

Struktury elektronických obvodů

Zesilovače

Funkce - zvětšovat, tedy zesilovat užitečný výkon signálu při zachování jeho časového průběhu resp. spektrálního složení. (Potřebná energie pro zesilování z pomocných tzv. napájecích zdrojů)

Zesilovač výkonu, zesilovač napětí nebo zesilovač proudu - mají buď dostatečně veliké anebo přesně definované zesílení výkonu, napětí nebo proudu

Výkonový stupeň - mimořádný výstupní výkon zesilovacího stupně v porovnání s ostatními zesilovacími stupni uvažovaného bloku.

Nelineární tvarovače a měniče signálů

Tvarovače - funkční bloky a obvody - mění tvar časového průběhu signálu.

Lineární tvarovače - nemohou vytvořit nové spektrální složky signálu. Pouze mění poměry mezi původními složkami vstupního signálu.

Nelineární tvarovače jsou jednoduché pasivní obvody, které mohou být čistě odporové, nebo mohou obsahovat akumulární součásti (C, L). Aktivní tvarovače mohou výkon signálu zesilovat.

Odporové nelineární tvarovače – nesetrvačné (určité okamžité hodnotě vstupní veličiny vždy jednoznačně odpovídá určitá hodnota veličiny výstupní). Závislost výstupní veličiny na vstupní - graficky - převodní charakteristika (významnou část matematicky popsat hladkou funkcí, např. kvadratickou, exponenciální, logaritmickou, hyperbolickou a pod.). Nejčastěji se pro tvarovače využívá přirozený a spolehlivě reprodukovatelný tvar některé voltampérové závislosti elektronických součástí.

- Odporové omezovače - část původního časového průběhu příliš nezmění, ale v jedné či dvou oblastech hodnot vstupní veličiny výrazně omezí přenos změn této veličiny. (stejnoseměrné stabilizátory napětí, stabilizátory proudu a některé zesilovače absolutní hodnoty, komparátory úrovně napětí a kombinační logické členy)
- Odporové nelineárních částí + lineární nebo linearizovatelné akumulární součásti: např. usměrňovače – obvody chovající se jako měniče signálu periodického na signál stejnosměrný.
 - Usměrňovače silové (v napájecích a měničích napětí), kde se hodnotí především energetické parametry,
 - Usměrňovače měřicí - určené pro měřicí účely, kdy je nutné hodnotit přesnost měření a parametr periodického signálu, který je ve skutečnosti měřen (vrcholová, mezivrcholová, střední, či efektivní hodnota měřeného periodického průběhu),
 - usměrňovače sdělovací, sloužící k usměrňování periodických a kvaziperiodických (periodických s měnící se amplitudou, fází anebo

kmitočtem) signálů ve sdělovací technice. – v elektronkové éře používány pro demodulaci modulovaných vf signálů.

- Obvody se spínači nebo přepínači - jako střídače (měniče stejnosměrného napětí na střídavé - používají se obvykle v napájecích obvodech) nebo jako impulsní modulátory.
- Spojení střídače s usměrňovačem - měnič DC-DC nebo poněkud obecněji impulsně řízený zdroj stejnosměrného napětí nebo proudu.

Regenerativní obvody

Pracovní bod dílčího obvodu nebo celého bloku se nastaví do nestabilní polohy. Pracovní bod v nestabilní poloze:

- a) jen v obvodu, který obsahuje součástku jejíž VA -charakteristika obsahuje oblast negativního diferenciálního odporu.
- b) Nebo musí být v obvodu zavedena kladná zpětná vazba.

Aby k regenerativnímu ději došlo – negativní diferenciální odpor převládne nad pozitivním nebo je zesílení kladné ZV (βA) minimálně jednotkové.

Bistabilní klopné obvody – pracovní bod bez působení vnějšího signálu může zaujímat jen jednu ze dvou možných stabilních poloh. Bistabilní KO – dva stabilní stavy – přemísťování prac. bodu na vnější popud.

Monostabilní klopné obvody – setrvávají v jedné stabilní poloze- vnější signál může překlopit do druhé (kvazistabilní polohy), v níž setrvává po dobu pomalého relaxačního děje – potom návrat zpět do původní stabilní polohy.

Astabilní klopné obvody – multivibrátory – střídají se děje regenerativní s ději relaxačními. Pro svoji činnost nepotřebují žádný vstupní signál.

Časovače, funkční generátory a převodníky napětí – kmitočet lze považovat za zdokonalené systémové řešení monostabilních a stabilních klopných obvodů.

Kombinační logické členy

Číslicové obvody, jejichž výstup závisí na okamžitém stavu vstupů. TTL – tranzistorová logika – logická 1 = 2,4 až 5V, logická 0 = 0 až 0,7V. Technologie CMOS – log. 1 = napájecí napětí obvodu.

Sekvenční logické členy (s pamětí)

Výstup nezávisí pouze na okamžitém stavu vstupů, ale také na předchozím stavu výstupů. Obsahují logické členy kombinační logiky a také funkční bloky, které si mohou zapamatovat hodnoty logických stavů.

Převodníky D/A

Elektronické spínače + zdroj napětí + rezistory = rozhraní mezi číslicovými a analogovými systémy. Spínače ovládány logickými úrovněmi. Spínače odpojují nebo připojují rezistory a to určuje velikost výstupního napětí, resp proudu. V integrovaných obvodech – přepínání několika zdrojů(kondenzátorů)

Převodníky A/D

Převádí analogovou veličinu na číslo.Základními stavebními prvky jsou komparátory napětí. Nejjednodušší převodník A/D – jeden komparátor napětí spojený s referenčním zdrojem napětí – ref. zdroj pak určuje které napětí bude převedeno na log.1 a které na log. 0.

- S přímým převodem A/D
- Se zpětným převodem D/A
- S mezipřevodem na jiný signál(integrátory, čítače)

Fázové závěsy (PLL)

Oscilátory dokážou reagovat na vnější signály – je-li kmitočet přecházejícího signálu blízký vlastnímu kmitočtu VCO je kmitočet VCO strháván kmitočtem přicházejícího signálu. Každý PLL musí obsahovat VCO (napětím řízený oscilátor), fázový komparátor (porovnávání kmitočtu příchozího signálu s kmitočtem VCO) a dolní propust (VCO je řízen stejnosměrnou složkou a dolní propust odfiltruje střídavou složku)

Používají se jako : násobiče kmitočtu, demodulátory FM, fázové modulátory, demodulátory AM, demodulátory a modulátory FSK a v kmitočtových syntetizátorech.

Zesilovače

Slouží ke zvyšování užitečného výkonu signálu, aniž by při tom signál zkreslily (jeho časový průběh zůstává stejný, jeho spektrální složení zůstává stejné). Potřebnou energii na zesílení berou z napájecích zdrojů. Existují zesilovače výkonu, napětí a proudu. Pod těmito označeními se vyskytují veliké, nebo přesně definované zesílení výkonu, napětí nebo proudu, ale neznamená to že druhou veličinu nezesilují.

