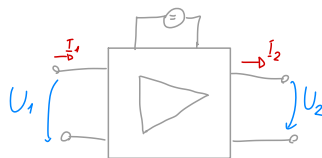


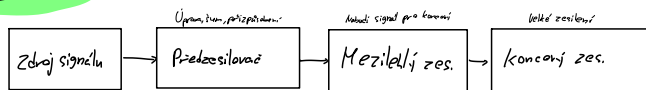
Nizkofrekvenční zesilovače (20Hz - 20kHz)

- el. zařízení zesilující el. signál = Transformuje energii SS zdroje na užitečný signál

↳ zvětšuje se pouze amplituda (fáz i frekvence se nemění)



Nř řetězec

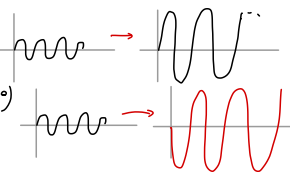


- dělení dle zesilovací veličiny

- $U - Z_{in} \rightarrow \infty$
- $I - Z_{in} \rightarrow 0$
- P

- dělení dle fáze výstupu

neinvertující
invertující ($\varphi = 180^\circ$)



- Přenos zesilovače: Vztah mezi vstupní a výstupní veličinami (jak fáze, tak amplituda). $\bar{A} = |\bar{A}_u| \cdot e^{i\varphi}$

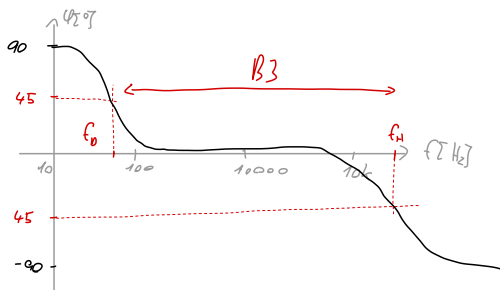
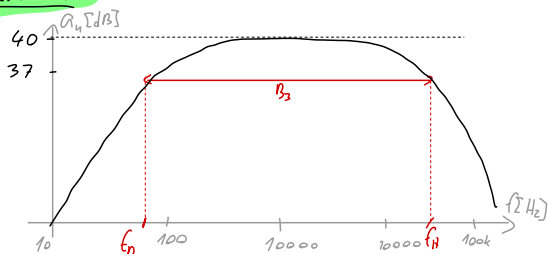
- zesílení: $A_u = \frac{U_2}{U_1}$, $A_I = \frac{I_2}{I_1}$, $A_P = \frac{P_2}{P_1}$

↑
zesílení

- útlum D - opak zesílení

- Zisk - zesílení v dB --- $a_u = 20 \log A_u$ [dB]

Přenosná char.

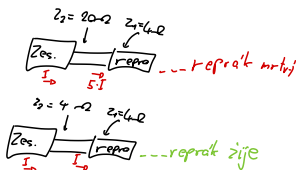


Vstupní impedance - jaký odpor má vůči vstupu

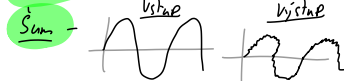
- $Z_1 = \frac{U_1}{I_1}$ --- ideálně $\rightarrow \infty$

Výstupní impedance - jaký odpor má na výstupu

- $Z_2 = \frac{U_2}{I_2}$ --- ideálně $\rightarrow 0$



Zkreslení - není dokonale, výstup je lehce zkreslen (jiný tvar, jiná velikost, ...)



