

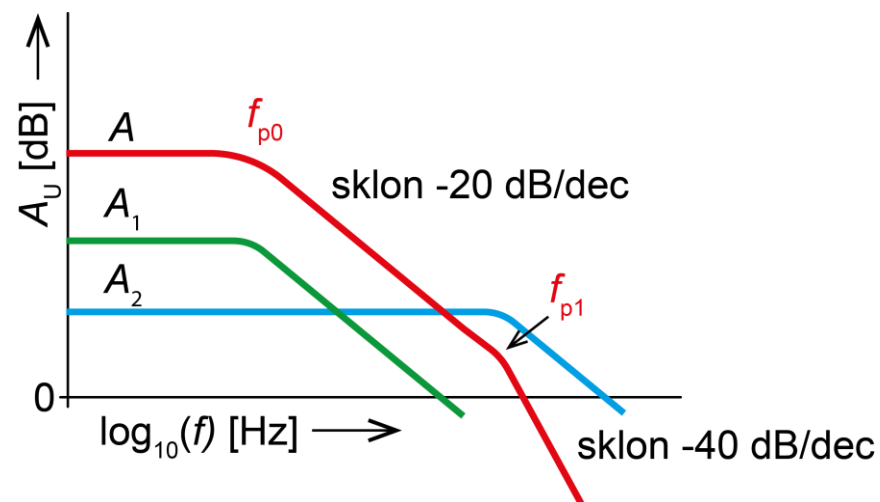
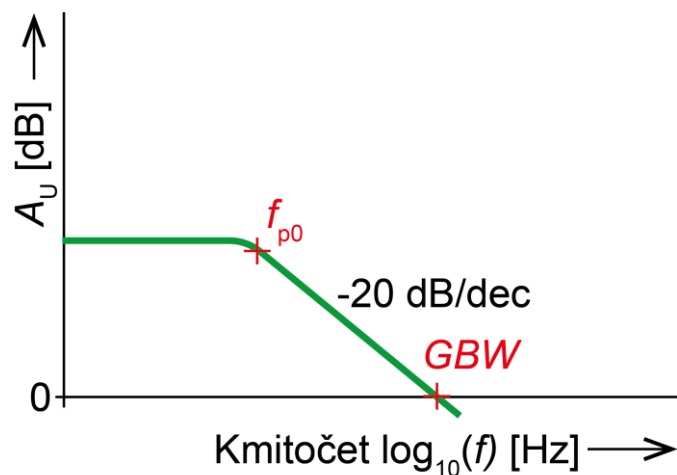
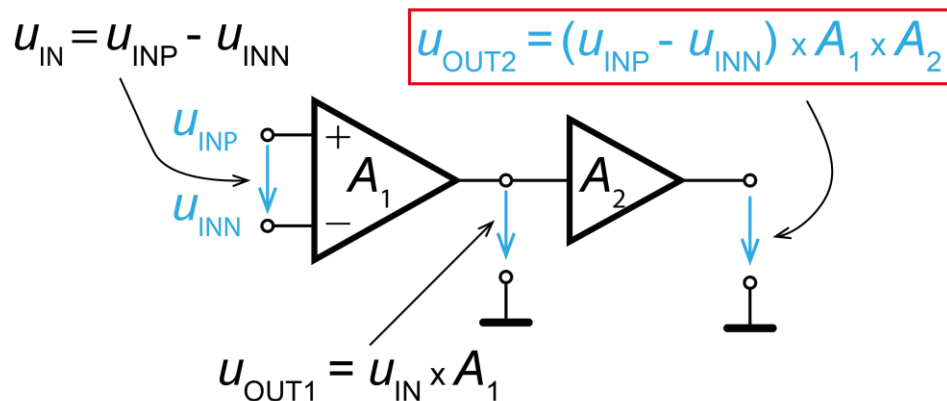
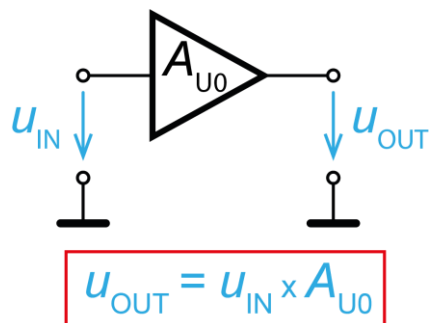
4. DVOUSTUPŇOVÝ ZESILOVAČ

Cvičení na počítači

Vilém Kledrowetz

LS 2025

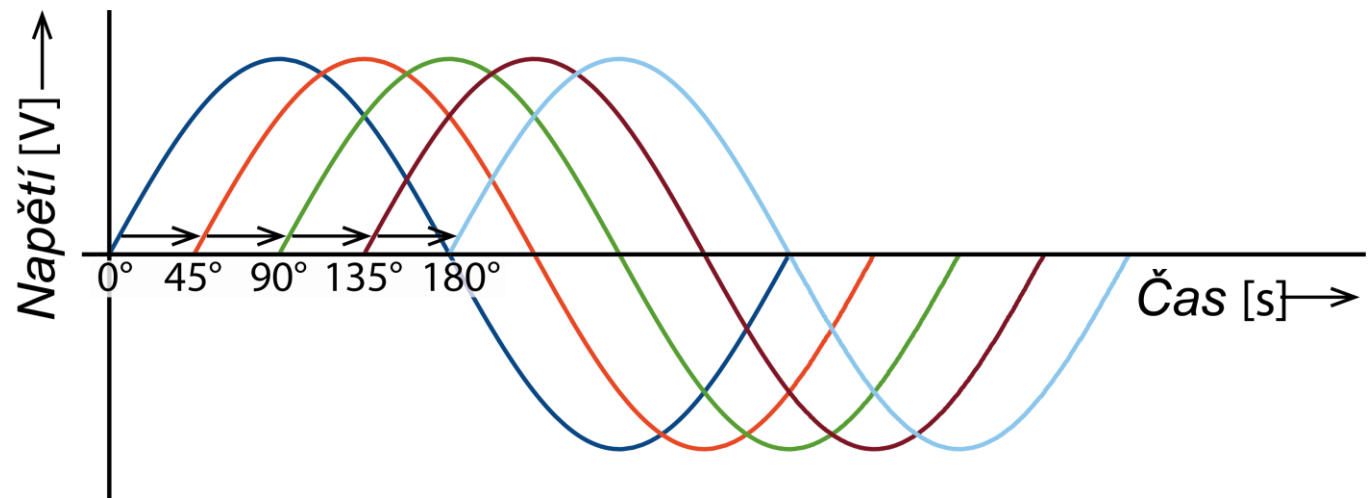
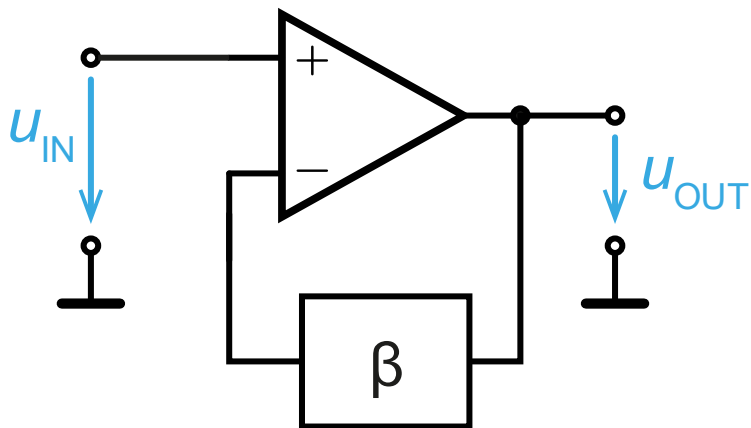
- Více stupňů v zesilovačích
- Stabilita
- Diferenční pár
- Návrh dvoustupňového zesilovače



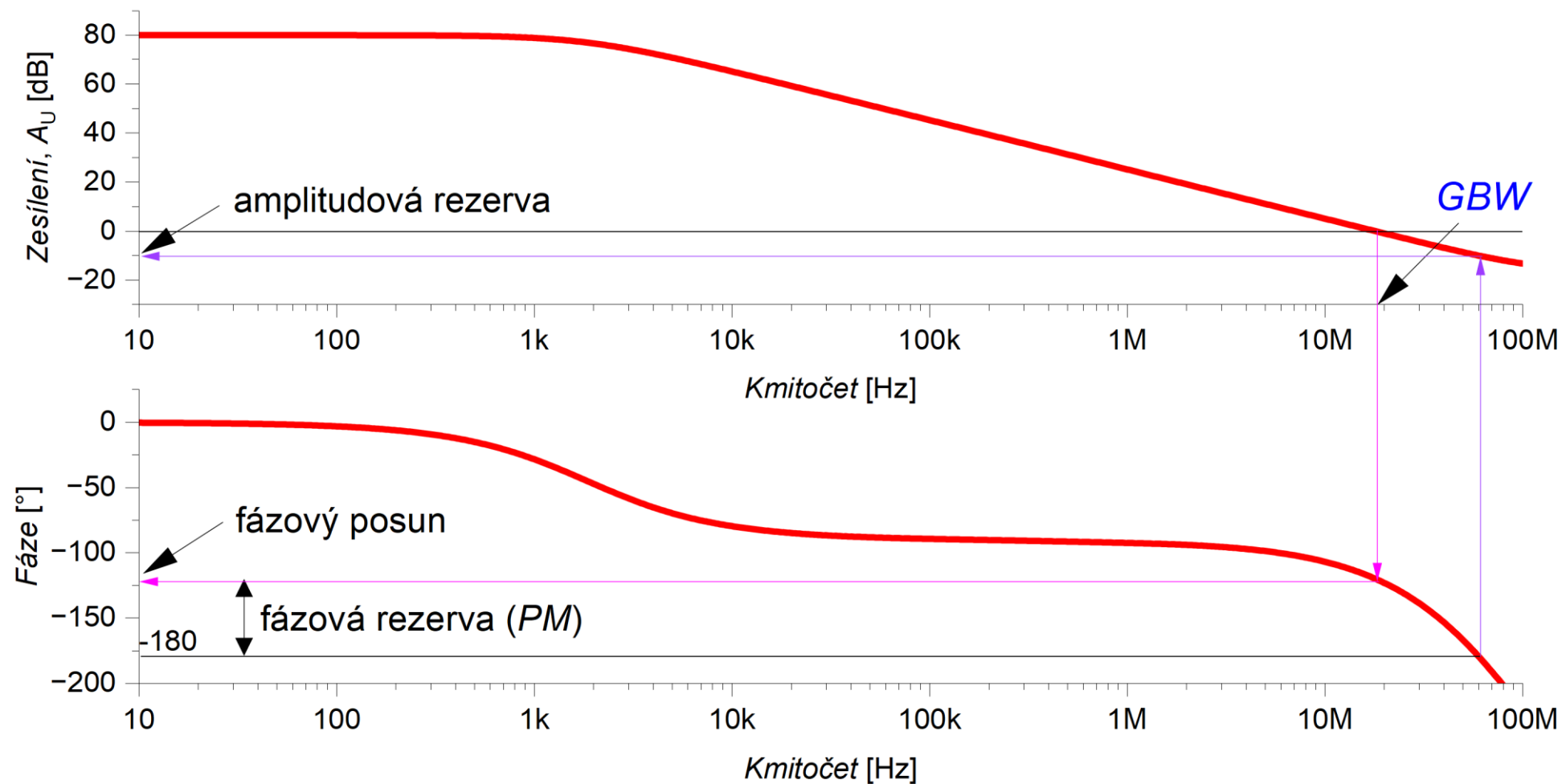
- Zesílení lze zvyšovat přidáním dalších stupňů.
- Počet dalších stupňů zesilovače však nejde přidávat bez omezení. U více stupňů nastává problém se zajištěním dostatečné fázové rezervy a tím zajištěním stability obvodu s tímto zesilovačem.
- Z tohoto důvodu je prakticky omezen počet stupňů na 3. Standardní jsou zesilovače se dvěma stupni a přidáním výstupního bufferu, který se není zesilovacím stupněm.