Výkonový stupeň = mimořádný výstupní výkon v porovnání s ostatními zesilovači.

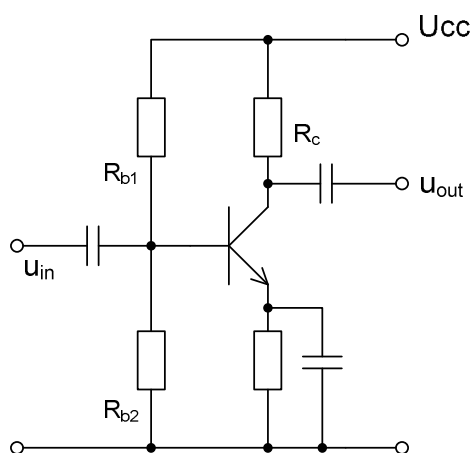
Tranzistorové zesilovače:

Lineární odporový model získáme náhradou součástí jejich lineárními modely a zkratováním napěťových zdrojů a rozpojením proudových zdrojů, které se uplatňují při nastavení klidového pracovního bodu (stejnoseměrné zdroje). Sledujeme jen odporové chování, proto z lineárních modelů převezmeme pouze odpory. Za vstupní svorku bipolárního tranzistoru považujeme vnitřní bázi. Odpor přívodu k bázi uvažujeme jako součást vnitřního zdroje signálu. Provozní přenos napětí bude potom vždy větší než externí přenos napětí.

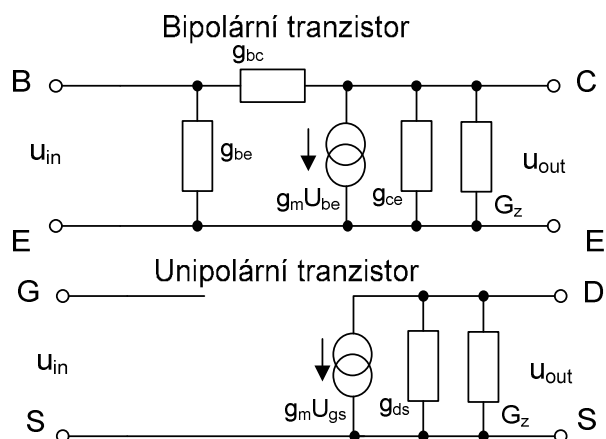
$g_m \gg g_{be} \gg g_{ce} \gg g_{cb}$ - diferenciální vodivosti mezi jednotlivými póly

$$g_m = \frac{\partial i_c}{\partial u_{be}} = \frac{I_C}{U_T} = 40I_C \quad - \text{převodní diferenciální vodivost}$$

SE (SS) – Společný emitor



Lineární odporový model



Napěťové zesílení:

Pro bipolární tranzistor - $A_{uE} = \frac{-(g_m - g_{cb})}{g_{ce} + g_{cb} + G_z} = -g_m R_z$

Pro unipolární tranzistor - $A_{uS} = \frac{-g_m}{g_{ds} + G_z} = -g_m R_z$

Vstupní vodivost:

Pro bipolární tranzistor -

$$G_{vstE} = \frac{\Delta i_{vst}}{\Delta u_{vst}} = g_{be} + g_{cb} \left(1 + \frac{g_m - g_{cb}}{g_{ce} + g_{cb} + G_z} \right) = g_{be} + g_{cb} (1 - A_{uE}) \approx g_{be}$$

Pro unipolární tranzistor - $G_{vstS} = 0$

Výstupní vodivost:

$$\text{Pro bipolární tranzistor - } G_{vystE} = \frac{\Delta i_{vyst}}{\Delta u_{vyst}} = g_{ce} + g_{cb} \left(1 + \frac{g_m - g_{cb}}{g_{be} + g_{cb} + G_0} \right)$$

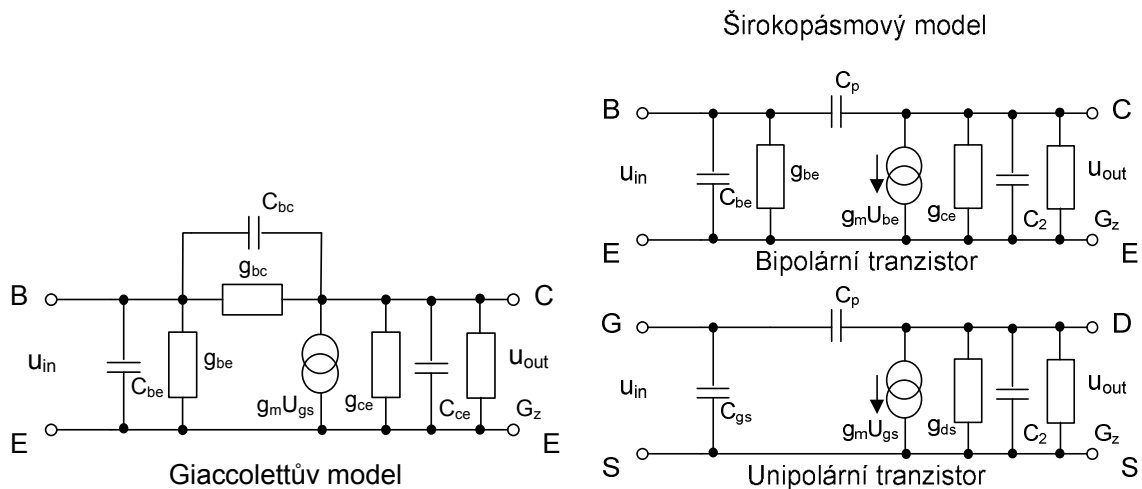
Pro unipolární tranzistor - $G_{vystS} = g_{ds}$

Shrnutí základních poznatků o zapojení SE (SS):

- **Může zesilovat napětí a proud**
- **Obrací fázi napětí**
- **SS má vstupní odpor téměř nekonečný, SE má vstupní odpor menší než výstupní odpor**
- Při zatížení lineárním rezistorem lze vztahy pro vyjádření parametrů výrazně zjednodušit
- Při nelineární (dynamické) zátěži lze zesílení napětí zvětšit přes 1000
- Kaskádním řazením lze zvětšovat zesílení napětí i proudu
- **Emitorový lineární odpor Re:**
 - Zmenšuje zesílení napětí
 - Zvětšuje vstupní a výstupní odpor napětí
 - Zmenšuje možný rozkmit vstupního napětí
 - Zmenšuje vliv parametrů tranzistoru na zesílení napětí
 - Zmenšuje nelineární zkreslení zesilovače

Kmitočtová závislost SE:

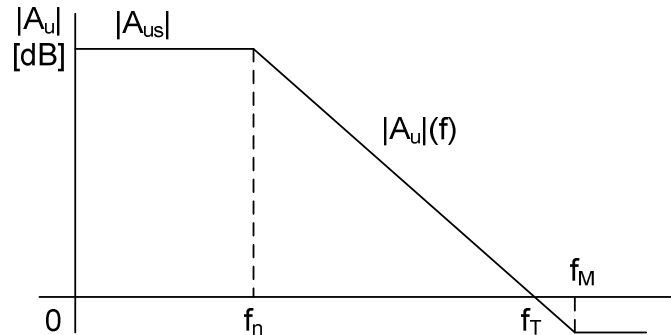
Způsobují ji parazitní kapacity a indukčnosti všech součástek. Nejvhodnější náhradou bipolárního tranzistoru je Giaccolettův model. Získáme tak širokopásmový model.



