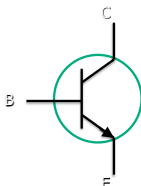




Elektronika a Mikroelektronika A4B34EM

4. přednáška

- Bipolární tranzistor
- Parametry
- Aplikace



Jiří Jakovenko – Elektronika a Mikroelektronika - Katedra mikroelektroniky – ČVUT FEL

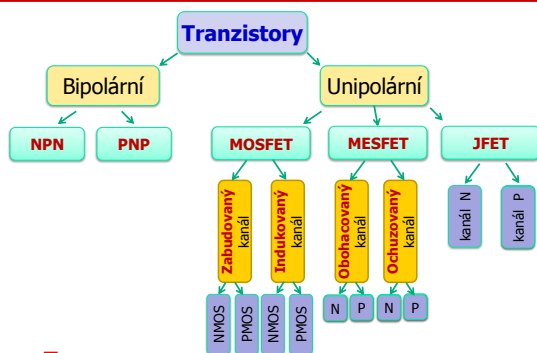


Tranzistory – základní pojmy

- V elektronice a mikroelektronice jsou mimo *pasivních součástek* (odpory, kondenzátory, cívky, ...) potřeba *součástky aktivní*, které jsou schopny obecně *zesilovat výkon*.
- Je potřeba zařízení, schopné *malým výkonem ovládat výkon větší*. Něco, podobného, jako je v hydrodynamice ventil.
- Tuto funkci plní různé druhy *tranzistorů*.
- Tranzistory jsou obecně *trojpolý*, u kterých se proudem nebo napětím na řídicí elektrodě ovládá proud mezi dalšími dvěma elektrodami.



Tranzistory – základní rozdělení



Jiří Jakovenko – Elektronika a Mikroelektronika - Katedra mikroelektroniky – ČVUT FEL



Bipolární tranzistory

- Bipolární tranzistory existují v uspořádáních **NPN** a **PNP**.
- U NPN je mezi dvěma elektrodami typu *n*, **kolektorem** a **emitorem**, tenká vrstva typu *p*, **báze**, která je **řídicí elektrodou**.
- U typu PNP je vodivost oblastí obrácená.



- Připojíme k tranzistoru NPN obvod kladnou částí ke kolektoru a zápornou k emitoru. Je-li **báze odpojena**, protéká jen **nepatrný zbytkový** proud minoritních nosičů. Tranzistor je **zavřený**.
- Připojí-li se k **bázi kladné** napětí větší než diodový skok (u Si 0.6 V), protéká přechodem B-E proud. Elektron, který je majoritním nosiči v emitoru, přecházejí do báze, kde jsou nosiči minoritními. Protože báze je velmi tenká, pokračuje většina elektronů do kolektoru, zatímco do báze jich teče jen nepatrně, přestože proud **bázi** děj **ovládá**. Tranzistor je **otevřený**.



Jiří Jakovenko – Elektronika a Mikroelektronika - Katedra mikroelektroniky – ČVUT FEL



- U otevřeného tranzistoru platí $I_C = h_{21e} I_B$.
- Elektrody jsou **nazvány** z hlediska **skutečného** pohybu nosičů náboje nikoli konvenčního proudu.
- **Vlastnosti** tranzistorů NPN a PNP závisí na vlastnostech, jako pohyblivosti a době života majoritních nosičů náboje. Proto **nejsou** úplně **symetrické**. To je problém např. u dvojčinných zapojení.

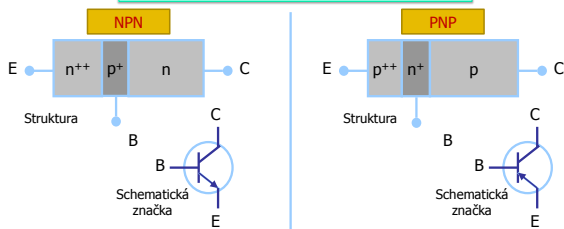


Jiří Jakovenko – Elektronika a Mikroelektronika - Katedra mikroelektroniky – ČVUT FEL