Fázový posun výstupního signálu

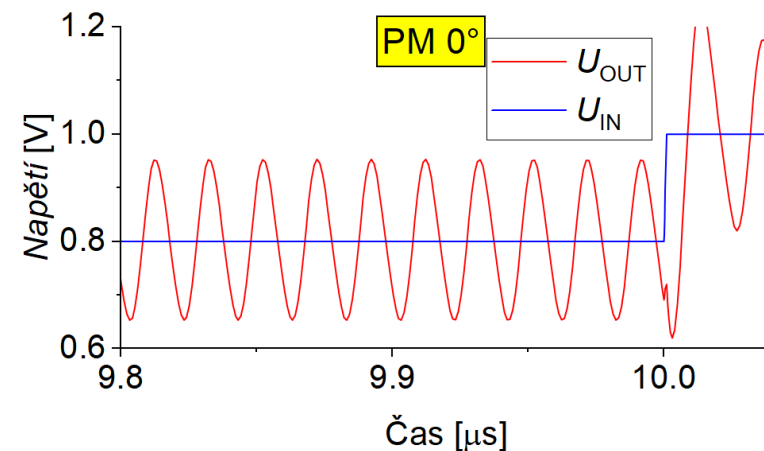
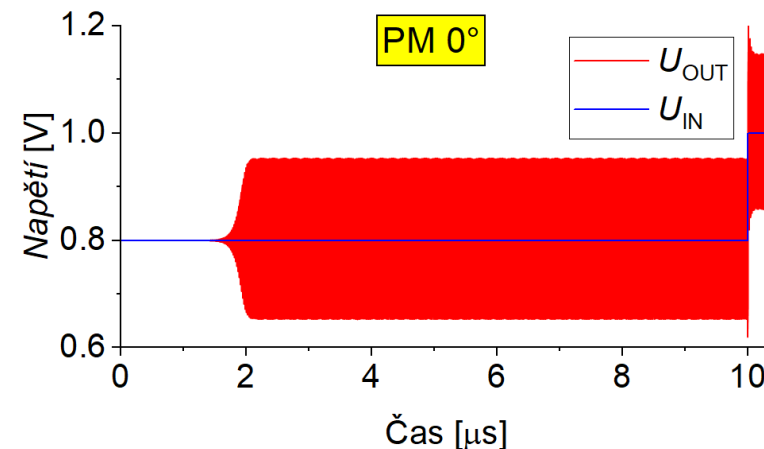
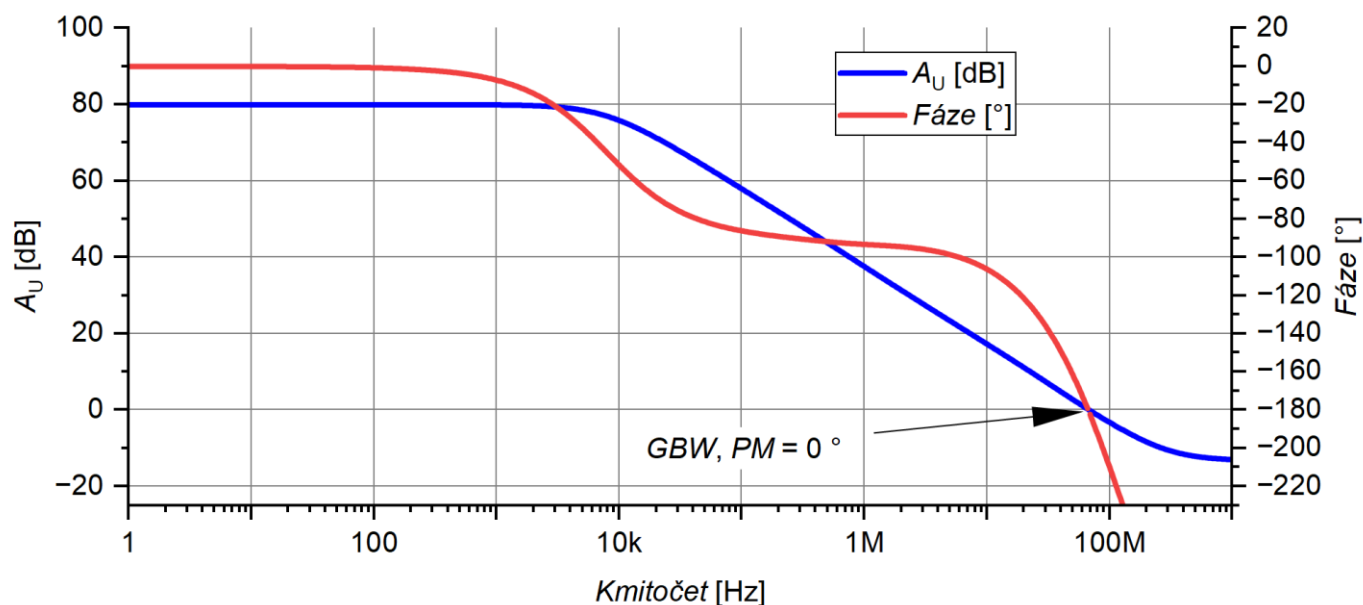
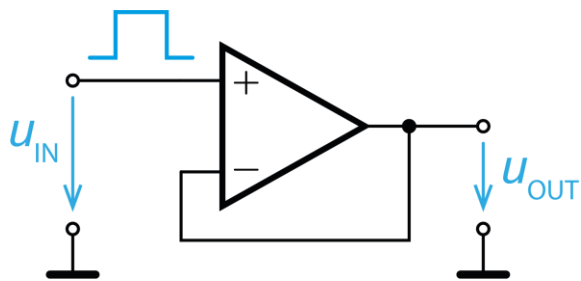
- Při „průchodu“ signálu zesilovačem dochází k jeho fázovému zpoždění (posunu).
- V případě zapojení zesilovače se zpětnou vazbou (např. sledovač) je velikost fázového posunu kritický parametr pro dosažení stabilního obvodu, který nebude kmitat!
- V krajním případě, pokud je fázový posun 180° , se záporná zpětná vazba mění na kladnou!
- Fázová rezerva – kolik stupňů $[\circ]$ zbývá do posunu o 180° .
- Amplitudová rezerva – kolik je zisk zesilovače, pokud je fázový posun 180°