Zpětná vazba

- Přivedení části výstupu zpět na vstup

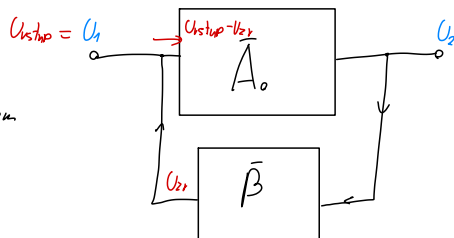
a) **Kladná ZV** - výstup se na vstup přivede ve fázi → sečtení se vstupem

→ zneustálé zesilování, nade všechny meze

- zhoršuje stabilitu, ničí součastky, nelineární zkreslení

- zvyšuje zesílení

→ **NEPOUŽÍVÁ SE**



b) **Záporná ZV** - výstup se na vstup přivede v protifázi → odečítá se

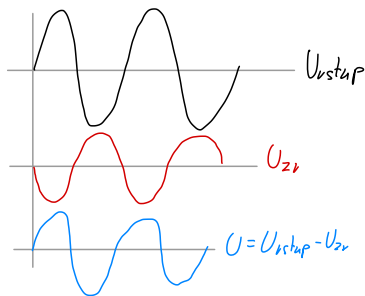
- Blackův vztah ... $A_u = \frac{U_2}{U_1} = \frac{A_0}{(1 + \beta \cdot A_0)} F$

- Řešíme, jestli je $F = \beta \cdot A_0 > 1$ nebo < 1

- Pokud $F = \beta \cdot A_0 > 1$... $\frac{A_0}{>1}$... zmenšujeme zesílení → **Záporná ZV**

- Pokud $F = \beta \cdot A_0 < 1$... $\frac{A_0}{<1}$... zvětšujeme zesílení → **Kladná ZV**

- $\varphi = 180^\circ$ → signály se odečítají

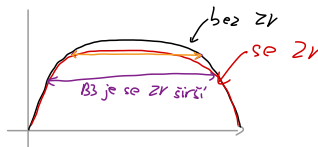


- Nevýhoda - snižuje zesílení

- Výhody - snižuje zkreslení

- zvyšuje stabilitu

- rozšiřuje pásmo B3



Pr:

Máme zesilovač se ZV, zesilení napáždno $A_0 = 1000$, urči A při:

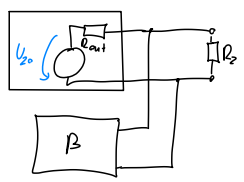
a) $\beta = -0,005 \rightarrow A = \frac{A_0}{1 - \beta \cdot A_0} = \frac{1000}{1 - (-0,005) \cdot 1000} = 167 \dots A < A_0 \rightarrow \text{čápnorná ZV}$

b) $\beta = -0,05 \rightarrow A = \frac{A_0}{1 - \beta \cdot A_0} = \frac{1000}{1 - (-0,05) \cdot 1000} = 20 \dots A < A_0 \rightarrow \text{čápnorná ZV}$

c) $\beta = +0,001 \rightarrow A = \frac{A_0}{1 - \beta \cdot A_0} = \frac{1000}{1 - (+0,001) \cdot 1000} = \frac{1}{0} \dots A \rightarrow \infty \rightarrow \text{kladná ZV při nastavení pro oscilátor}$

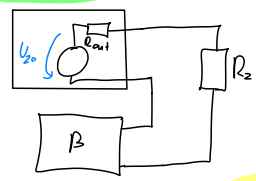
ZV vazba a vstupní a výstupní odpor

a) Napětová ZV



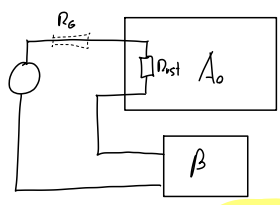
Snizuje výstupní odpor: $R_{outZV} \leq \frac{R_{out}}{F}$

b) Proudová ZV



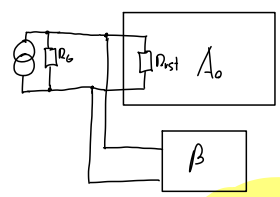
Zvyšuje výstupní odpor: $R_{outZV} \geq R_{out} \cdot F$

c) Sériová zpětná vazba



Zvyšuje výstupní odpor: $R_{outZV} \geq R_{out} \cdot F$

d) Paralelní ZV vazba



Snizuje výstupní odpor: $R_{outZV} \leq \frac{R_{out}}{F}$

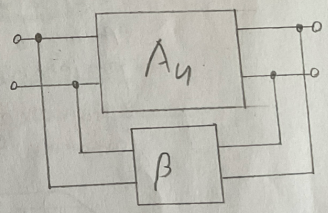
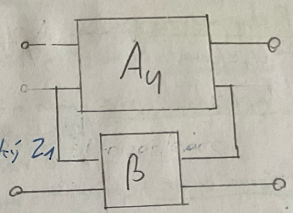
- Konkrétní zapojení ZV