Bipolární tranzistory

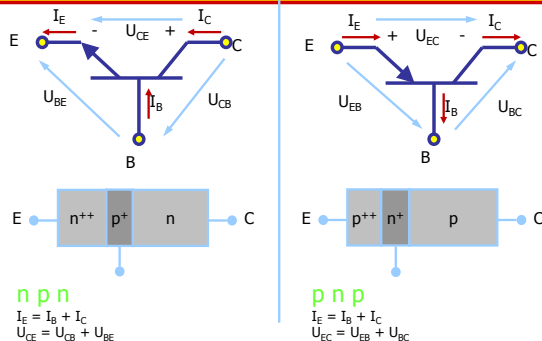
Dva typy bipolárních tranzistorů:



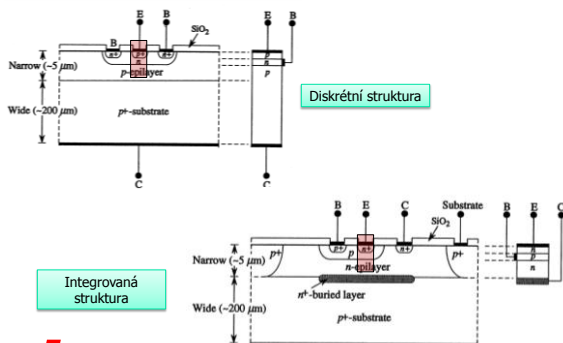
Koncentrace příměsí v emitoru je velká, obvykle 10^{22}
Koncentrace příměsí v bázi je o několik řádů menší ($\sim 10^{16} - 10^{17}$)
kolektor je málo dotovaný $\sim 10^{15}$



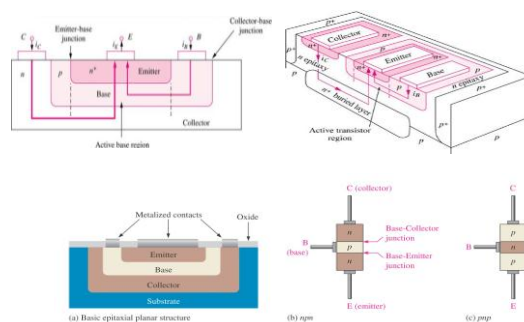
Popis proudů a napětí



Reálná struktura bipolárního tranzistoru



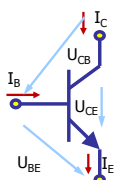
Reálná struktura bipolárního tranzistoru