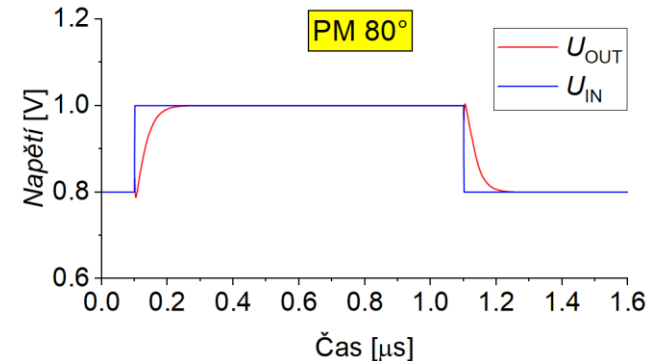
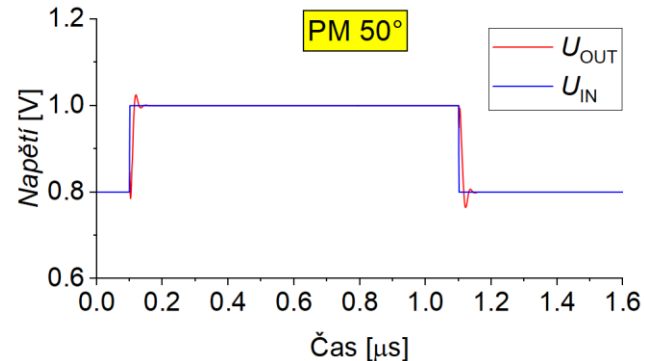
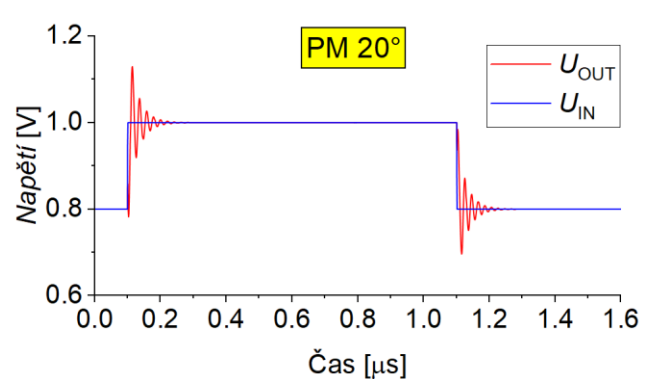
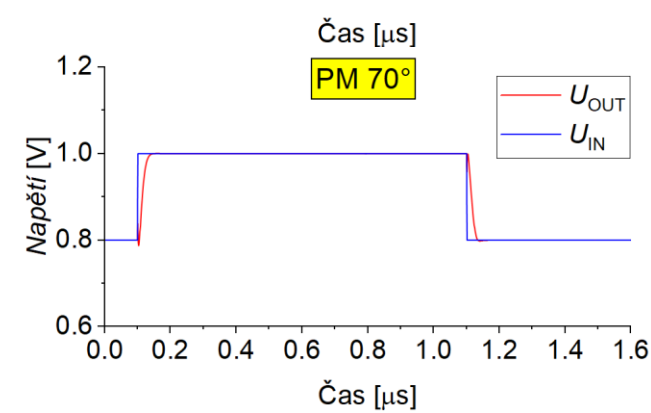
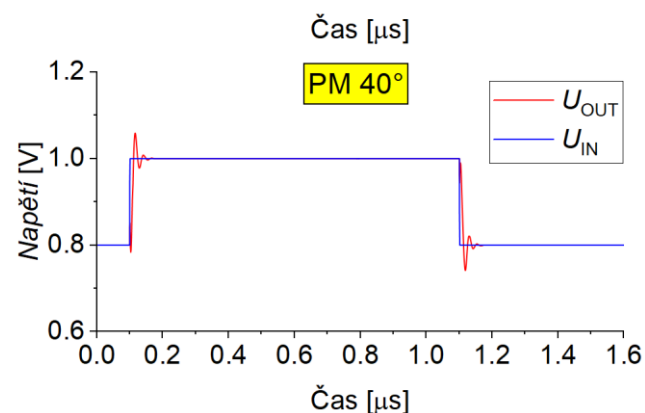
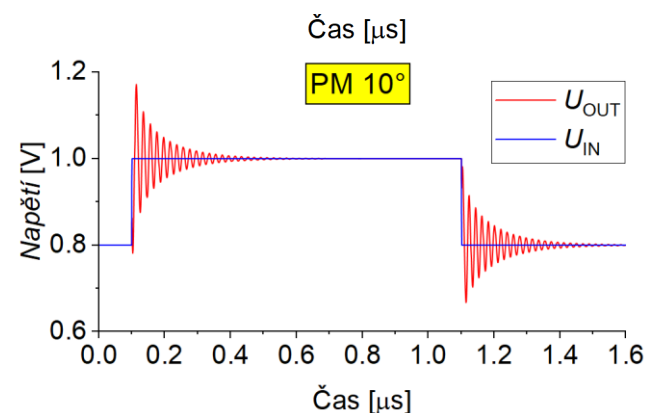
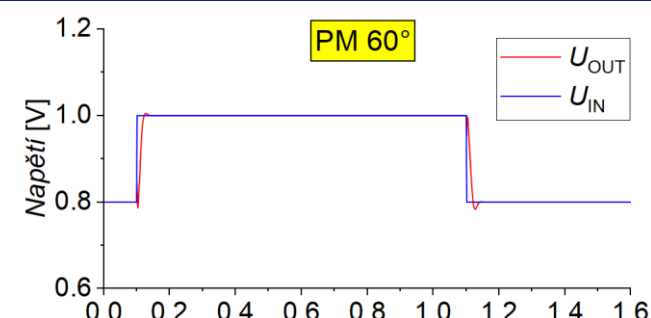
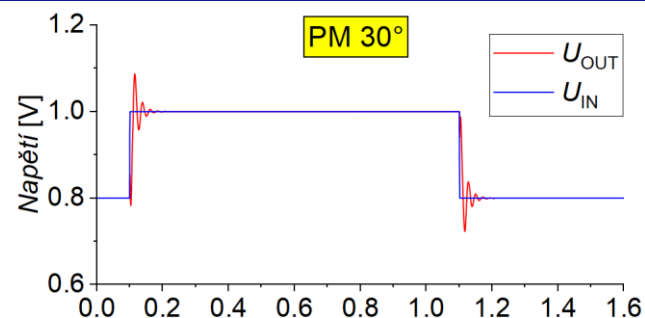
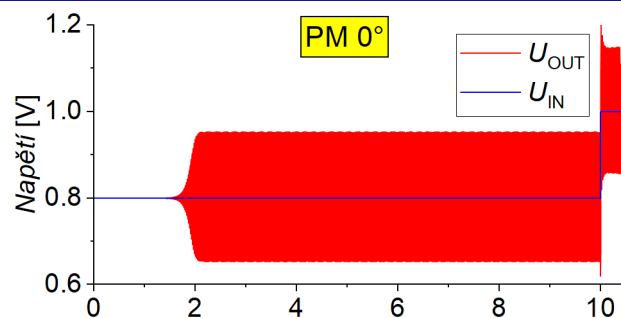
Bodeho diagram - fázový a amplitudová rezerva

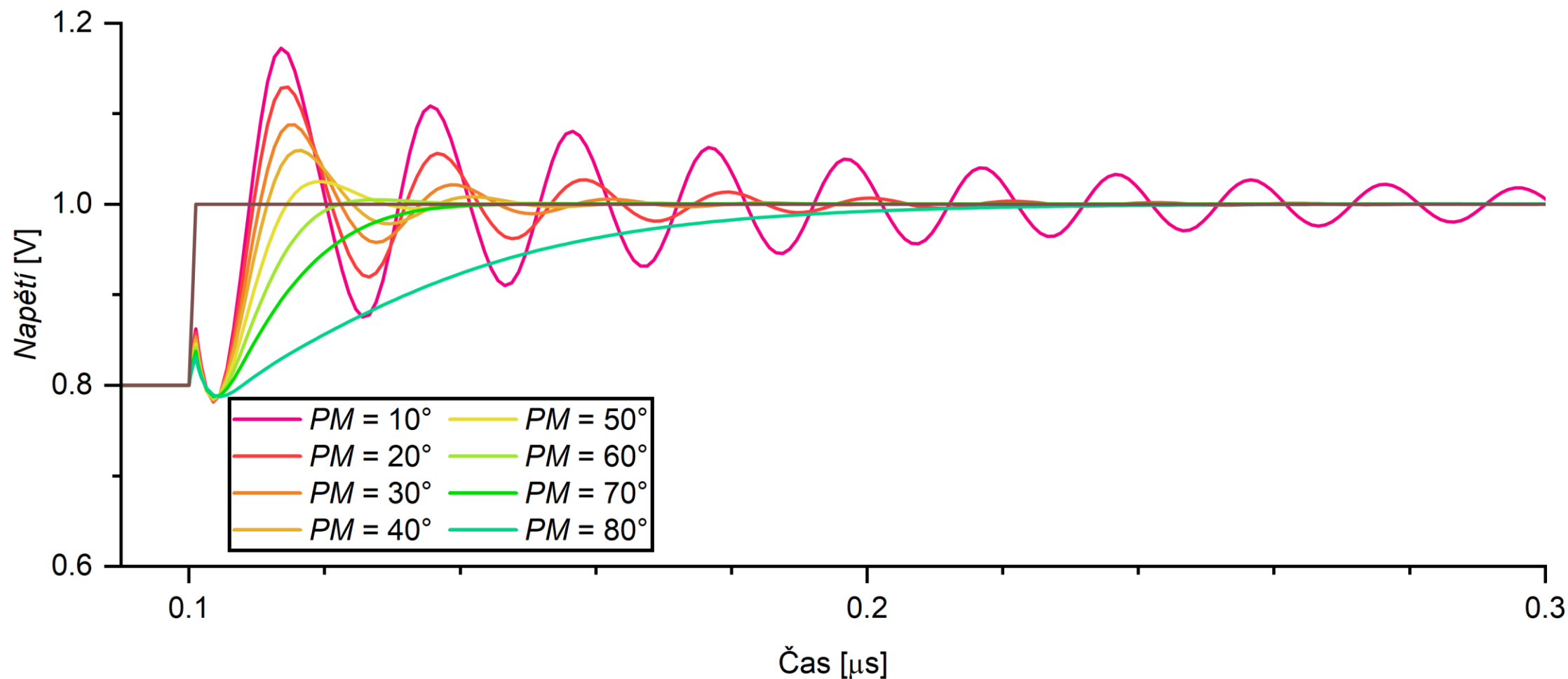


Příklad odezvy zapojení sledovače na skokový vstupní signál u nestabilního zesilovače