- Proudová sériová ZV - zvyšuje Z_1 i Z_2

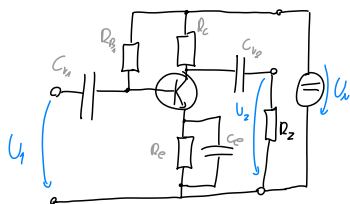
- neoslabuje A_i
- zmenšuje A_u
- rozšiřuje BZ
- Použití: tam, kde je potřeba velkých Z_1
- Předzesilovatele

- Napětová paralelní ZV - zmenšuje Z_1 i Z_2

- zmenšuje A_i
- neoslabuje A_u
- Použití: Potud je třeba malých Z_2
- Koncové stupně



Zapojení zesilovače SE s blokováním R_e



C_{11}, C_{12} - zabránění SS proudu jít ven z obvodu

R_1, R_2 - nastavují pracovní bod

R_e - stabilizuje pracovní bod

C_e - zkratuje stříd. do země

- Teplotní stabilizace prac. bodu

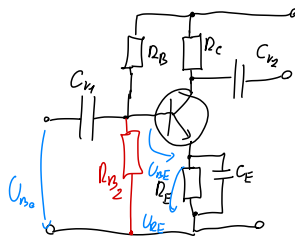
- Prac. bod kolísá s teplotou

↳ změna jeho vlastností

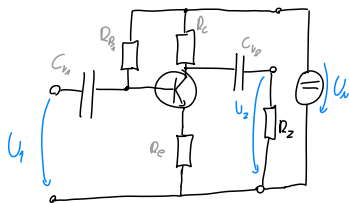
- Stabilizace P pomocí děliče napětí

↳ SS napětí na paralelní záporné ZV

- Princip: Zvýšení $I_E \rightarrow$ zvýšení $U_{BE} \rightarrow$ (protože U_{BE} = konst.) snížení U_{BE}
 $\rightarrow$ přivření $T \rightarrow$ snížení I_E



Zapojení zesilovače SE s neblokováním R_e

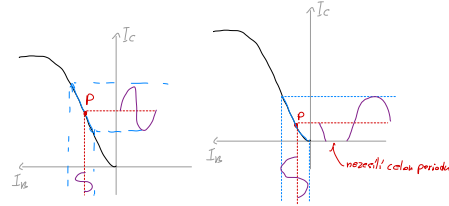
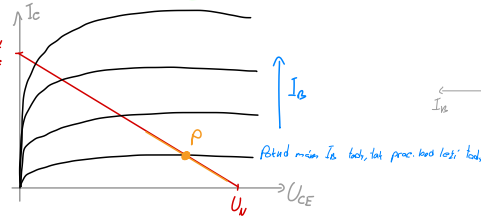
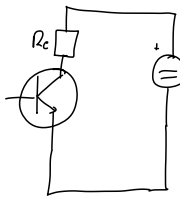


- Přes R_e prochází i stříd. signál $\rightarrow$ lepší teplotní stabilizace

$\rightarrow$ menší napěťové zesílení: $A_u = -\frac{R_c}{R_e}$

$\rightarrow$ zvyšuje R_{in} i R_{out}

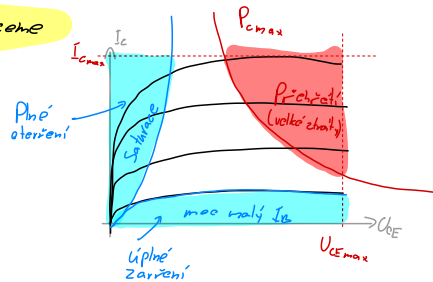
Nastavení prac. bodu v SF bez R_E - Statistická zatěžovací příčka