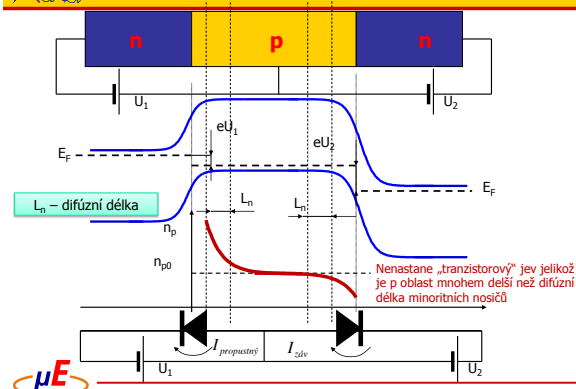
Režimy bipolárního tranzistoru

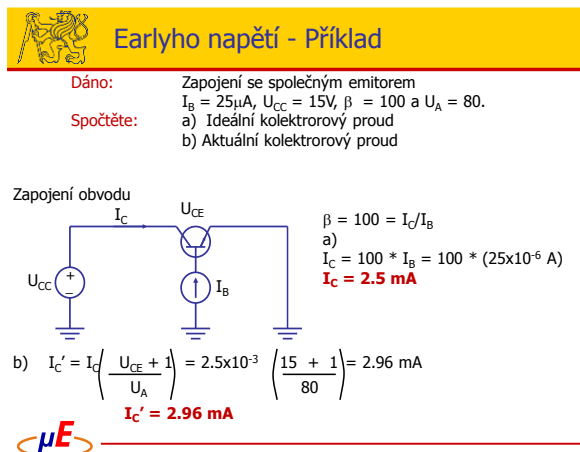
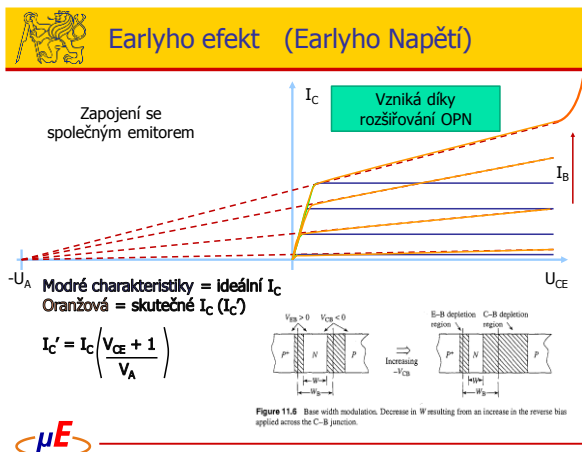
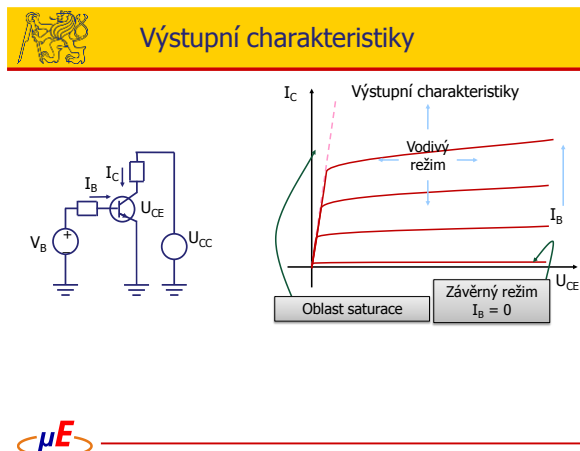
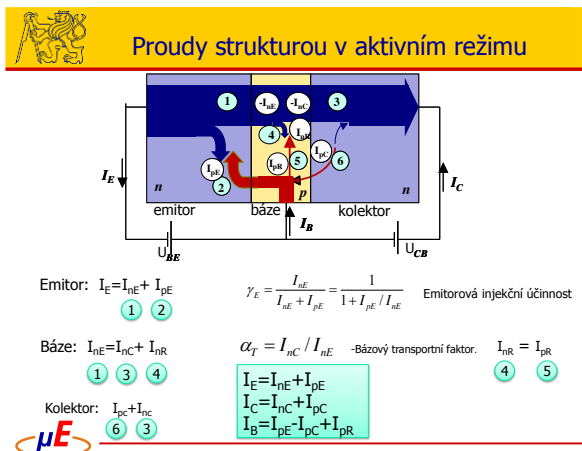
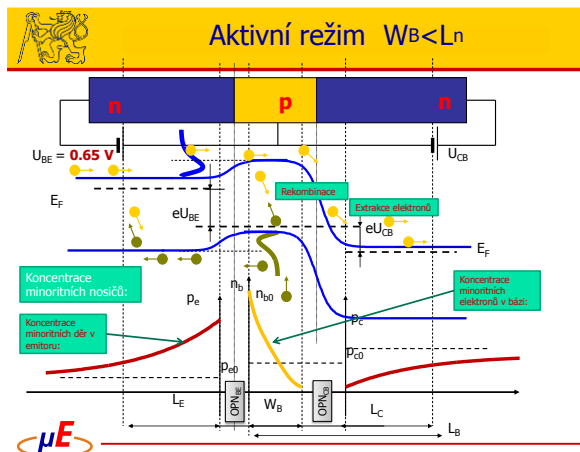
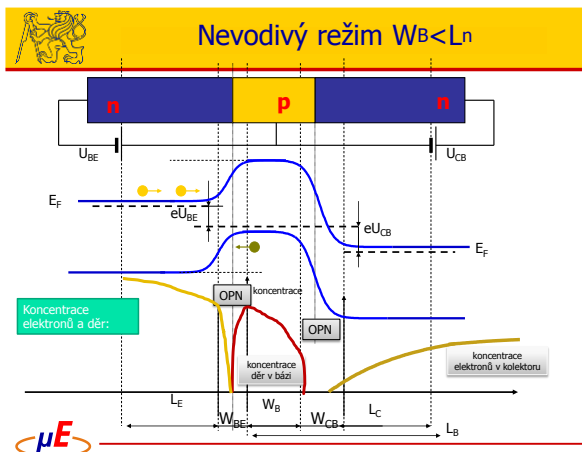
Tranzistoru je možno polarizovat čtyřmi způsoby