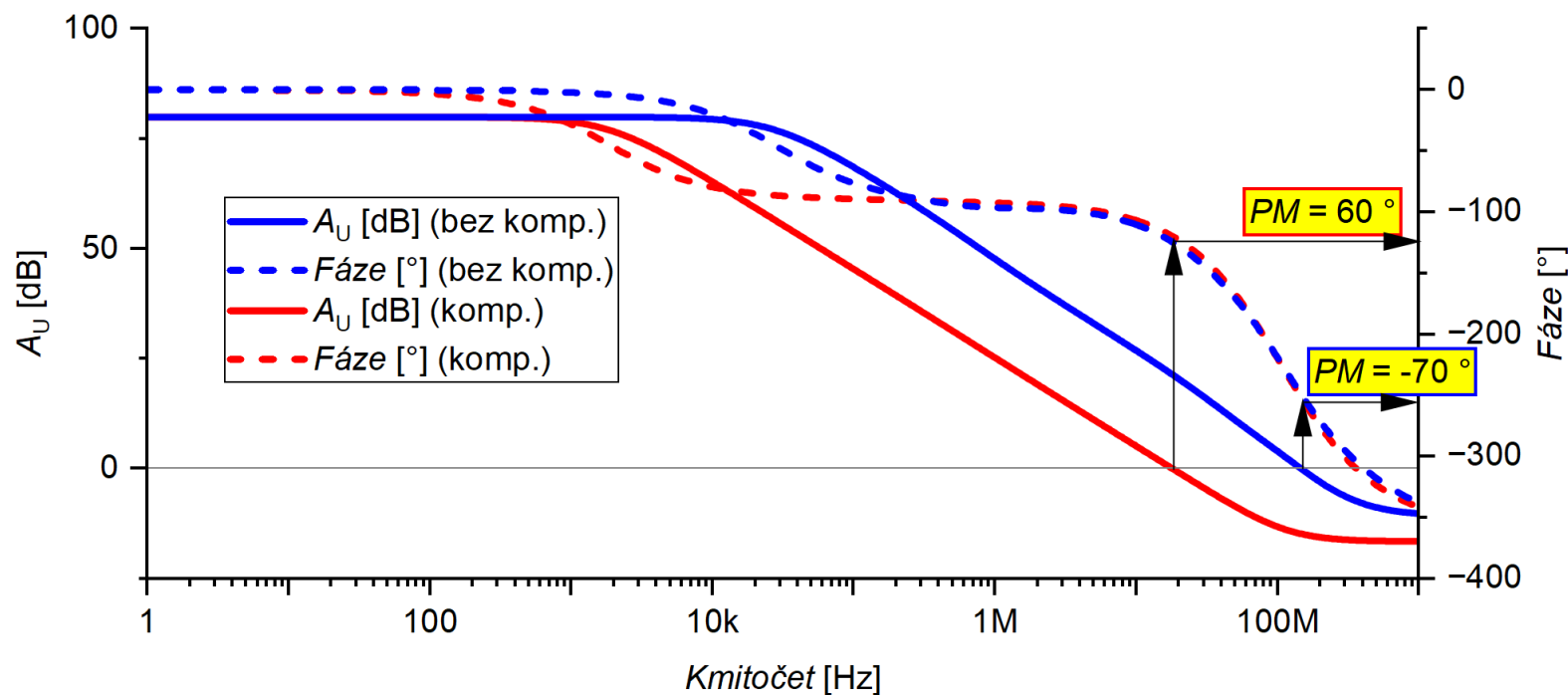
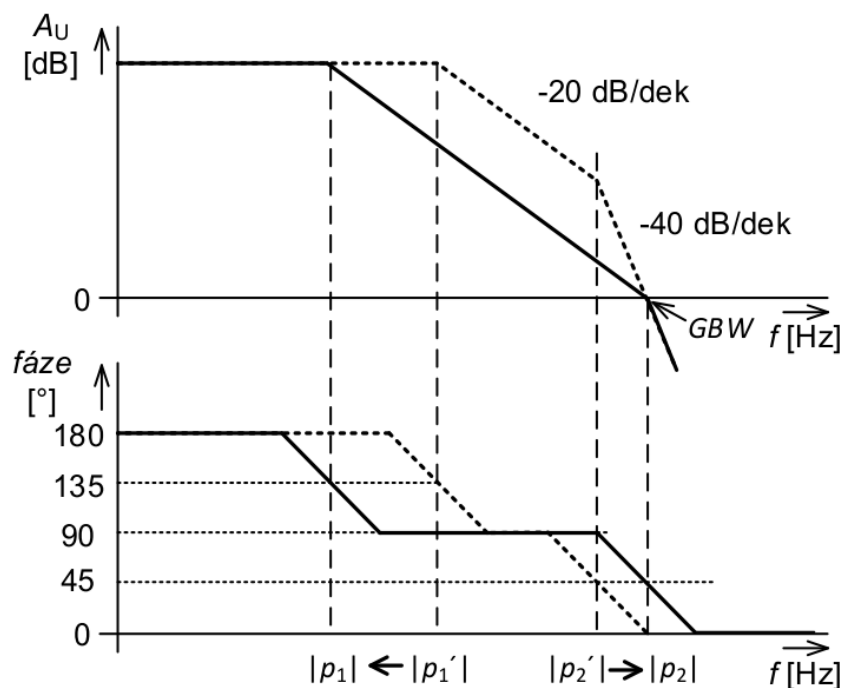
Fázová bezpečnost – odezva na skokový signál





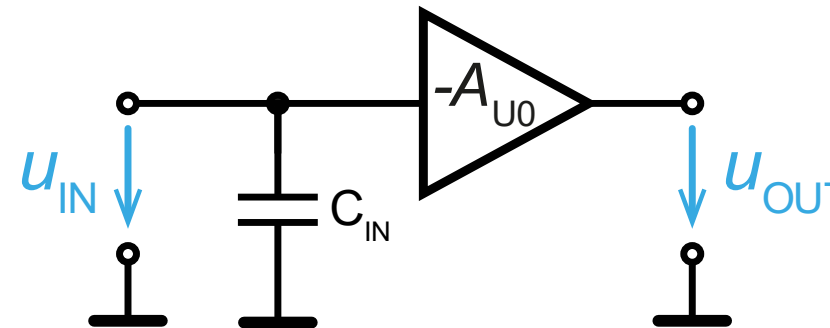
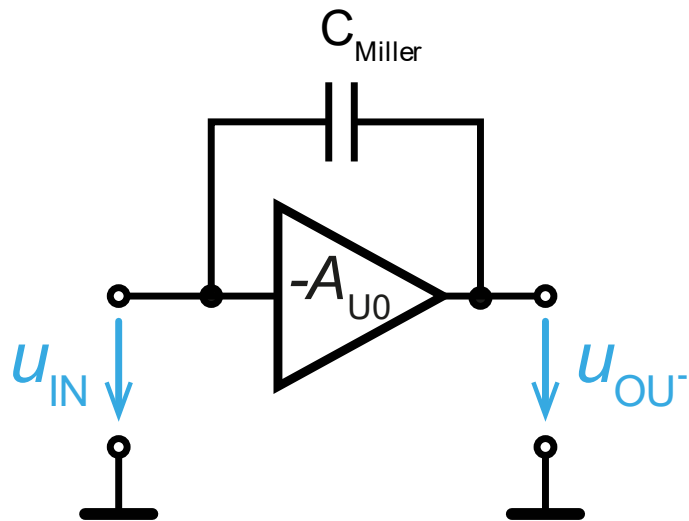
Jak zajistit fázovou bezpečnost?

- Rozštěpení pólů – dominantní posunout na nižší kmitočet a nedominantní na vyšší



Fázová bezpečnost – Millerův efekt (jev)

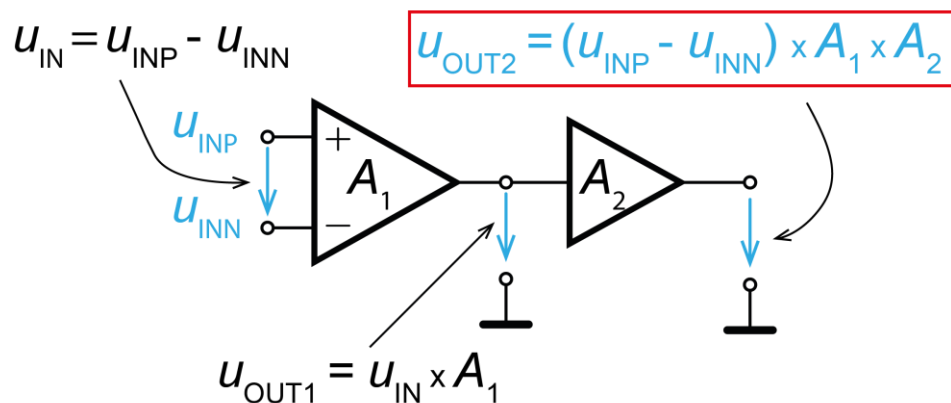
- Pro zajištění stability invertujícího zesilovače lze využít Millerova jevu.
- Millerův jev: kapacita připojená mezi vstup a výstup **invertujícího** zesilovače zatěžuje zdroj vstupního signálu stejně jako kapacita připojená mezi vstupní uzel zesilovače a zem vynásobená zesílením zesilovače plus jedna.



- Stejný efekt obou kapacit, pokud:

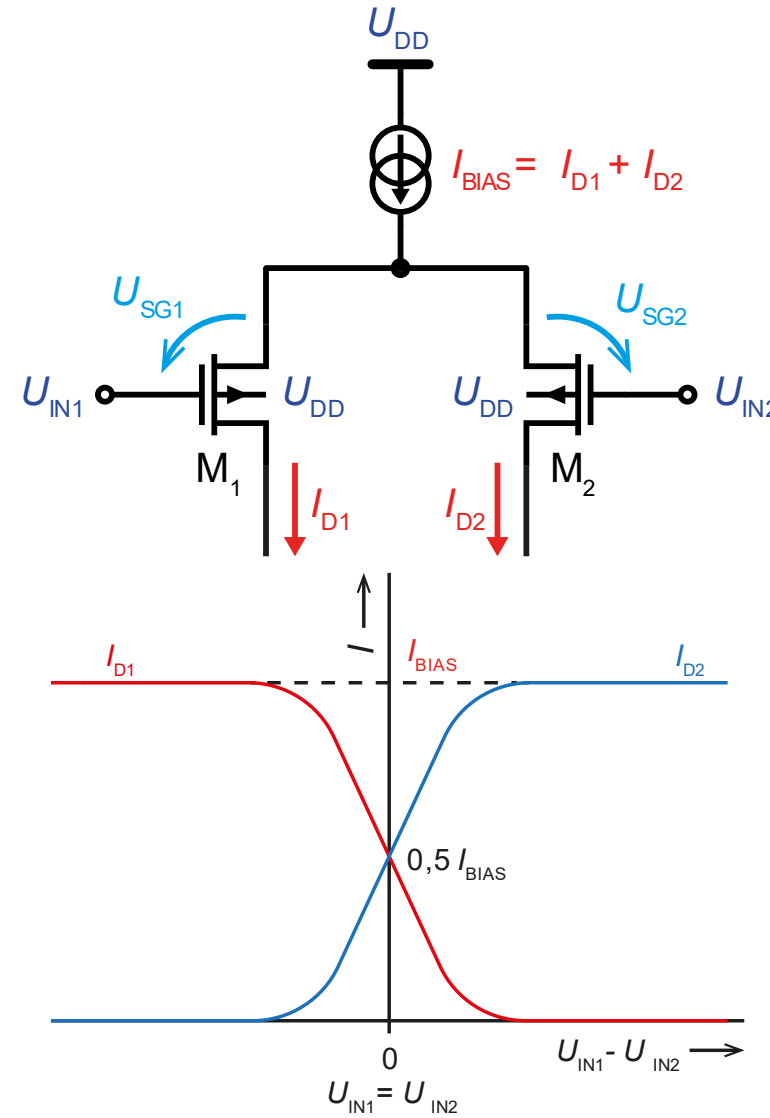
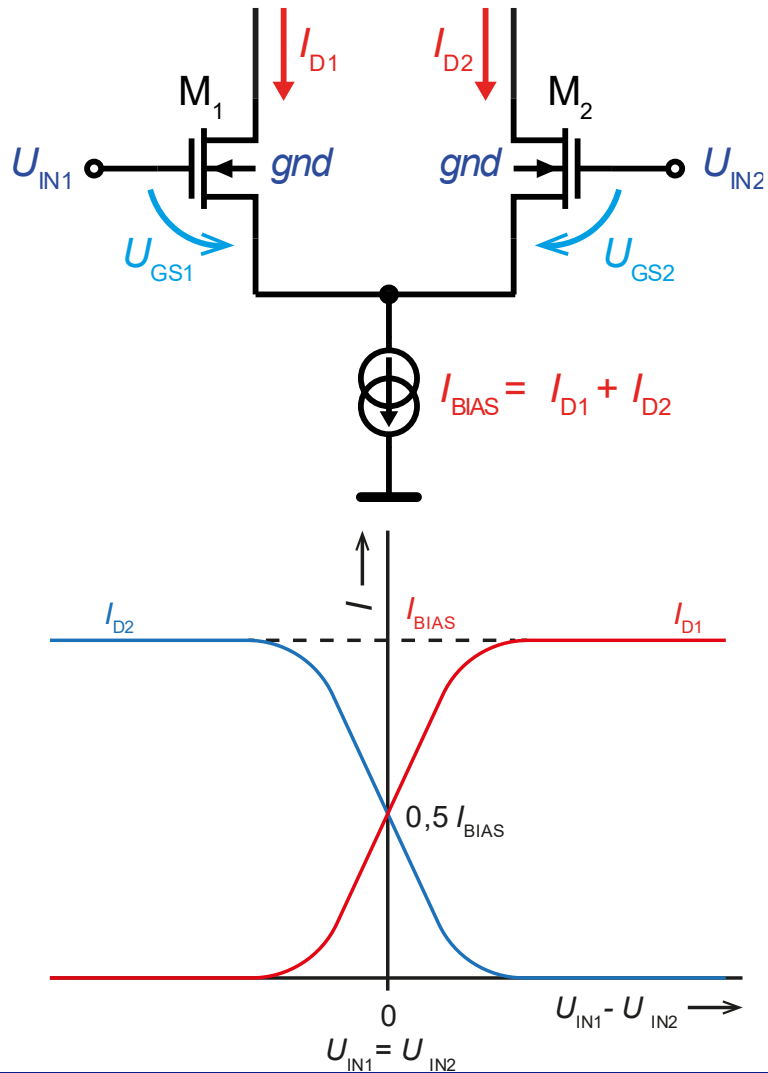
$$C_{IN} = C_{Miller} \cdot (|A_{U0}| + 1)$$

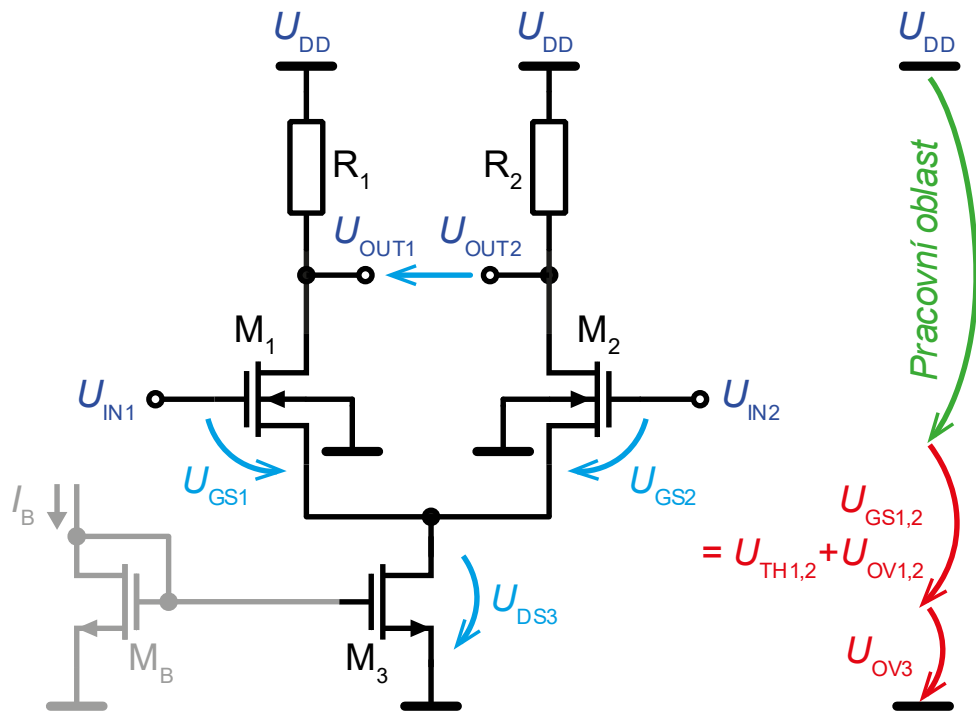
- Tranzistorový zesilovač probraný v předchozí úloze zesiluje signál, který je dán napětím mezi hradlem a source tranzistoru.
- Diferenční pár zesiluje rozdíl napětí na vstupních uzlech nezávisle na jejich absolutní velikosti (viz. tabulka).
- Spojením těchto dvou zesilovačů dostaneme dvoustupňový zesilovač s diferenčním vstupem a tzv. „single-ended“ výstupem.



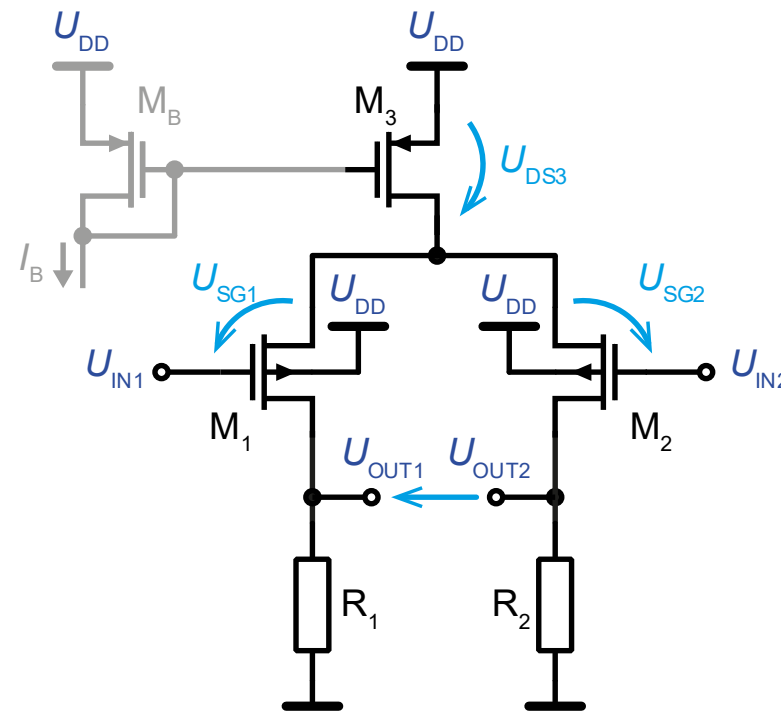
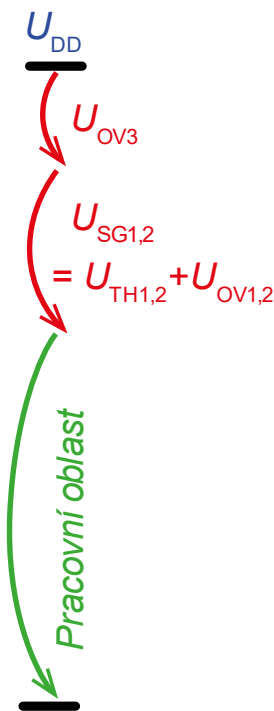
UINP	UINN	UIN
4,1 V	4 V	0,1 V
2,2 V	2,1 V	0,1 V
1,3 V	1,2 V	0,1 V
0,6 V	0,5 V	0,1 V
0,1 V	0 V	0,1 V