- Volím ho dle amplitudy, kterou chci zesílit, pokud je velká, musím ho dát doprostřed

- Pokud nemám velkou amplitudu, dám P co nejblíže k $U_C \rightarrow$ jsou tam menší ztráty, v klidovém stavu... $P = U_{CE} \cdot I_C$

- Ve zvláštních oblastech prac. bod nechceme



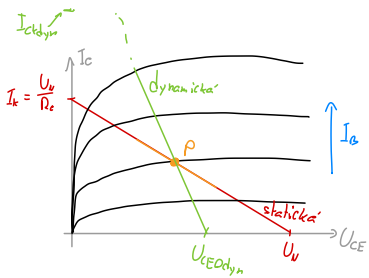
- Dynamická zatěžovací příčka

- bere me v potaz připojení zátěže $\rightarrow$ příčka bude strmější

$$I_{Cdyn} = I_{CP} + \frac{U_{CEP}}{R_2}$$

$$U_{CE0dyn} = U_{CEP} + \Delta U_{CE}$$

$\nwarrow I_{CP} \cdot R_2$



Stejnosičné zesilovače

- umí zesilovat od velmi nízkých frekvencí (i nulové)
- nepoužívají RLC $\rightarrow$ používají přímé galvanické vazby

Proč nelze použít běžný zesilovač?

- Při malých U_a a I se tranzistor nedeformuje

Diferenciální zesilovač

- dva tranzistory (shodně) se společným emitelem
- zesilují rozdíl

1) Klidový stav ($U_{b1} = U_{b2}$)

- oba vstupy jsou stejné $\rightarrow$ proud jde do T_1 a T_2 rovnoměrně

$$U_o = U_{c2} - U_{c1} = 0 \dots \text{nezesiluje}$$

2) $U_{b1} \gg U_{b2}$

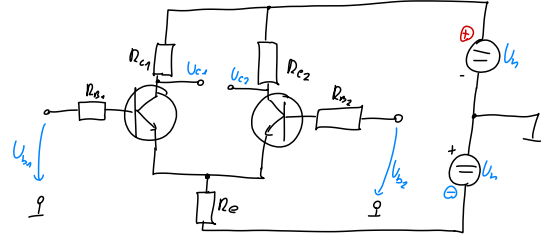
- T_1 dostane větší napětí na bázi $\rightarrow$ více se otevírá
 $\hookrightarrow$ vede větší proud $\rightarrow$ více napětí na $R_c \rightarrow U_{c1}$ klesá
- T_2 se uzavře $\rightarrow$ menší proud $\rightarrow U_{c2}$ roste
- $U_o = U_{c2} - U_{c1}$ nemíná $\rightarrow$ zesílí rozdíl

Jelikož zesilují rozdíl a jsou „furt“ otevírány $\rightarrow$ umí zesílit i velmi malé napětí

3) Oba vstupy se zvyšují stejně

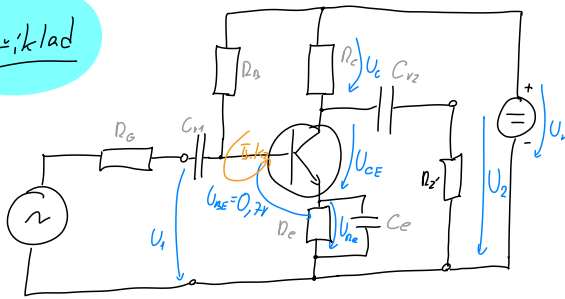
- T_1 a T_2 se otevírají stejně $\rightarrow U_o = 0$

= Sanklasný signál... zesilovač ho ignoruje... $CMRR = 20 \log \left(\frac{A_v}{A_{cs}} \right)$



rozdielové zes. $A_d = \frac{U_o}{(U_{b1} - U_{b2})} = U_d$
sanklasné zes. $A_{cs} \rightarrow \infty$