| Režim | Polarizace B-E | Polarizace B-C |
|----------|-----------------------------|-----------------------------|
| Nevodivý | $U_{BE} < U_T$ závěrně | $U_{BC} < 0$ závěrně |
| Aktivní | $U_{BE} > U_T$ propustně | $U_{BC} < 0$ závěrně |
| Inverzní | $U_{BE} < 0$ závěrně | $U_{BC} > U_T$ propustně |
| Saturace | $U_{BE} > 0$ propustně | $U_{BC} > 0$ propustně |

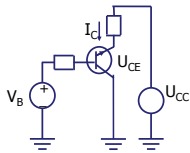


Spojením dvou diod tranzistor nelze vytvořit

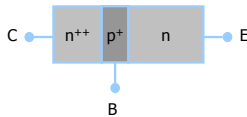




Inverzní režim

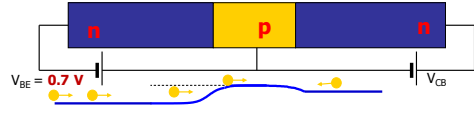


- Tranzistor je zapojen jako v aktivním režimu, jen je zaměněn emitor s kolektorem
- Jelikož je kolektor málo dotovaný, má tranzistor špatné vlastnosti
- Používá se jen zřídka, např. hradlo NAND v TTL technologii

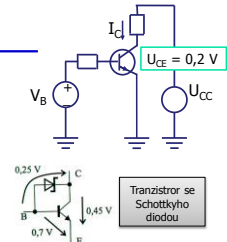


Jiří Jakovenko – Elektronika a Mikroelektronika - Katedra mikroelektroniky – ČVUT FEL

Režim Saturace

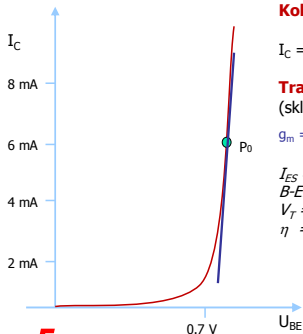


- Jeli proud do báze tak velký, že injekce elektronů způsobí zaplavení přechodu B-C, dojde ke změně jeho polarizace do **propustného směru**
- Tranzistor vykazuje velmi malý odpor
- Použití tranzistoru jako spínače
- Nevýhoda – nutnost odvedení velkého náboje při vypínání z oblasti báze



Jiří Jakovenko – Elektronika a Mikroelektronika - Katedra mikroelektroniky – ČVUT FEL

Vstupní charakteristika



Kolektorový proud:

$$I_C = \alpha I_{ES} e^{V_{BE}/U_T}$$

Transkonduktance:

(sklon křivky v pracovním bodě)

$$g_m = \Delta I_C / \Delta V_{BE}$$

I_{ES} = Závěrný saturační proud přechodu B-E.

$$V_T = kT/q = 26 \text{ mV (@ } T=300 \text{ K)}$$

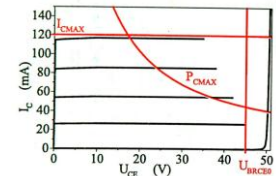
η = emission coefficient - obvykle ~1



Mezní parametry tranzistoru

- Maximální napětí U_{CE}
- Maximální napětí U_{BE}
- Maximální proud I_C
- Maximální ztrátový výkon $P_{CMAX} = U_{CE} \cdot I_C$
- Maximální vstupní proud I_B

Ochrana proti vysokému závěrnému napětí

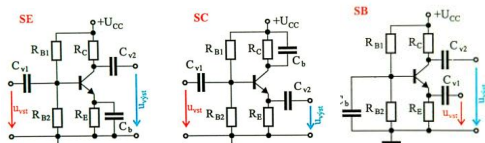


Jiří Jakovenko – Elektronika a Mikroelektronika - Katedra mikroelektroniky – ČVUT FEL