Kapacita C_p představuje souhrn všech průchozích kapacit mezi bází a kolektorem. C_2 zahrnuje kapacitu vnější zátěže včetně výstupní kapacity tranzistoru C_{ce} (C_{ds}) a kapacity přívodů.

Přenos obou širokopásmových modelů: $A_{uE} = \frac{U_2(j\omega)}{U_1(j\omega)} = -\frac{g_m - j\omega C_p}{G_z + j\omega(C_p + C_2)}$

Modulová charakteristika přenosu



Tranzitní kmitočet: $f_T = |A_{us}| f_N = \frac{g_m}{2\pi(C_p + C_2)}$

Pro tento kmitočet je modul přenosu ($|A_{uE}|$) jednotkový.

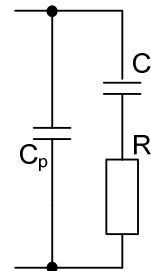
Zlomový kmitočet pro přenos: $f_N = \frac{C_p + C_2}{2\pi G_z}$

Kmitočet pro nulový přenos: $f_M = \frac{C_{cb}}{g_m}$

Pro kmitočet nižší než je tranzitní platí pro vstupní admitanci vztah:

Model vstupní admitance

$$Y_{vstE}(j\omega) = j\omega C_p + \frac{j\omega C_p g_m}{G_z + j\omega(C_p + C_2)}$$



V oblasti kmitočtů nižších než je zlomový kmitočet f_n se uplatní především vliv fiktivní kapacity C_f . Nad f_n se projeví především R_f .

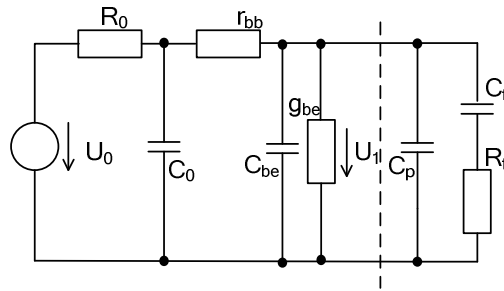
Pro parametr C_f platí:

$$C_f = C_p g_m R_z = C_p |A_{uEs}|$$

**Millerův jev = zvětšení vstupní kapacity vlivem zesílení => C_f = Millerova kapacita
Může zmenšovat horní mezní kmitočet externího přenosu napětí.**

Celkový širokopásmový model vstupu zesilovače vidíme na obrázku.

Širokopásmový model vstupu zesilovače

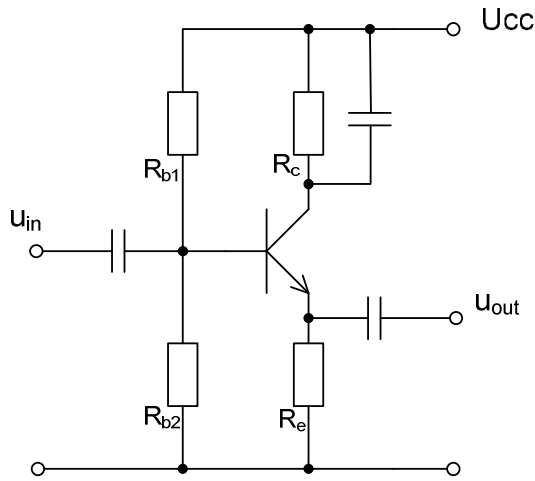


Modely pro určení přenosu $K_1=U_1/U_0$. Externí přenos napětí $A_{\text{uex}}=K_1A_u$. Póly výsledného externího přenosu jsou určeny pouze póly přenosu K_1 . Externí přenos pak obsahuje dva zlomové kmitočty f_1 a f_2 . Zesilovač lze potom považovat za kmitočtově nezávislý do kmitočtu $0,1f_1$.

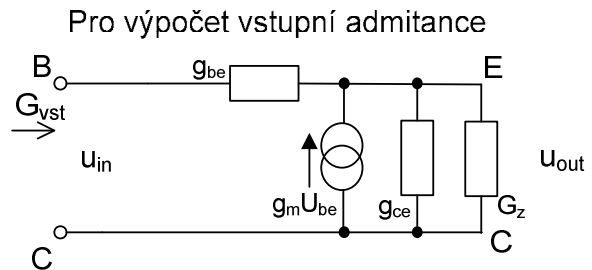
Shrnutí poznatků z kmitočtové závislosti SE:

- Zesilovač složený z rezistorů a zesilovacích součástí je kmitočtově závislý v oblasti relativně vysokých kmitočtů
- Externí přenos napětí má dva reálné póly v levé polorovině a jednu reálnou nulu v pravé polorovině, to znamená, že při změně kmitočtu v širokém pásmu se fáze může změnit o $3/2 \pi$
- **Průchozí kapacita C_p se do vstupu zesilovací součásti promítne jako poměrně velká Millerova kapacita se sériově připojeným odporem R_f .**
- **Millerova kapacita může výrazně snižovat horní mezní kmitočty**
- Parazitní zpětná vazba přes C_p neohrožuje stabilitu zesilovacího stupně
- **Vliv Millerovi kapacity se dá snížit:**
 - Zmenšením samotné průchozí kapacity C_p
 - Zmenšením provozního zesílení $|A_{\text{us}}|$
 - Zmenšením R_0 tak, aby byl menší nebo roven R_f

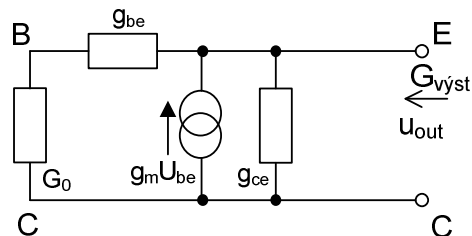
SC (SD) – Společný kolektor (napět'ový sledovač)



Lineární odporový model



Pro výpočet výstupní admittance



Napět'ové zesílení:

$$A_{uC} = \frac{u_{out}}{u_{in}} = \frac{(g_m + g_{be})}{g_m + g_{be} + g_{ce} + G_z} \approx \frac{g_m R_z}{1 + g_m R_z} < 1$$