Diferenční pár - princip

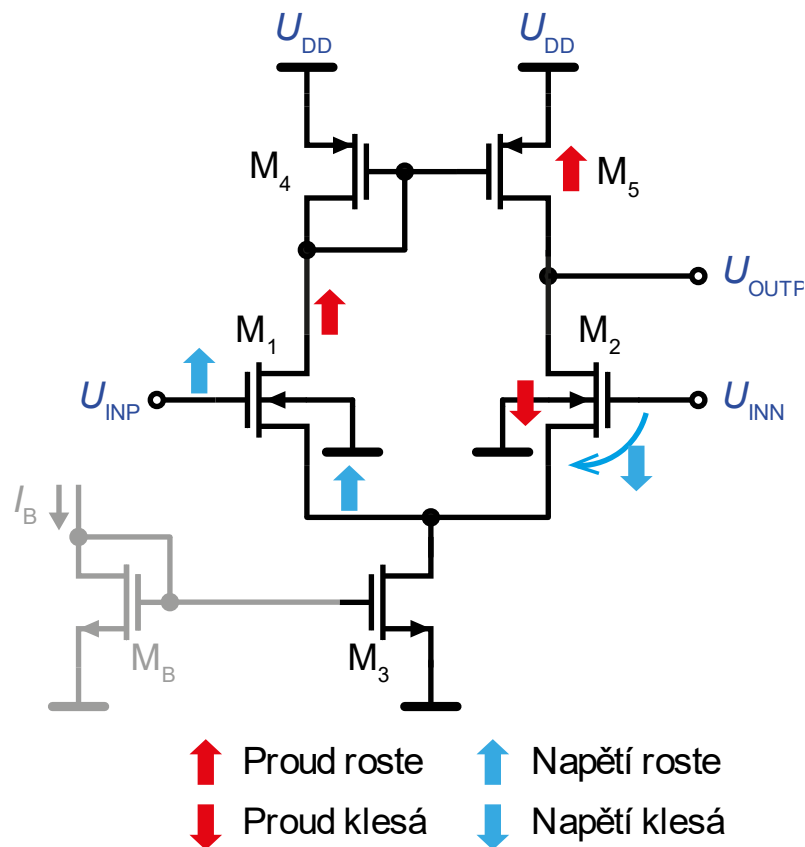




- omezený vstupní rozsah zespodu
- bulk efekt v nwell technologiích
- vysoké KP (g_m)
- menší rozměry tranzistorů



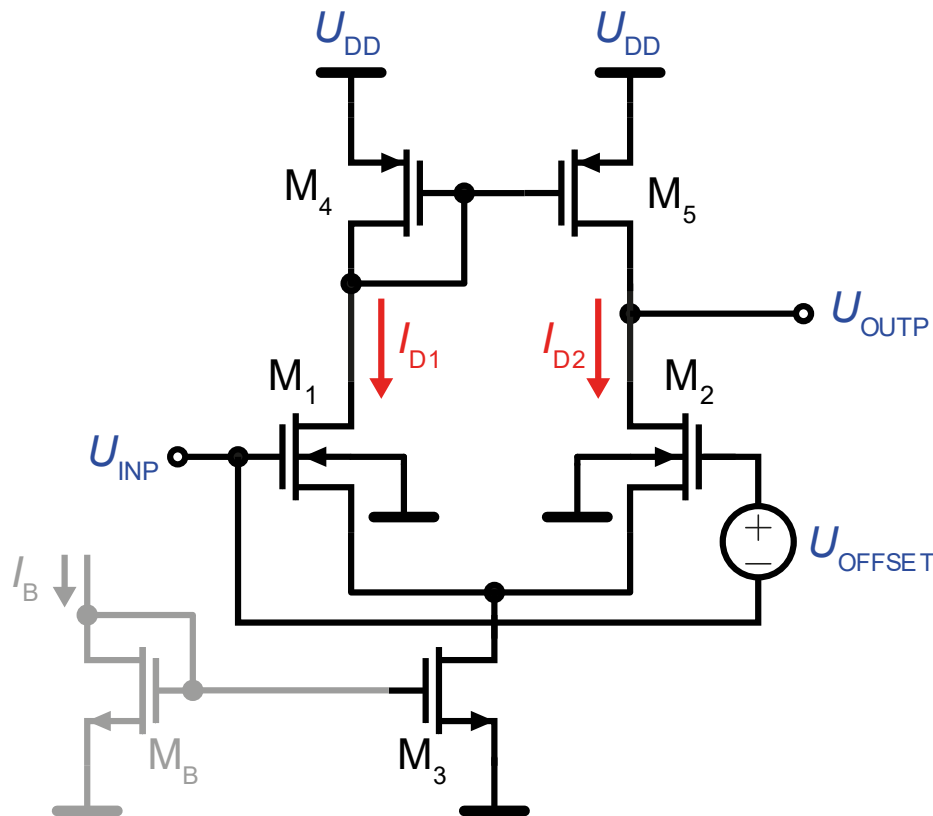
- omezený vstupní rozsah seshora
- v nwell technologiích možno spojit bulk a source (bez bulk efektu)
- nízké KP (g_m) pro stejné rozměry MOS
- větší rozměry tranzistorů



$$A_{U0} = -g_{m1} \cdot R_{OUT}$$

- Pro plné zesílení na jednom výstupu je proud z jedné větve (zde levé) zrcadlen do druhé větve. Díky tomu je dosaženo plné zesílení s jedním výstupem.
- Pokud je výstupní uzel tažen nahoru (PMOS se otevírá), NMOS jde opačným směrem, tj. se přivírá a „netáhne“ výstupní bod dolů.
- Pro nízkou vstupní napětovou nesymetrii (offset) je důležité mít co nejbližší hodnoty U_{DS} tranzistorů M_4 a M_5 .
- Napětí výstupního uzlu je určeno druhým stupněm zesilovače.

Diferenční pár – vstupní napěťová nesymetrie (offset)

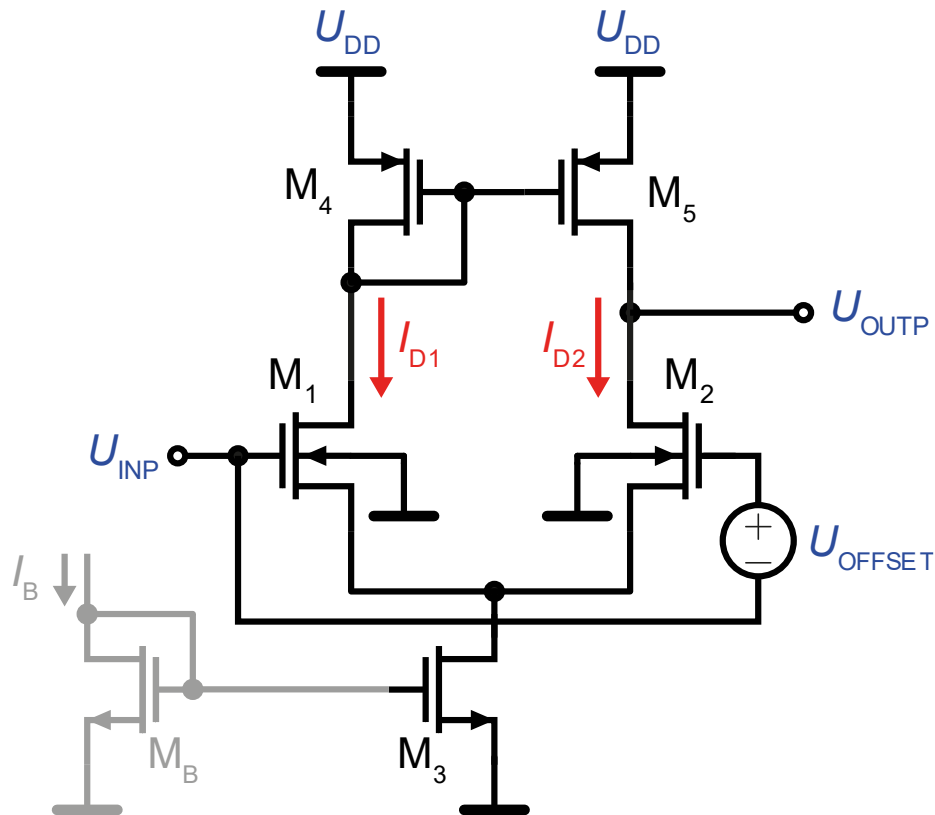


Pokud připojíme na oba vstupy stejné napětí, jsou proudy I_{D1} a I_{D2} stejné, tzn. $I_{D1} = I_{D2}$ a výstupní napětí je rovno analogové zemi (v tomto případě $U_{DD}/2 = 0,9$ V). Napětí $U_{OFFSET} = 0$ V.

Pokud však vlivem nesymetrie větví $M_{1,4}$ a $M_{2,5}$ nejsou proudy stejné (a $U_{OUT} \neq U_{DD}/2$), musíme proudy dorovnat vnějším napětím U_{OFFSET} . Velikost tohoto napětí je rovno velikosti vstupní napěťové nesymetrie. Ta může být:

- **systematická:** je způsobena nepřesností návrhu, nebo chybami v návrhu. U dobrého návrhu (záleží však na struktuře obvodu) dosahuje jednotek až nižších desítek μ V.
- **náhodná:** způsobená rozptylem výrobního procesu. Lze ji potlačit vhodným návrhem (obvodovým a především topologií – layoutem). Typicky dosahuje jednotek mV.