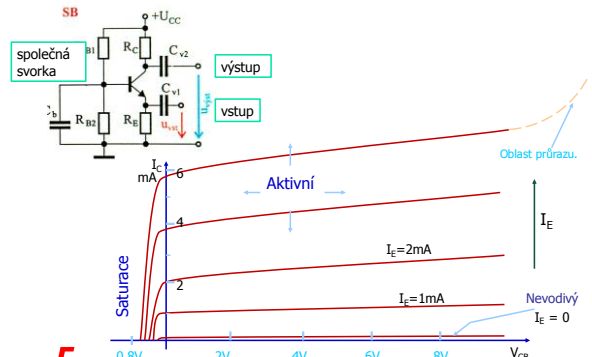
Základní zapojení s bipolárním tranzistorem

Z hlediska zapojení rozeznáváme tři základní konfigurace:

- Společná báze (SB) :
vstup = U_{EB} & I_E
výstup = U_{CB} & I_C
- Společný emitor (SE):
vstup = U_{BE} & I_B
výstup = U_{CE} & I_C
- Společný kolektor (SC) :
vstup = U_{BC} & I_B
výstup = U_{EC} & I_E



Zapojení se společnou bází SB





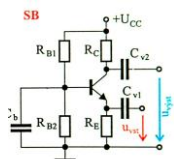
Zapojení se společnou bází SB

- α = Proudový zesilovací činitel se společnou bází
■ (0.9-0.999; typicky 0.99)

$$\alpha = \frac{i_C}{i_E}$$

$$i_C = I_S e^{\frac{U_{BE}}{U_T}}$$

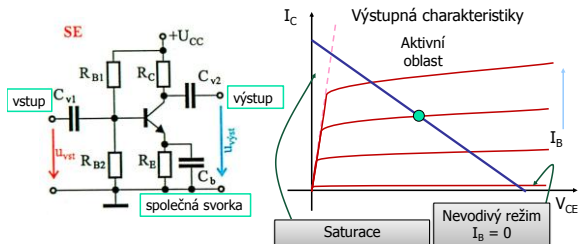
$$i_E = \frac{I_S}{\alpha} e^{\frac{U_{BE}}{U_T}}$$



Jiří Jakovenko – Elektronika a Mikroelektronika - Katedra mikroelektroniky – ČVUT FEL



Zapojení se společným emitorem



Jiří Jakovenko – Elektronika a Mikroelektronika - Katedra mikroelektroniky – ČVUT FEL



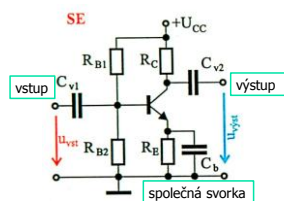
Zapojení se společným emitorem

- β = Proudový zesilovací činitel (10-1000; typicky 50-200)

$$\beta = \frac{i_C}{i_B}$$

$$i_C = I_S e^{\frac{U_{BE}}{U_T}}$$

$$i_B = \frac{I_S}{\beta} e^{\frac{U_{BE}}{U_T}}$$



Jiří Jakovenko – Elektronika a Mikroelektronika - Katedra mikroelektroniky – ČVUT FEL



Relace mezi α a β

- α = Proudový zesilovací činitel se společnou bází
■ (0.9-0.999; typicky 0.99)
- β = Proudový zesilovací činitel se společným emitorem
■ (10-1000; typicky 50-200)

$$\alpha = \frac{\beta}{\beta + 1}$$

$$\beta = \frac{\alpha}{1 - \alpha}$$

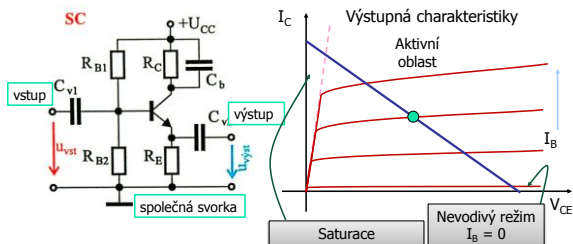
Například:
 $\alpha = 0.98, \beta = 49$
 $\alpha = 0.99, \beta = 99$
 $\alpha = 0.995, \beta = 199$



Jiří Jakovenko – Elektronika a Mikroelektronika - Katedra mikroelektroniky – ČVUT FEL