Proudové zesílení:

$$A_{iC} = \frac{i_{out}}{i_{in}} = -A_{uC} \frac{G_z}{G_{vstC}}$$

Vstupní vodivost:

$$G_{vstC} = \frac{\Delta i_{vst}}{\Delta u_{vst}} = g_{be} - \frac{g_{be}(g_m - g_{cb})}{g_m + g_{ce} + g_{be} + G_z} \approx \frac{g_{be}}{1 + g_m R_z}$$

$$G_{vstD} = 0$$

Výstupní vodivost:

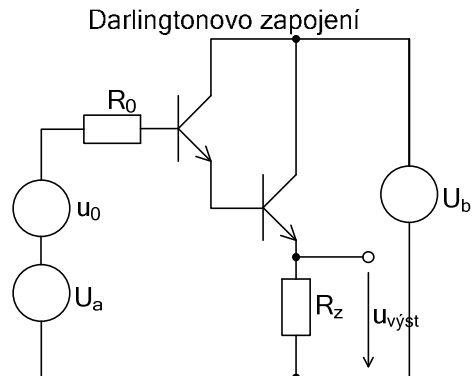
$$G_{vystC} = \frac{\Delta i_{vyst}}{\Delta u_{vyst}} = g_m + g_{be} + g_{ce} - \frac{g_{be}(g_m + g_{be})}{g_{be} + G_0} \approx G_0 \frac{g_m}{g_{be} + G_0}$$

$$G_{vystD} = \frac{\Delta i_{vyst}}{\Delta u_{vyst}} = \frac{1}{g_m}$$

Shrnutí základních poznatků o zapojení SC (SD):

- Zapojení je schopné zesilovat pouze proud, přenos napětí je menší než 1
- Neobrací fázi napětí
- SC se chová jako SE se 100% sériovou napět'ovou zápornou zpětnou vazbou, která mj. přenos linearizuje v širokých mezích.

- Při použití tranzistorů lze docílit, že se přenos napětí značně blíží k 1 => sledovač napětí
- Vstupní odpor je větší než výstupní
- Vstupní odpor SC je větší než u SE a výstupní odpor SC je menší než SE
- Větší zpětný přenos než v zapojení SE a nesmí se přehlížet
- Darlingtonovo zapojení zvětšuje zesílení proudu, zmenšuje přenos napětí

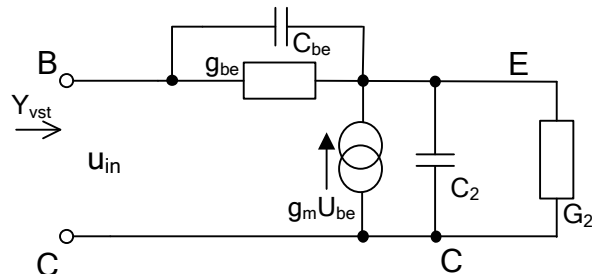


- Obvod SD nelze při zatížení lineárním rezistorem provozovat jako dokonalý sledovač napětí pro malou hodnotu strmosti FETů, přenos napětí je mnohem menší než 1
- Výstupní odpor v zapojení SD je dán převrácenou hodnotou g_m

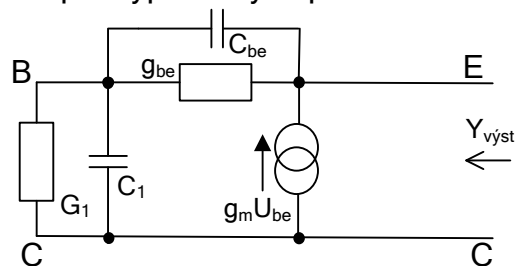
Kmitočtová závislost SC (SD):

Zapojení s SC má na vyšších kmitočtech negativní reálnou část vstupní admittance, pokud bude mít přívod k bázi přiměřenou parazitní indukčnost, dojde k rozkmitání obvodu. SC se používá na výstupech funkčních bloků pro zajištění dostatečně malé výstupní impedance.

Model pro výpočet vstupní admittance



Model pro výpočet výstupní admittance



$$\text{Provozní přenos širokopásmového modelu: } A_{uC} = \frac{U_2(j\omega)}{U_1(j\omega)} = \frac{g_m + j\omega C_{be}}{g_m + G_2 + j\omega(C_{be} + C_2)}$$

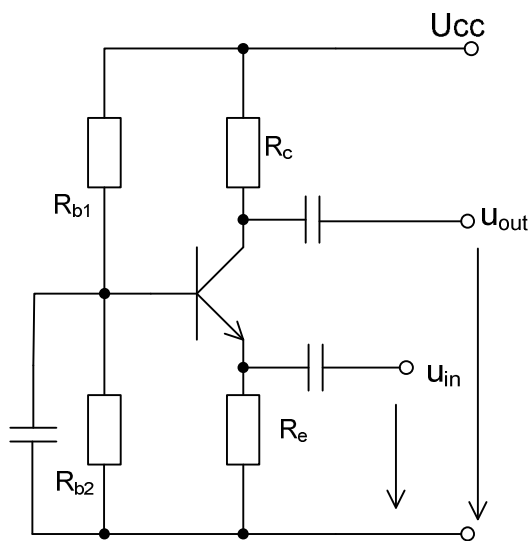
$$\text{Vstupní admittance: } Y_{vstE}(j\omega) = \frac{(g_{be} + j\omega C_{be})(G_2 + j\omega C_2)}{g_m + G_2 + j\omega(C_{be} + C_2)}$$

$$\text{Výstupní admittance: } Y_{výstE}(j\omega) = \frac{(G_0 + j\omega C_1)(g_m + g_{be} + j\omega C_{be})}{G_0 + g_{be} + j\omega(C_{be} + C_1)}$$

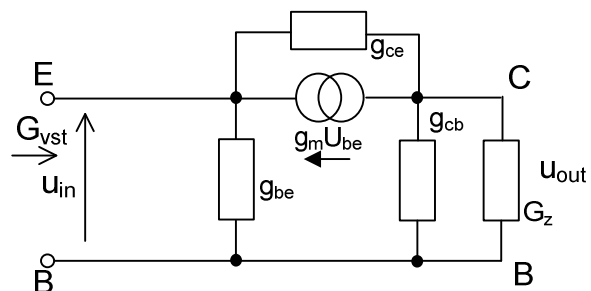
Shrnutí poznatků z kmitočtové závislosti SC:

- Provozní přenos napětí SC a SD je v širokém napětí kmitočtově nezávislý
- Zpětná vazba způsobená průchozí kapacitou mezi výstupem a vstupem v součinnosti se zatěžovací kapacitou, je příčinou vzniku negativní odporové složky vstupní admittance, která se uplatní v oblasti nejvyšších kmitočtů a často způsobí rozkmitání stupně SC
- Zpětný přenos je v širokém pásmu kmitočtů velmi výrazný a jeho vliv by neměl být podceňován
- Parazitním kmitům lze zabránit oddělením kapacitní zátěže tlumícím rezistorem v bázi, nebo ztlumením vstupu jinou zpětnou vazbou a konstrukčním uspořádáním omezujícím indukčnost vnější smyčky mezi bází a zemí
- Horní mezní kmitočet externího přenosu napětí je zpravidla omezen vstupní kapacitou stupně SC
- Zesilovač SC může projevovat výstupní impedanci induktivního charakteru již při poměrně malých kmitočtech

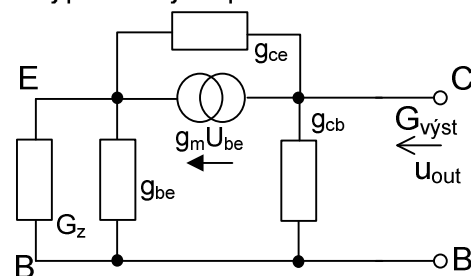
SB (SG) – Společná báze



Lineární odporový model
Pro výpočet vstupní admittance



Pro výpočet výstupní admittance



Napět'ové zesílení:

$$A_{uB} = \frac{u_{out}}{u_{in}} = \frac{g_m + g_{ce}}{g_{ce} + g_{cb} + G_z} \approx \frac{g_m}{g_{ce} + G_z} \approx g_m R_z$$

Proudové zesílení:

$$A_{iB} = \frac{i_{out}}{i_{in}} = -\frac{G_z}{G_{vstB}} A_{uB} = -1, \text{ přesněji } \frac{-\beta}{\beta+1} = \alpha$$

Vstupní vodivost:

$$G_{vstB} = \frac{\Delta i_{vst}}{\Delta u_{vst}} = \frac{(g_m + g_{be} + g_{ce})G_z + g_{be}g_{ce}}{g_{ce} + G_z} \approx \frac{g_m G_z}{g_{ce} + G_z} = g_m$$

Výstupní vodivost:

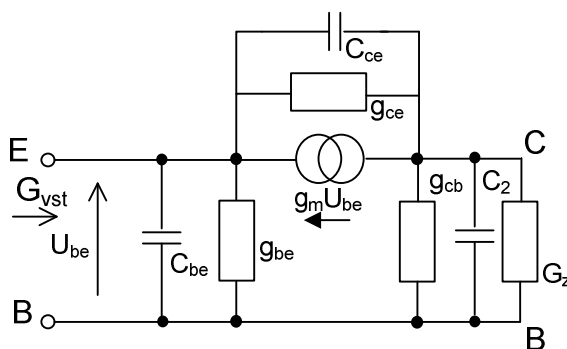
$$G_{vystC} = \frac{\Delta i_{vyst}}{\Delta u_{vyst}} = \frac{g_{ce}(G_0 + g_{be}) + g_{cb}(G_0 + g_m + g_{be} + g_{ce})}{G_0 + g_m + g_{be} + g_{ce}} = \frac{(G_0 + g_{be})g_{ce}}{g_m}$$

Shrnutí základních poznatků o zapojení SB (SG):

- Zesílení napětí má hodnotu prakticky shodnou jako SE
- Zesilovač neobrací fázi napětí
- Vstupní odpor je mnohem menší než výstupní
- Obvod má ze všech základních obvodů nejmenší vstupní odpor a největší výstupní odpor
- Zapojení SG na výstupu opakuje vstupní proud $A_{iG} = -1$
- Zapojení SB proud nepatrně zeslabuje
- Kaskádní řazení nezvětší zesílení napětí, zvětšuje jen výstupní odpor
- Zpětný přenos napětí je dán poměrem g_{ce}/g_m a jeho vliv je nejmenší ze všech zapojení

Kmitočtová závislost SB (SG):

Širokopásmový model



Pro celkovou kapacitu zátěže bude platit $C_2=C_z+C_{cb}$. Zatížení zesilovače lineárním rezistorem neovlivní tvar rovnice pro zesílení napětí.

Provozní přenos širokopásmového modelu:

$$A_{uB} = \frac{U_2(j\omega)}{U_1(j\omega)} = \frac{g_m + j\omega C_{ce}}{g_{ce} + G_z + j\omega(C_{ce} + C_2)}$$

Vstupní admittance:

$$Y_{vstB}(j\omega) = \frac{(g_m + j\omega(C_{be} + C_{ce}))(G_z + j\omega C_2) + (g_{be} + j\omega C_{be})(g_{ce} + j\omega C_{ce})}{g_{ce} + G_z + j\omega(C_{ce} + C_2)}$$

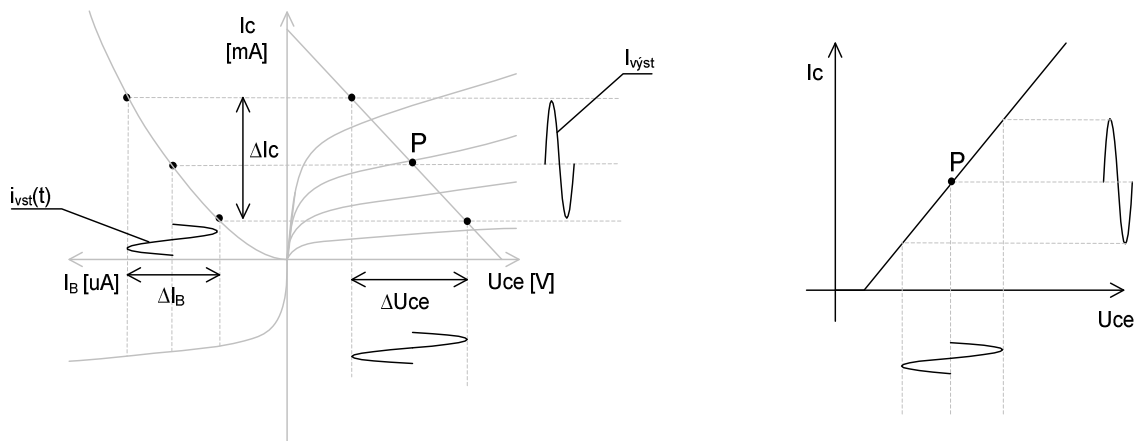
Shrnutí poznatků z kmitočtové závislosti SB:

- Provozní přenos napětí má pól i nulu v levé polovině
- Nula se prakticky neuplatní, její kmitočet je mnohem vyšší než tranzitní kmitočet tranzistoru
- **Horní mezní kmitočet provozního přenosu napětí je prakticky shodný s horním mezním kmitočtem zapojení SE**
- **Při malé hodnotě odporu R_z není zpětným přenosem vůbec ovlivněn kmitočtový průběh vstupní admittance**
- Za těchto okolností má i externí přenos v kmitočtovém pásmu pod tranzitním kmitočtem tranzistoru jediný zlom odpovídající pólu provozního přenosu.