Prüfung



$$h_{21} = 150, h_{11} = 1000, h_{22} = 10^{-3}, h_{32} = 5 \cdot 10^{-4}$$

$$U_{CE} = 10V$$

$$I_C = 4.0 mA$$

$$R_C = 500 \Omega$$

$$R_E = 50 \Omega$$

$$R_2 = 1 k\Omega$$

$$R_1 = 800 \Omega$$

$$C_{11,2} \rightarrow \infty F$$

$$1) U_H = I_C \cdot R_E + I_C \cdot R_C + U_{CE} = 32V$$

$$2) I_{C,stat} = \dots (U_{CE} = 0) \dots = \frac{U_H}{R_C + R_E} = 58 mA$$

$$3) R_B = \frac{U_B}{I_B} = \frac{U_H - U_{BE} \cdot 0.7}{I_B} = \frac{32 - 0.7 \cdot 4.0 \cdot 10^{-3} \cdot 150}{277 \cdot 10^{-6}} = 105 k\Omega$$

bedeuten 0.7 char.

$$4) R_2 = \frac{R_2' \cdot R_C}{R_2' + R_C} = 333 \Omega$$

$$5) I_{C,stat} = I_{C,P} + \frac{U_{CE,P}}{R_2} = 4.0 \cdot 10^{-3} + \frac{10}{333} = 70 mA$$

$$U_{CE,stat} = U_{CE,P} + \Delta U_{CE} = 10 + 4.0 \cdot 10^{-3} \cdot 333 = 23.3V$$

ICP · R2

$$6) R_{1st}' = \frac{h_{11} + D_{11} \cdot R_2}{1 + h_{22} \cdot R_2} = 957 \Omega; R_{1st} = \frac{R_{1st}' \cdot R_1}{R_{1st}' + R_1} = 948 \Omega$$

$$R_{1st}' = \frac{h_{11} \cdot (R_2 \parallel R_1)}{D_{11} + h_{22} \cdot (R_2 \parallel R_1)} = 2462 \Omega; R_{1st} = \frac{R_{1st}' \cdot R_1}{R_{1st}' + R_1} = 416 \Omega$$

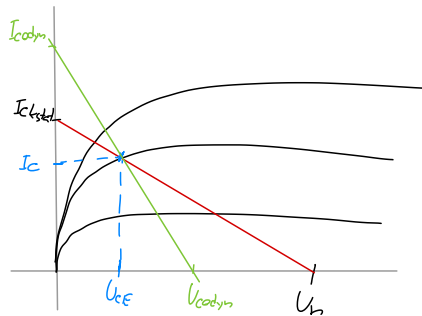
$$h_{21} = 150, h_{11} = 1000, h_{22} = 10^{-3}, h_{32} = 5 \cdot 10^{-4}$$

$$D_H = \begin{vmatrix} 1000 & 10^{-3} \\ 150 & 5 \cdot 10^{-4} \end{vmatrix} = 1000 \cdot 5 \cdot 10^{-4} - 150 \cdot 10^{-3} = 0.35$$

$$7) A_U = \frac{-h_{21} \cdot R_2}{D_H \cdot R_2 + h_{11}} = -44.7$$

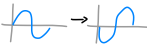
$$A_I = \frac{h_{21}}{1 + h_{22} \cdot R_2} = 128.6$$

$$A_P = |A_U \cdot A_I| = 5748$$

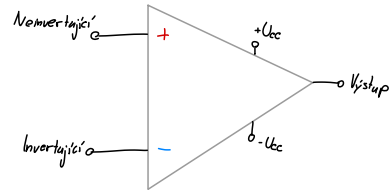


Operační zesilovač

- zesiluje rozdíl napětí mezi dvěma vstupy... $U_{out} = A \cdot (U_+ - U_-)$

- Invertující vstup - $\varphi = 180^\circ$.. 

