jsou h-parametry pouze reálná čísla. Při vyšších frekvencích, když jsou doby průchodu signálu přes přechody srovnatelné s periodou zpracovávaných signálů, jsou ovšem h-parametry komplexní čísla. Např. pro proudový zesilovací činitel platí vztah

$$h_{21}(f) = \frac{h_{21}(MF)}{1 + j \frac{f}{f_m}}$$

, kde  $f_m$  je mezní frekvence, při které klesá absolutní hodnota

$$|h_{21}(f)| = \frac{h_{21}(MF)}{\sqrt{1 + \left(\frac{f}{f_m}\right)^2}}$$

proudového činitele o 3 dB.

Kromě mezní frekvence se společným emitorem  $f_m = f_{h_{21e}}$  je uvedena tranzitní frekvence tranzistoru  $f_T$ . Je to frekvence, při níž klesne parametr  $h_{21e}$  na hodnotu 1. Hodnota tranzitní frekvence  $f_T$  je udávána výrobcí v katalogích.

Zdroj: <http://moryst.web.cz/elt2/stranky1/elt020.htm>