Nastavení a stabilizace klidového pracovního bodu

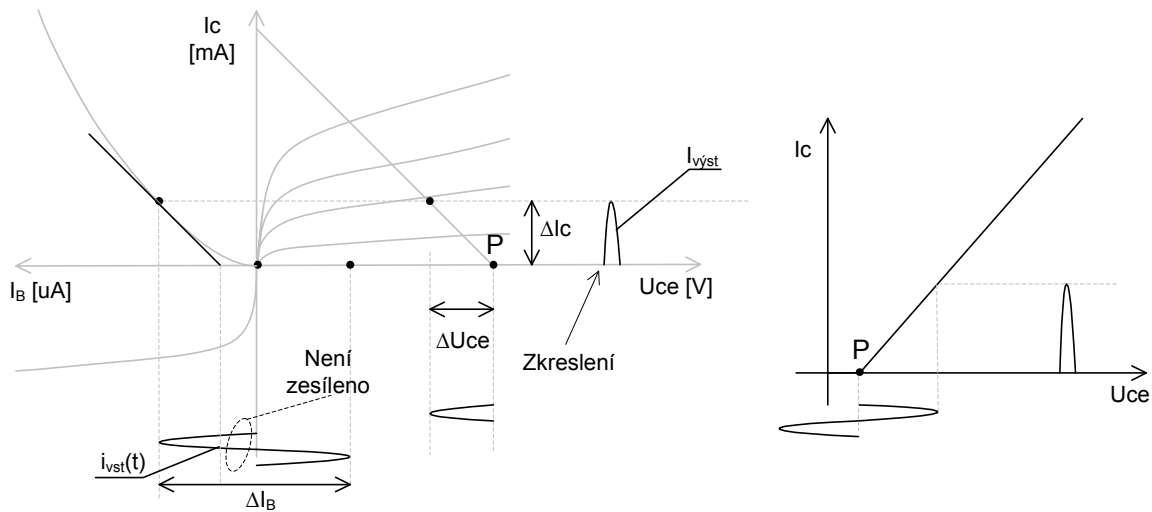
Pracovní bod nastavujeme podle třídy zesilovače. Obecně klidový pracovní bod říká, že při určitém nastaveném stejnosměrném napětí prochází součástkou určitý stejnosměrný proud. Na charakteristice se projeví jako bod P.

Zesilovač ve třídě A



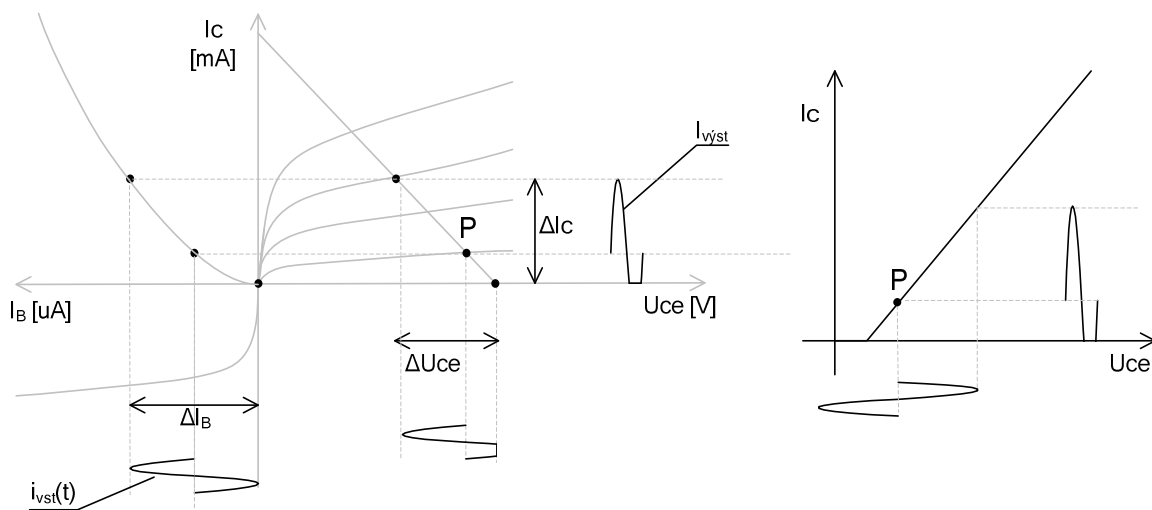
- U tohoto zesilovače platí, že se pracovní bod nachází ve středu zatěžovací charakteristiky. $U_{ce} = U_{cc}/2$, kde U_{cc} je napájecí napětí obvodu.
- Výhodou zapojení je jednoduchost zapojení a zesílení bez zkreslení (amplituda výstupního signálu nebude větší než $U_{cc}/2$).
- Nevýhodou zapojení je velká spotřeba(musíme pracovní bod udržet v dané poloze).

Zesilovač ve třídě B



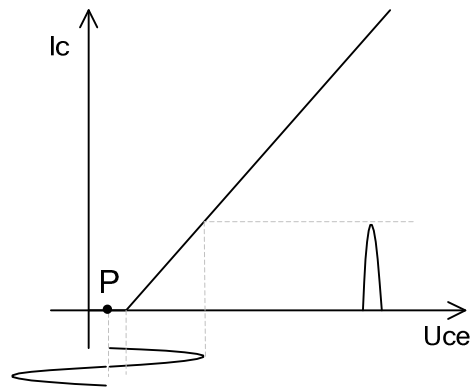
- V tomto zapojení je klidový pracovní bod nastaven v zatěžovací charakteristice na nulový klidový proud.
- Vysoká účinnost (výkon/příkon) tohoto obvodu.
- Dochází ke zkreslení výstupního signálu vlivem nelinearity převodní charakteristiky. (Na výstupu tedy není zesílen celý signál - názorně na obrázku.)
- Toto zapojení přenáší pouze jednu polaritu napětí.

Zesilovač ve třídě AB



- Zesilovač v této třídě má menší účinnost než zes. ve třídě B
- Nedochází ke zkreslení signálu při otevírání tranzistoru. Na bázi tranzistoru je předpětí (většinou 0,7 V), které tranzistor částečně otevře (neuplatní se počáteční nelinearita převodní charakteristiky)
- Toto zapojení opět přenáší pouze jednu polaritu napětí.