- Neminvertující vstup - $\varphi = 0^\circ$



Parametr	Ideální OZ	Reálný OZ
A	∞	10^5
R_{vst}	$\infty \Omega$	$M\Omega$
$R_{výst}$	0Ω	100Ω
B	∞	10^6 Hz

Vstupní odpor - Ideálně $\infty \Omega$

- nechceme, aby do něj šel proud $\rightarrow$ 
(jinak zatěžuje předchozí obvod)

Výstupní odpor - ideálně 0Ω

- nulové ztráty

Šířka pásma - ideálně $B = \infty \text{ Hz}$

- jaké frekv. umíme zesílit

- Zpětná vazba - část výstupu se vrátí na vstup

- Záporná ZV - 

- výstup se odečte od vstupu
 $\rightarrow$ stabilita

- Kladná ZV - výstup se přičítá se vstupem

$\rightarrow$ většinou rozkmitání 

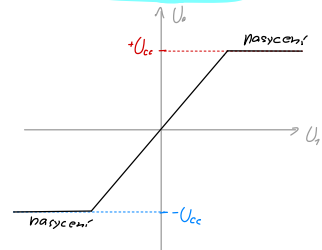


- Vnitřní zapojení - Vstupní zesilovač - zjišťuje rozdíl mezi vstupy

- Vlastní zesilovač - postará se o napětíové zesílení

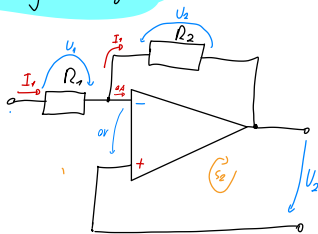
- Koncový zesilovač - výkonové zesílení pro zátěž

Přenosová char.



$\rightarrow$ umí zesilovat max. do úrovně SS napájení

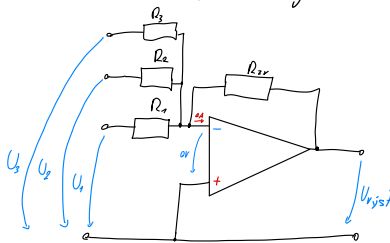
Invertující zapojení



$$A_u = \frac{U_2}{U_1} = \frac{-I_1 \cdot R_2}{I_1 \cdot R_1} = -\frac{R_2}{R_1}$$

Součtářský zesilovač

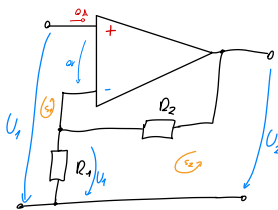
- vychází z invertujícího zapojení



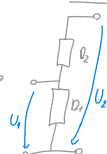
$$U_{vysl} = -U_1 \cdot \frac{R_{22}}{R_1} - U_2 \cdot \frac{R_{22}}{R_2} - U_3 \cdot \frac{R_{22}}{R_3}$$

$$U_{vysl} = -R_{22} \cdot \left(\frac{U_1}{R_1} + \frac{U_2}{R_2} + \frac{U_3}{R_3} \right)$$

Neinvertující zapojení



Deleč napětí

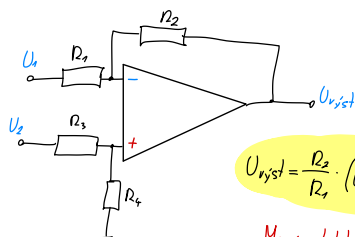


$$U_1 = U_2 \cdot \frac{R_1 + R_2}{R_2}$$

$$A_u = \frac{U_2}{U_1} = \frac{U_2}{U_2 \cdot \frac{R_1 + R_2}{R_2}} = \frac{R_2}{R_1 + R_2} = \frac{R_2}{R_1} + \frac{R_2}{R_1} = 1 + \frac{R_2}{R_1}$$

Diferenční zesilovač

- zesiluje rozdíl vstupů

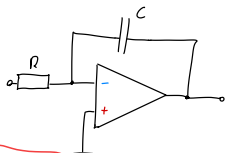
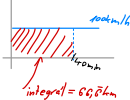


$$U_{vysl} = \frac{R_2}{R_4} \cdot (U_2 - U_1)$$

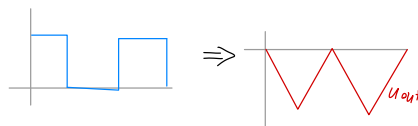
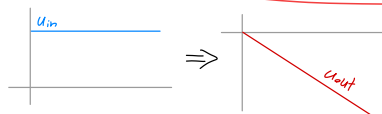
Musí platit: $\frac{R_2}{R_1} = \frac{R_4}{R_3}$