Zapojení se společným kolektorem



- Zapojení má prakticky stejné výstupní charakteristiky

$$\alpha = I_C / I_E \text{ a } I_C \sim I_E$$

$$\text{proto } \alpha \sim 1$$

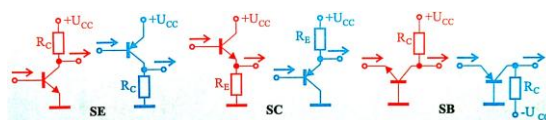


Jiří Jakovenko – Elektronika a Mikroelektronika - Katedra mikroelektroniky – ČVUT FEL



Možné varianty základních zapojení

- Bez nastavení pracovního bodu

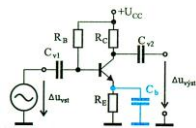


Jiří Jakovenko – Elektronika a Mikroelektronika - Katedra mikroelektroniky – ČVUT FEL

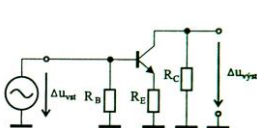


Zesilovače malého signálu

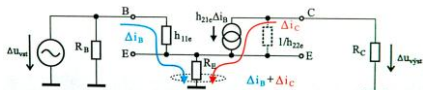
Zesilovač napětí v konfiguraci SE



Náhradní obvod pro střídavý signál



Náhradní lineární obvod pro střídavý signál



Jiří Jakovenko – Elektronika a Mikroelektronika - Katedra mikroelektroniky – ČVUT FEL



Náhradní lineární obvod a h parametry

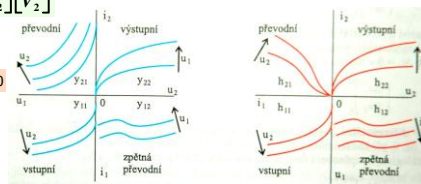
$$\begin{bmatrix} V_1 \\ I_2 \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} h_{11} & h_{12} \\ h_{21} & h_{22} \end{bmatrix} \begin{bmatrix} I_1 \\ V_2 \end{bmatrix}$$

$$h_{11} = \frac{V_1}{I_1} \Big|_{V_2=0}$$

$$h_{12} = \frac{V_1}{V_2} \Big|_{I_1=0}$$

$$h_{21} = \frac{I_2}{I_1} \Big|_{V_2=0}$$

$$h_{22} = \frac{I_2}{V_2} \Big|_{I_1=0}$$



Jiří Jakovenko – Elektronika a Mikroelektronika - Katedra mikroelektroniky – ČVUT FEL



h - Parametry

$$h_{11} = \frac{V_1}{I_1} \Big|_{V_2=0}$$

$$h_{12} = \frac{V_1}{V_2} \Big|_{I_1=0}$$

$$h_{21} = \frac{I_2}{I_1} \Big|_{V_2=0}$$

$$h_{22} = \frac{I_2}{V_2} \Big|_{I_1=0}$$

$h_{11} = h_i$ = Vstupní diferenciální odpor
 $h_{12} = h_r$ = Zpětný diferenciální přenos napětí
 $h_{21} = h_f$ = Proudový diferenciální přenos
 $h_{22} = h_o$ = výstupní diferenciální vodivost

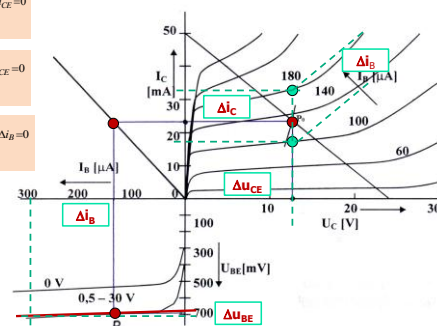


Odečtení h parametrů z charakteristik

$$h_{11e} = \frac{\Delta u_{BE}}{\Delta i_B} \Big|_{\Delta u_{CE}=0}$$

$$h_{21e} = \frac{\Delta i_C}{\Delta i_B} \Big|_{\Delta u_{CE}=0}$$

$$h_{22e} = \frac{\Delta i_C}{\Delta u_{CE}} \Big|_{\Delta i_B=0}$$

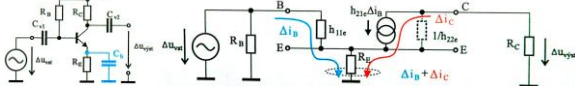


Jiří Jakovenko – Elektronika a Mikroelektronika - Katedra mikroelektroniky – ČVUT FEL