Zesilovač ve třídě C



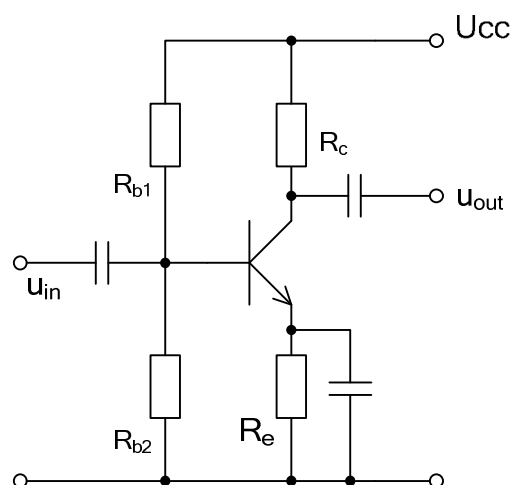
- Klidový pracovní bod je nastaven do oblasti zániku výstupního proudu
- Výstup je necitlivý na malé budící signály
- Vstupní signál se uplatní jen když jeho okamžité hodnoty vstoupí do aktivní oblasti.

Stabilizace klidového pracovního bodu

Jelikož je tranzistor teplotně závislá součástka, což znamená, že se při změně teploty začne měnit procházející proud kolektorem a napětí mezi kolektorem a emitorem. Začíná se nám tedy měnit poloha pracovního bodu. Tato změna polohy je nežádoucí, proto se snažíme ji minimalizovat. Slouží k tomu zapojení (záporná zpětná vazba) s odporem R_e , nebo s proudovým zdrojem.

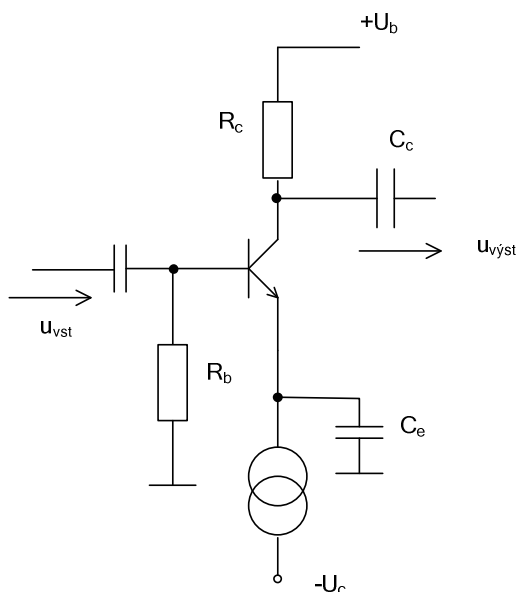
Pomocí odporu R_e

Při změně teploty nám tranzistorem stoupne stejnosměrný proud procházející obvodem. Stejnou směrem napětí mezi kolektorem a emitorem také klesne. Zvětšený proud kolektorem nám vyvolá větší úbytek napětí na R_e , tím nám klesne napětí mezi bází a emitorem a tranzistor se uzavírá. Pro střídavé signály je odpor R_e zkratován kondenzátorem C_e .



Pomocí proudového zdroje místo R_e

Tranzistorem v tomto případě prochází konstantní proud, tím pádem se nemění ani napětí mezi kolektorem a emitorem. Tranzistor je teplotně stabilizován. Pro střídavé signály je proudový zdroj odpojen pomocí kapacitoru C_e . Zapojení nepracuje pokud je tranzistor zcela uzavřen.



Zesilovací stupně s induktivní a rezonanční zátěží

Na rezonanční zátěži je zesílení obvodu největší na rezonančním kmitočtu, to vyplývá z frekvenční charakteristiky impedance paralelního rezonančního obvodu. Fázový posuv je na rezonančním kmitočtu přesně 180° .

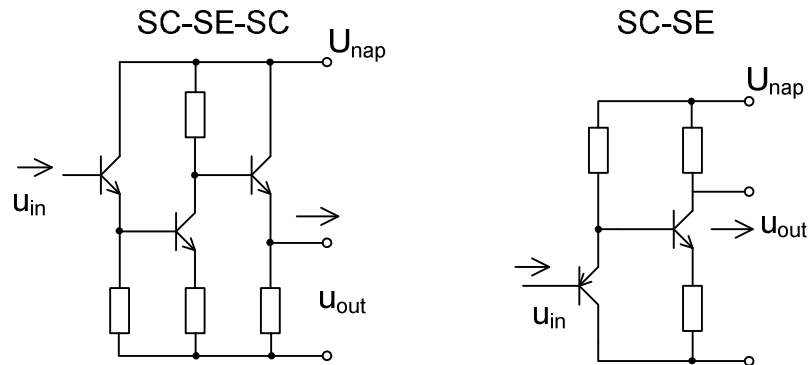
Střídavá vazba širokopásmovými tranzistory

Transformátor galvanicky odděluje (zem obvodů na vstupu není spojena se zemí obvodů na výstupu) vstupní a výstupní obvod. Další významnou vlastností transformátoru je, že transformuje výstupní impedanci na vstup.

Kombinované stejnosměrně vázané zesilovací stupně a bloky

Již se příliš nezlepšují parametry křemíkových tranzistorů pro zesilovače. Pro zlepšení parametrů zesilovače se vytvářejí různé kombinace zesilovacích stupňů, které jsou mezi sebou přímo (galvanicky) spojeny.

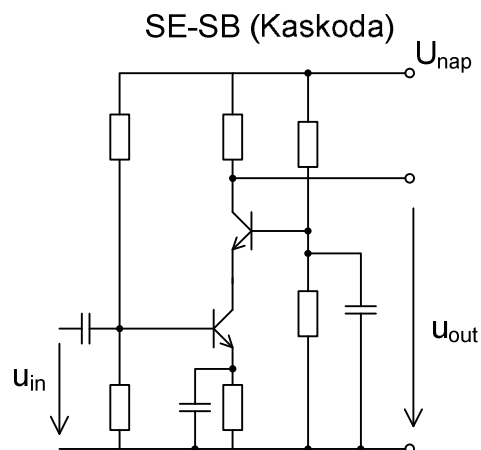
Obvody pro zvýšení horního mezního kmitočtu a jakostního čísla



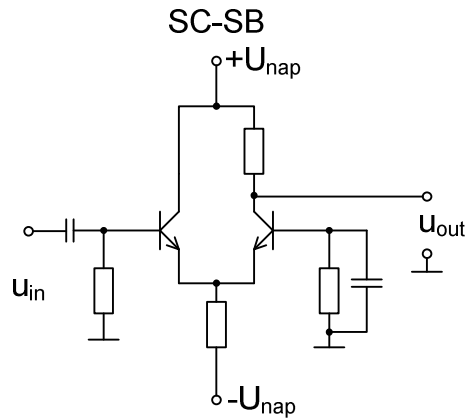
Tranzistor v zapojení SE je kmitočtově závislý v oblasti vysokých kmitočtů (za horním mezním kmitočtem). SC zmenšuje vliv kapacity vnější zátěže a připojením SC na vstup potlačíme vliv vstupní kapacity stupně SE – zvýšíme horní mezní kmitočet.