Diferenční pár – vstupní napěťová nesymetrie (offset)



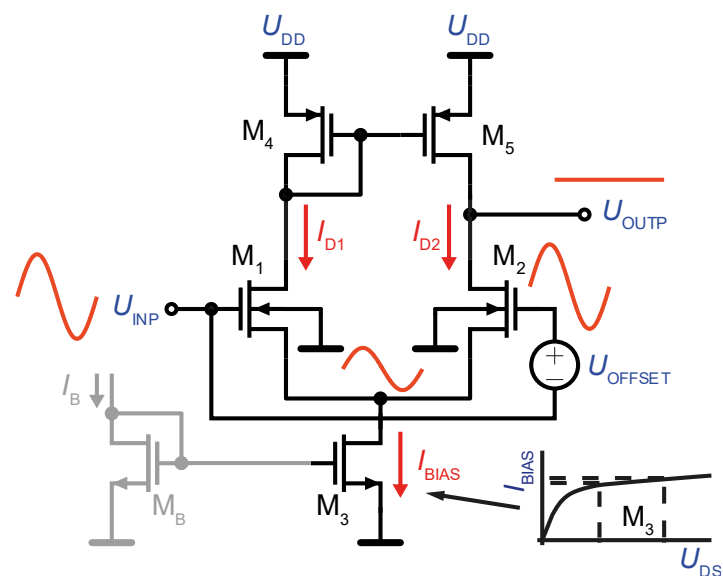
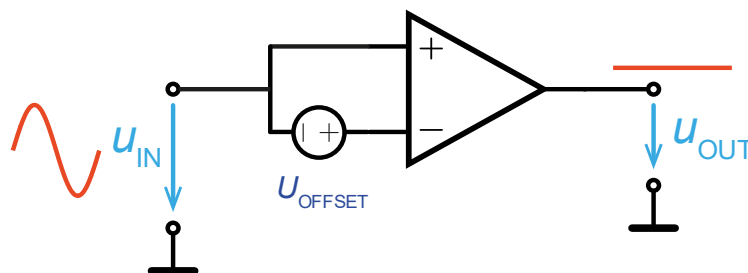
Nejčastější příčinou systematické vstupní nesymetrie jsou rozdílné napětí U_{DS4} a U_{DS5} . To má za následek rozdílné proudy tranzistorů.

$$I_{D1} = \frac{1}{2} \cdot KP \cdot \left(\frac{W}{L}\right)_4 \cdot (U_{GS4} - U_{TH})^2 \cdot (1 + \lambda \cdot U_{DS4})$$

$$I_{D2} = \frac{1}{2} \cdot KP \cdot \left(\frac{W}{L}\right)_4 \cdot (U_{GS5} - U_{TH})^2 \cdot (1 + \lambda \cdot U_{DS5})$$

Ve výše uvedených rovnicích jsou všechny černě zapsané parametry stejné. Jak z těchto rovnic vyplývá, pokud jsou jiné U_{DS} , jsou i jiné proudy, což způsobuje vstupní napěťovou nesymetrii (offset)

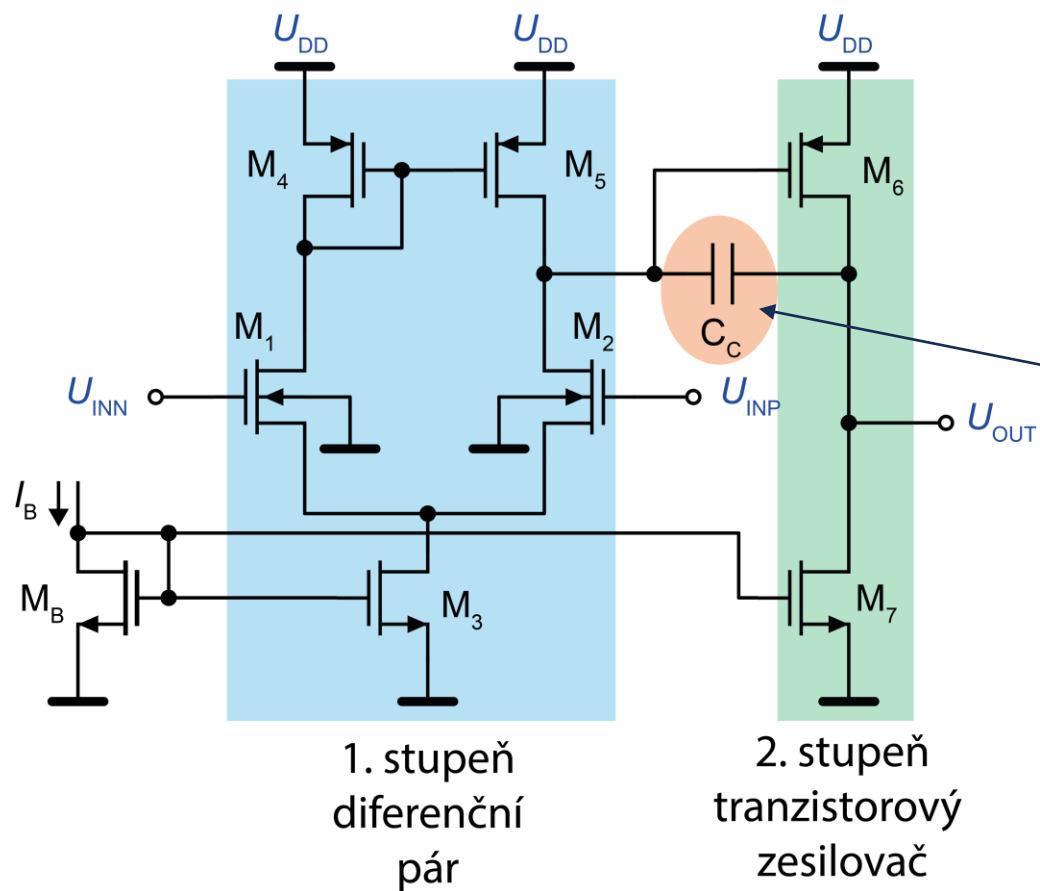
Pro zajištění stejných hodnot U_{DS} je důležité navrhnout správně 2. stupeň, který vnutí napětí do uzlu U_{OUT} .



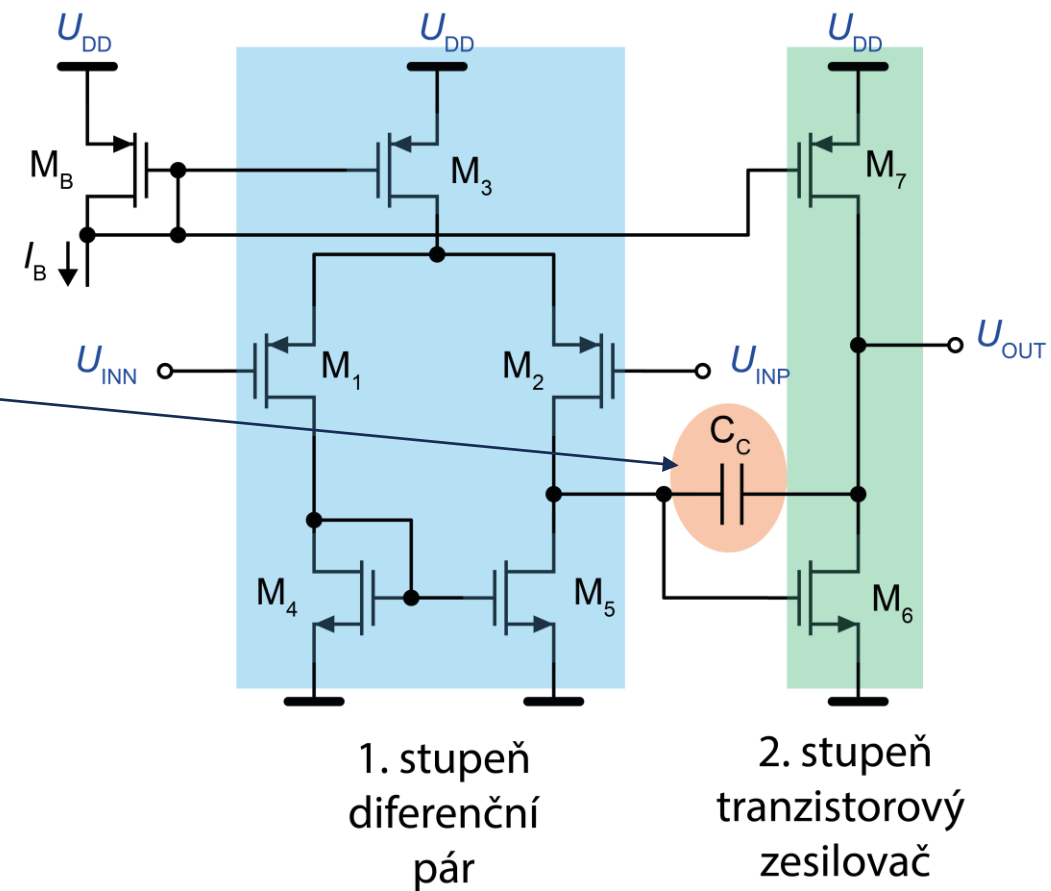
CMRR (Common-Mode Rejection Ratio) – potlačení stejnosměrné složky

- Pokud je na oba vstupy diferenčního zesilovače přiveden stejný signál (včetně napětí offsetu), je rozdíl mezi vstupními signály nulový a tedy výstup setrvává v hodnotě analogové země (zde $U_{DD}/2$).
- Nemělo by záviset na DC posunu, tedy zesilovat např. 100 mV bude zesilovač, pokud budou vstupy: 0,6 V a 0,5 V; 1,1 V a 1 V nebo 1,5 V a 1,4 V.
- Reálně však dochází se zvyšujícím se posunem DC složky ke změnám obvodu, např. růstu proudu I_{BIAS} vlivem konečného odporu M_3 .
- Tuto závislost, resp. jak moc je tento vliv utlumen, popisuje parametr *CMRR*.