Integrator

- Integral = kolik se toho za nějaký čas nashromádkovalo

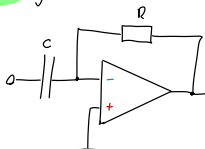


$$U_{out}(t) = -\frac{1}{RC} \int U_{in}(t) dt$$

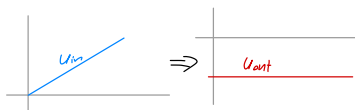
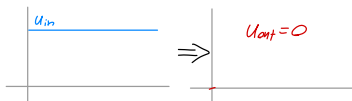


Derivátor

- derivace = jak rychle se něco mění



$$U_{out}(t) = -RC \cdot \frac{d}{dt} (U_{in}(t))$$



Koncové zesilovače (Výkonové)

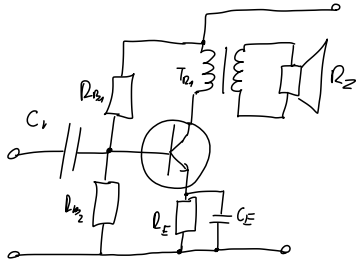
- poslední stupeň
- Úkol: Zesílit signál z předzesilovače na požadovaný výkon
- Druhy
 - Jednoduchý zesilovací stupeň
 - Dvojitý zesilovací stupeň

Jednoduchý zesilovací stupeň

Princip:

- Transistor se buď signálem z předzesilovače
- Zátěž je připojena přes trafo - Reproduktor: $Z = 4 - 8 \Omega$
 - Transistor: $Z = 100 - 2$

↳ Trafo přizpůsobí impedanci repro na optimální zátěž pro transistor



- Výhody: levné, jednoduché, malé ztráty

- Nevýhody: Pracuje v třídě A... má účinnost (40%), velký klidový I_C

- Použití: malé výkony

Dvojitý zesilovací stupeň

S transformátorem... třída B

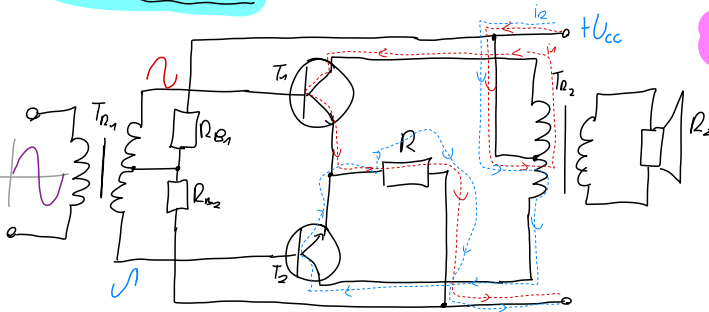
Princip:

- Pustíme do něj signál → T_1 podle na každý transistor jsou připojeny

→ Transistory se střídavě otevírají a zavírají

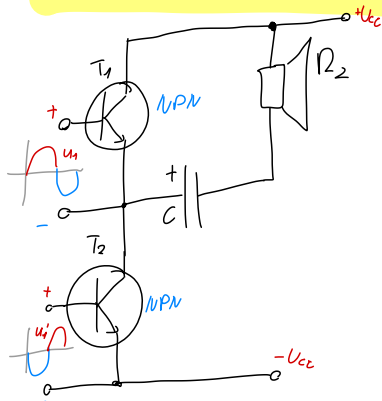
- Výhody: vysoká účinnost (třída B)

- Nevýhody: Nevýhody (vysoké přechodové ztráty)
... třída B



Kvazikomplementární zapojení

- 2 tranzistory stejné vodivosti buzené opacitním signálem



- Princip: ① T_1 se dovře $\rightarrow$ proud protече na C (jeho kladná půlka),
to nabije C a zároveň dodá kladnou půlku na R_2