Zesilovače malého signálu

Náhradní lineární obvod pro střídavý signál



- Řešení bez kondenzátoru C_B
- Pro jednoduchost zanedbáme h_{21e} a h_{22e}

$$\Delta u_{vyst} = -h_{21e} \Delta i_B R_C$$

$$\Delta u_{vst} = h_{11e} \Delta i_B + R_E (\Delta i_B + h_{21e} \Delta i_B) = [h_{11e} + R_E (1 + h_{21e})] \Delta i_B$$

- Napětové zesílení:

$$A_u = \frac{\Delta u_{vyst}}{\Delta u_{vst}} = -\frac{h_{21e} R_C}{h_{11e} + R_E (1 + h_{21e})}$$

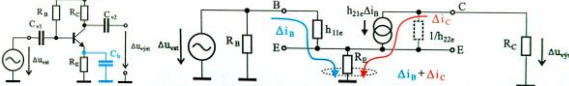


Jiří Jakovenko – Elektronika a Mikroelektronika - Katedra mikroelektroniky – ČVUT FEL



Zesilovače malého signálu

Náhradní lineární obvod pro střídavý signál



- Pro $h_{11e} \ll R_E (1 + h_{21e})$

$$A_u = \frac{\Delta u_{vyst}}{\Delta u_{vst}} = -\frac{R_C}{R_E}$$

- Uvažujeme-li zapojenou kapacitu:

$$A_u = \frac{\Delta u_{vyst}}{\Delta u_{vst}} = -\frac{h_{21e} R_C}{h_{11e}}$$

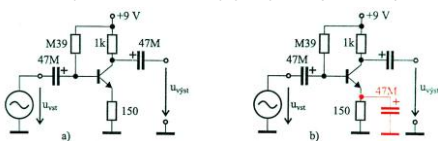


Jiří Jakovenko – Elektronika a Mikroelektronika - Katedra mikroelektroniky – ČVUT FEL



Zesilovače malého signálu - příklad

- Určete napěťové zesílení dle zapojení, je-li h_{21e} 200 a h_{22e} 600 Ohm



$$A_u = \frac{\Delta u_{výst}}{\Delta u_{vst}} = -\frac{R_C}{R_E} = \frac{1000}{150} = -6,67$$

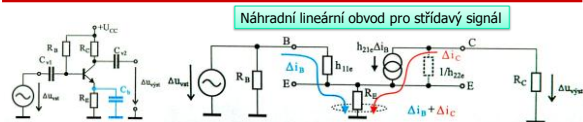
$$A_u = \frac{\Delta u_{výst}}{\Delta u_{vst}} = -\frac{h_{21e} \cdot R_C}{h_{11e}} = \frac{200 \cdot 1000}{600} = -333$$



Jiří Jakovenko – Elektronika a Mikroelektronika - Katedra mikroelektroniky – ČVUT FEL



Zesilovače malého signálu – vstupní a výstupní odpor



- Pro zapojený C_b :

$$R_{vst} = R_B \parallel h_{11e}$$

- Pro nezapojený:

$$R_{vst} = R_B \parallel \left(\frac{\Delta u_{výst}}{\Delta i_B} \right) = R_B \parallel [h_{11e} + R_E (1 + h_{21e})]$$

- Výstupní odpor:

$$R_{výst} = (1/h_{22e}) \parallel R_C$$

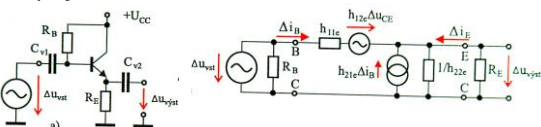


Jiří Jakovenko – Elektronika a Mikroelektronika - Katedra mikroelektroniky – ČVUT FEL

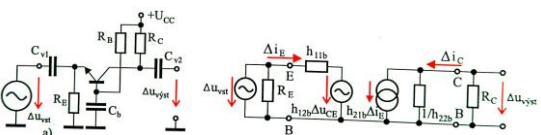


Zesilovače SC a SB a jejich NLO

- Zapojení SC



- Zapojení SB



Jiří Jakovenko – Elektronika a Mikroelektronika - Katedra mikroelektroniky – ČVUT FEL