Zapojení SC-SE s PNP tranzistorem může pracovat s nulovým klidovým napájecím napětím na vstupu a částečně kompenzuje teplotní změny klidového proudu tranzistoru SE. Jakostní číslo se obvykle shora blíží k tranzitnímu kmitočtu tranzistoru v zapojení SE

Potlačení zpětného přenosu



SB se vyznačuje nejmenším zpětným přenosem napětí v širokém pásmu kmitočtů a největší výstupní impedancí. Zátěž zapojení SE-SB bývá širokopásmová (videozesilovače, měřicí zesilovače, vysokofrekvenční a mezifrekvenční zesilovače komunikačních přijímačů). SE je zatížen (vstupním odporem báze) odporem rovným $1/g_m$, a proto je provozní zesílení napětí rovno -1 => **neuplatní se Millerův jev**. Proudový přenos SB je jednotkový. Napětíový přenos celé kombinace je v oblasti středních kmitočtů prakticky stejný jako v samotném zapojení SE. Zapojení obrací fázi.



Zapojení SC-SB má ve srovnání SE-SB větší zpětný přenos, obě nuly přenosu spolehlivě leží v levé polorovině. Hodí se do soustav se silnou zápornou zpětnou vazbou. Používá se v instrumentační technice pro jadernou fyziku – nepřebuditelný stupeň. Tranzistor T1 se totiž nemůže dostat do saturace dokud napětí na jeho bázi nepřekročí napájecí napětí.

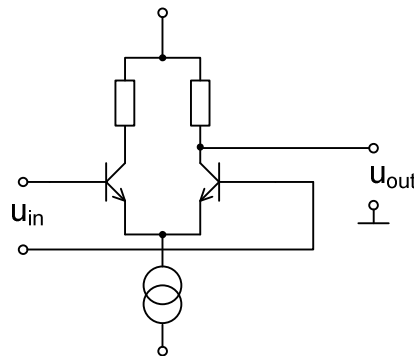
Zmenšení vlivu souhlasného napětí

Požadujeme přenášení pouze rozdílové napětí $u_r = (u_a - u_b)$. Souhlasná složka musí být potlačena $u_s = (u_a + u_b)/2$. Dostatečné potlačení vede k potlačení rušivých signálů nebo k potlačení nežádoucích změn přenosových parametrů bloku.

Idealizace obvodů:

- Použití ideálního zdroje proudu v přívodu emitorů
- Zajištění přísné symetrie dvojice tranzistorů (proudy, napětí a výkonové ztráty)
- Předpokladu nepatrných změn lineárních parametrů tranzistorů při změnách u_s

Můstkový zesilovač



Zesílení rozdílového vstupního signálu: $A_{urozdilové} = -g_m R$

CMR (Common Mode Ratio), CMMR (Common Mode Rejection Ratio) činitel

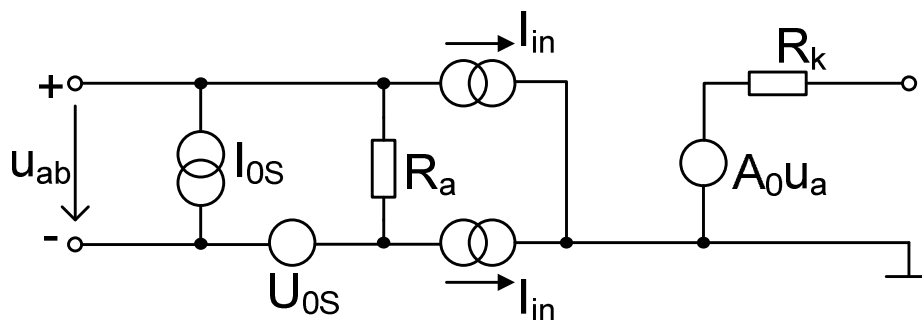
potlačení souhlasné složky: $CMR = 20 \log \left(\frac{A_{urozdilové}}{A_{usouhlasné}} \right)$ [dB]

Reálné operační zesilovače:

Reálné operační zesilovače se liší od ideálních hlavně těmito vlastnostmi:

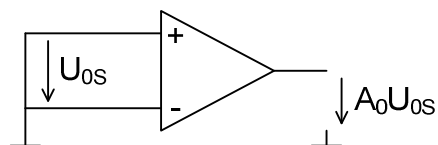
	Operační zesilovač	
	Ideální	Reálný
Zesílení otevřené smyčky A_0 [-]	nekonečno	řádově 10^5
Vstupní diferenciální impedance Z_{id}	nekonečno	$Z_{id} = U_d/I_b$ (OZ typu CMOS typicky 10^{12})
Výstupní impedance Z_0	0	nenulový (typicky 100 do 20 Ω)
Výstupní napěťový offset U_{OS}	0	nenulový
CMR	nekonečno	>70
Šířka pásma	nekonečno	značně omezena (určena mezním kmitočtem zesílení otevřené smyčky)
Šumová napětí	0	Nenulová

Odporový model reálného operačního zesilovače:



Model nerespektuje odpory vstupních svorek proti zemi a přenos souhlasné složky vstupního napětí.

U_{OS} – vstupní napěťová nesymetrie (zdroj není polarizovaný, polarita offsetu je náhodná)



i při nulovém vstupním napětí se na výstupu nějaké napětí objeví

I_{0S} – vstupní proudová nesymetrie (při nulové napěťové nesymetrii a souměrné struktuře vstupu zesilovače by měly být proudy stejné) $I_{0S} = I_{ina} - I_{inb}$

I_{in} – celkový vstupní proud $I_{in} = (I_{ina} + I_{inb}) / 2$

Horní mezní kmitočet OZ je tím menší, čím větší je A_0 při nulové frekvenci.

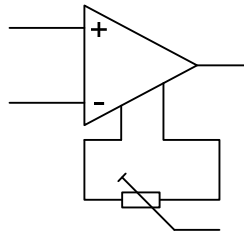
Doba přeběhu SR (Slew Rate):

Výstupní napětí OZ přebíhá určitou mezní rychlostí. Doba přeběhu charakterizuje schopnost OZ přenášet velké a rychlé změny napětí. Udává maximální kmitočet, pod kterým zesilovač neomezuje.

$$f_{\max} = \frac{SR}{2\pi U_{2m}} [MHz, V, \mu s]$$

Kompensace napěťové nesymetrie:

Pomocí potenciometru nastavíme (vstupní svorky připojeny na zem) výstupní napětí na nulu.



Existují také samočinně nulované zesilovače, které kompenzaci nepotřebují.

Kompensace proudové nesymetrie:

Napětí na odporu vyvolané proudem tekoucím z invertující svorky. Kompenzujeme napětím na odporu, vyvolaným proudem tekoucím z neinvertující svorky OZ. Výstupní napětí je pak nulové.