② T_1 se začne zavírat, SS proud už netече

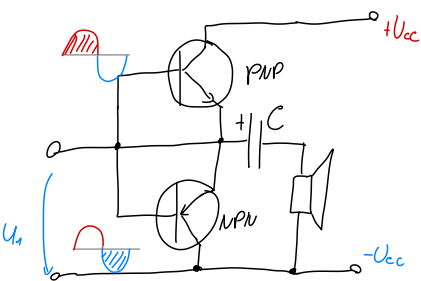
③ T_2 se začne otevírat $\rightarrow$ C se přes něj vybije
= Záporná půlka, dostane se i na R_2

- Nevýhody: Potřeba 2 signálů otočených o 180°

$\hookrightarrow$ Řešení: opacitní typ vodivosti tranzistorů (NPN a PNP)
= Komplementární zapojení

Potřeba velkého C (mF)

Komplementární zapojení



- Budí se jen jedním signálem

- 2 tranzistory opacitní vodivosti - každá půlka otevře jen 1 z nich

- C se používá pro oddělení SS a stříd. složky

Integrované zesilovače

- kompletní zesilovač je uzavřen v 1 čipu (pouzdře)

- pro menší výkony

- nejčastěji třídy AB / D

- Problém - odvod tepla... přehřátí

- výhody - malé

Třída zesilovačů

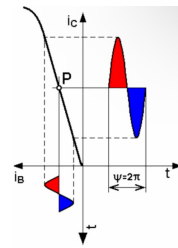
- **Třída A** - Prac. bod je uprostřed lin. části

- Výhoda: Malé zkreslení

- Nevýhoda: Velký klidový I_C (odebírání energie i pokud nic nezesiluje)

→ účinnost 40%

- Použití: kvalitní nf zesilovače



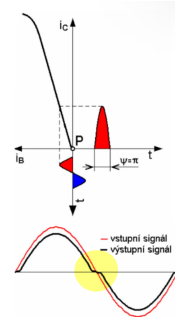
- **Třída B** - Prac. bod je v počátku char.

- Výhoda: netoče žádný klidový I_C → větší účinnost (80%)

- Proud prochází T jen půlku periody → používáme 2 T abychom zesílili celý signál

- Nevýhoda: Velké přechodové zkreslení

- Použití: Výkonové zesilovače

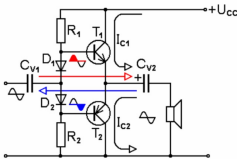


- **Třída AB** - něco mezi A a B

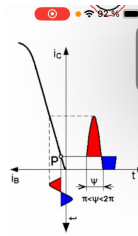
- Třída AB

- Prac. bod P nastaven leží v počátku lineární části převodní char.
 - V blízkosti zániku I_C (klidový I_C prochází, ale je malý)
- Pro zesílení obou půlperiod → zapojení dvou tranzistorů
 - Oba tranzistory zesilují krom kladných půlvin i malé části záporných
 - Úhel otevření $\pi < \psi < 2\pi$
- Zkreslení menší než třída B
- Účinnost je větší než A, menší než B
- Výhody: koncové výkonové audiozesilovače

- Příklad zapojení ve třídě AB



- Komplementární dvojce tranzistorů (stejně tranzistory, ale opačný typ – NPN, PNP)
- Kladnou půlvinu zesiluje T_1 (nabíjení C_{V2})
- Zápornou půlvinu zesiluje T_2 (vybíjení C_{V2})

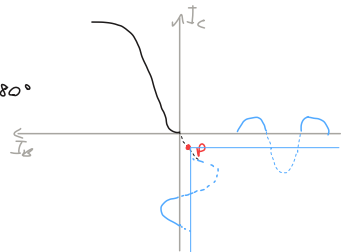


Třída C

- Prac. bod v záporné části char. → nezesílá ani polku ... $\psi < 180^\circ$

→ vyšší účinnost

→ velké zkreslení



Třída D

- princip PWM

→ účinnost až 80%