Vlastnosti zesilovačů malého signálu

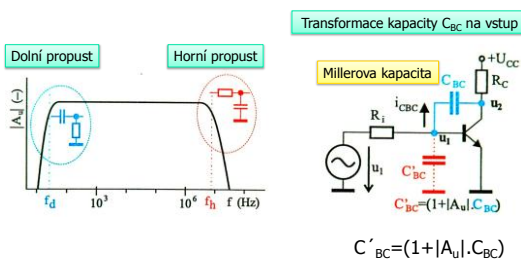
| Parametr | SE | SC | SB |
|-----------------------|---|--|--|
| A_u | $-(h_{21e}/h_{11e}) \cdot (R_C \parallel 1/h_{22e})$ velké | $(h_{21e} \cdot R_E) / (h_{21e} \cdot R_E + h_{11e})$ menší než 1 | $(h_{21e} / h_{11e}) \cdot (R_C \parallel 1/h_{22e})$ velké |
| A_i | $h_{21e} \gg 1$ | $h_{21e} \gg 1$ | $[h_{21e} / (1 + h_{22e} \cdot R_C)] < 1$ |
| $A_P = A_u \cdot A_i$ | velké | malé | malé |
| R_{vst} | $R_B \parallel h_{11e}$ střední | $R_B \parallel [h_{11e} + (h_{21e} + 1) \cdot R_E]$ velký | $R_E \parallel h_{11e}$ malý |
| $R_{výst}$ | $R_C \parallel (1/h_{22e})$ střední | $R_E \parallel [(h_{11e} + R_B) / h_{21e}]$ malý | $R_C \parallel (1/h_{22e})$ velký |



Jiří Jakovenko – Elektronika a Mikroelektronika - Katedra mikroelektroniky – ČVUT FEL



Dolní a horní mezní kmitočty zesilovače



Jiří Jakovenko – Elektronika a Mikroelektronika - Katedra mikroelektroniky – ČVUT FEL



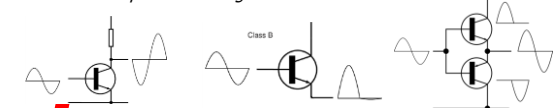
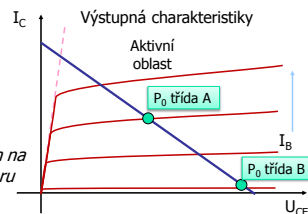
Zesilovač ve třídě A a B

- Třída A:

- Pracovní bod v $1/2 U_{cc}$
- Lineární
- Stálá spotřeba

- Třída B:

- Pracovní bod je nastaven na hranici otevření tranzistoru
- Nelineární
- Nulová spotřeba bez signálu

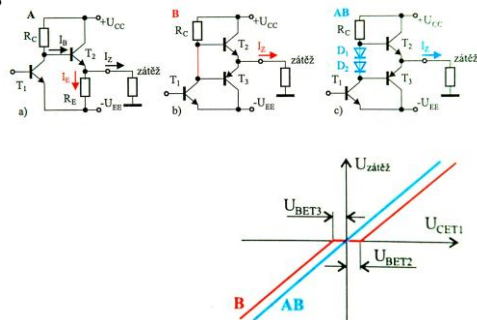


Jiří Jakovenko – Elektronika a Mikroelektronika - Katedra mikroelektroniky – ČVUT FEL



Zesilovač ve třídě A a B

■ S

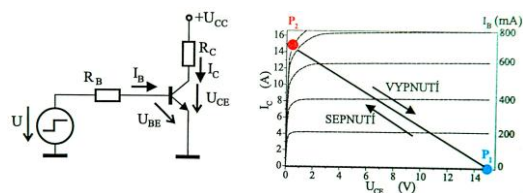


Jiří Jakovenko – Elektronika a Mikroelektronika - Katedra mikroelektroniky – ČVUT FEL



Tranzistor jako spínač

■ spínač s odporovou zátěží



Jiří Jakovenko – Elektronika a Mikroelektronika - Katedra mikroelektroniky – ČVUT FEL