Dvoustupňový zesilovač



Millerova
kompenzační
kapacita



Tipy pro návrh:

- Pro zajištění stability je odvozeno, že musí platit

$$C_C \geq 0,22 \cdot C_L \Rightarrow 0,3 \cdot C_L \quad g_{m6} \geq 10 \cdot g_{m1}$$

- Pro nízký offset

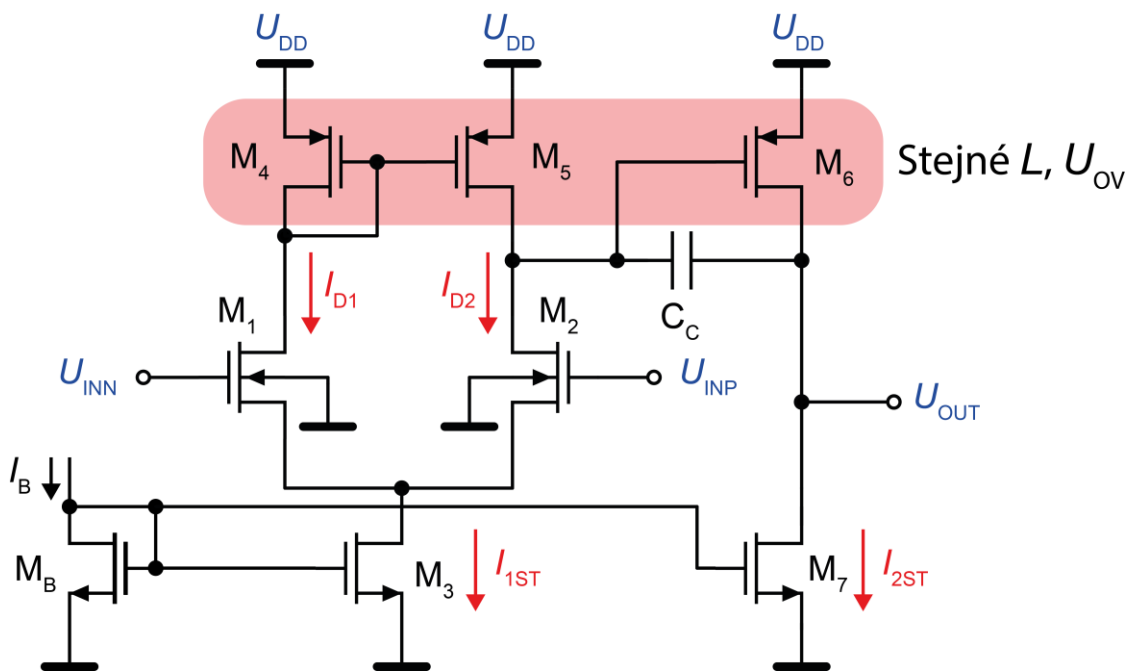
$$U_{OV6} = U_{OV4} = U_{OV5}$$

- Rychlost přeběhu je interní a externí. Při dodržení doporučení – viz. výše, obvod limituje SR_{int} .

$$SR_{int} = \frac{I_{1ST}}{C_C} = \frac{I_{1ST}}{0,3 \cdot C_L} = \frac{3,3 \cdot I_{1ST}}{C_L}$$

$$SR_{ext} = \frac{I_{2ST} - I_{1ST}}{C_L} = \frac{4 \cdot I_{1ST}}{C_L}$$

$$U_{OV6} = U_{OV1} \Rightarrow I_{2ST} = 5 \cdot I_{1ST}$$



Dvoustupňový zesilovač - příklad

- Navrhněte dvoustupňový operační zesilovač se vstupními tranzistory typu NMOS, který bude navržen s ohledem na parametry uvedené v tabulce 1. Zátěž $C_L = 5 \text{ pF}$.

parametr	hodnota	Vypočítané	Simulace
zesílení (A_{U0})	$\geq 60 \text{ dB}$		
šířka pásma (GBW)	$\geq 5 \text{ MHz}$		
fázová rezerva (PM)	$\geq 60^\circ$	60°	
amplitudová rezerva (AM)	- dB	Nepočítá se	
rychlost přeběhu (SR)*	$\geq 5 \text{ V}/\mu\text{s}$		
systematický offset (U_{OFF})	$\leq 500 \mu\text{V}$	0	
spotřeba (P_{diss})	- mW		
vstupní napěťový rozsah ($ICMR$)	- V		
výstupní napěťový rozsah (OVS)	- V		

Dvoustupňový zesilovač - příklad

Kompenzační kapacita

$$C_C \geq 0,22 \cdot C_L \Rightarrow 0,3 \cdot 5p = 1,5 pF$$

Nalezení proudu I_{1ST}

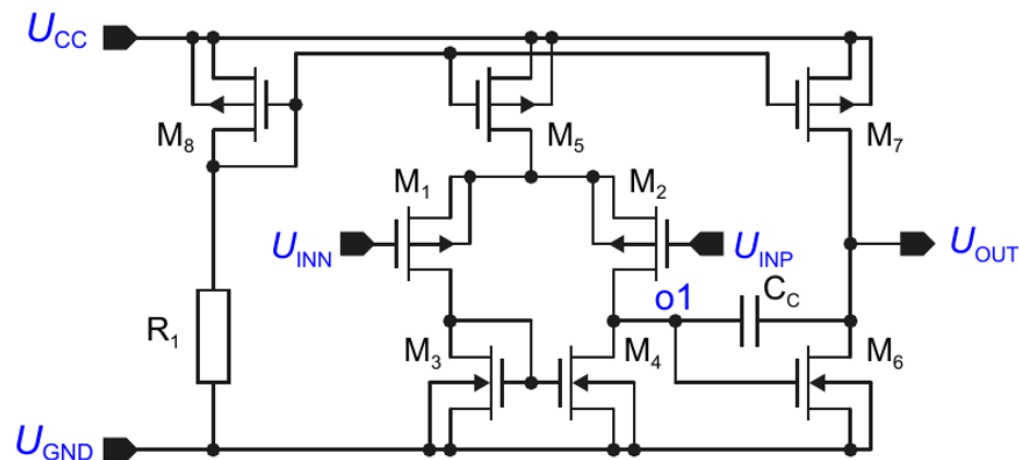
$$SR_{int} = \frac{I_{1ST}}{C_C} \Rightarrow I_{1ST} = SR_{int} \cdot C_C = 5M \cdot 1,5p = 7,5 \mu A$$

$$GBW = \frac{g_{m1}}{2 \cdot \pi \cdot C_C} = \frac{I_{D1}}{U_{OV1} \cdot \pi \cdot C_C} \Rightarrow I_{D1} = GBW \cdot U_{OV1} \cdot \pi \cdot C_C = 5Meg \cdot 0,2 \cdot \pi \cdot 1,5p = 4,72 \mu A \rightarrow I_{1ST} = 2 \cdot I_{D1} = 2 \cdot 4,7\mu \cong 9,5\mu A$$

Zvolený proud je $I_{1ST} = 9,5 \mu A$. S tímto proudem je přepočítáno SR a vypočítáno g_{m1} .

$$g_{m1} = \frac{2 \cdot I_{D1}}{U_{OV1}} = \frac{2 \cdot 4,75\mu}{0,2} = 47,5 \mu S$$

$$SR_{int} = \frac{I_{1ST}}{C_C} = \frac{9,5\mu}{1,5p} = 6,3 V/\mu s$$



Dvoustupňový zesilovač - příklad

Rozměry tranzistorů v 1. stupni – u $M_{1,2}$ bylo v předchozím kroku zvoleno $U_{OV} = 0,2$ V. U zbývajících tranzistorů je tato hodnota zvolena také z důvodu maximálního vstupního rozsahu (nízké napětí přechodu MOS do saturace)

$$\left(\frac{W}{L}\right)_{1,2} = \frac{2 \cdot I_{D1}}{KP \cdot U_{OV1}^2} = \frac{2 \cdot 4,75\mu}{50\mu \cdot 0,04} = 4,75 \rightarrow L = 2 \mu m \rightarrow W = 9,5 \mu m$$

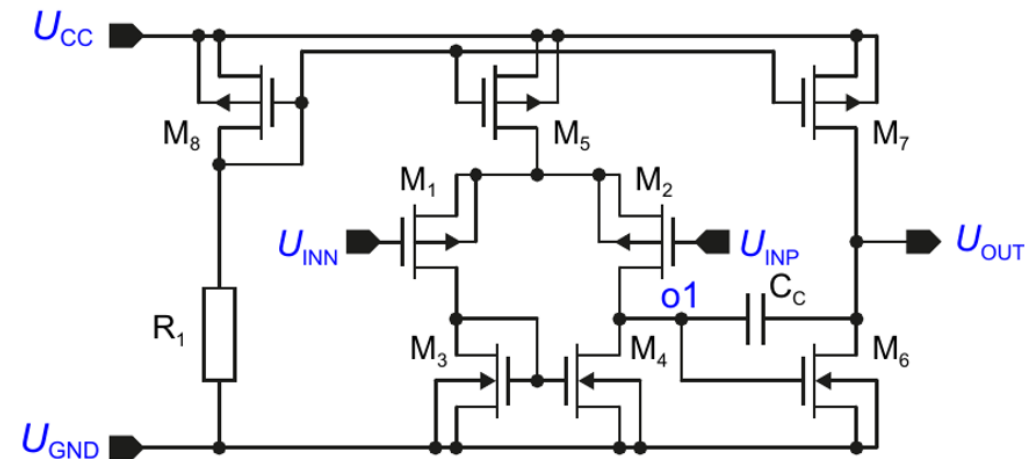
$$\left(\frac{W}{L}\right)_{3,4} = \frac{2 \cdot I_{D3}}{KP \cdot U_{OV3}^2} = \frac{2 \cdot 4,75\mu}{200\mu \cdot 0,04} = 1,2 \rightarrow L = 2 \mu m \rightarrow W = 2,4 \mu m$$

$$\left(\frac{W}{L}\right)_5 = \frac{2 \cdot I_{D5}}{KP \cdot U_{OV5}^2} = \frac{2 \cdot 9,5\mu}{50\mu \cdot 0,04} = 9,5 \rightarrow L = 2 \mu m \rightarrow W = 19 \mu m$$

Vstup proudového zrcadla – nízký proud, volba poloviny $I_{1ST} = I_5$.

$$\left(\frac{W}{L}\right)_8 = \frac{I_8}{I_5} \cdot \left(\frac{W}{L}\right)_5 = \frac{4,75}{9,5} \cdot 19\mu = 9,5 \mu m$$

$$R_1 = \frac{U_{CC} - U_{GS8}}{I_{R1}} = \frac{1,8 - (0,4 + 0,2)}{4,75\mu} = 252,6 \text{ k}\Omega$$



Dvoustupňový zesilovač - příklad

Pro dosažení fázové rezervy 60° musí platit (U_{OV6} musí být stejný jako $U_{OV3,4}$, tj. $0,2\text{ V}$ – viz. podmínka pro minimální offset)

$$g_{m6} = 10 \cdot g_{m1} = 10 \cdot 47,5\mu = 475\mu\text{S}$$

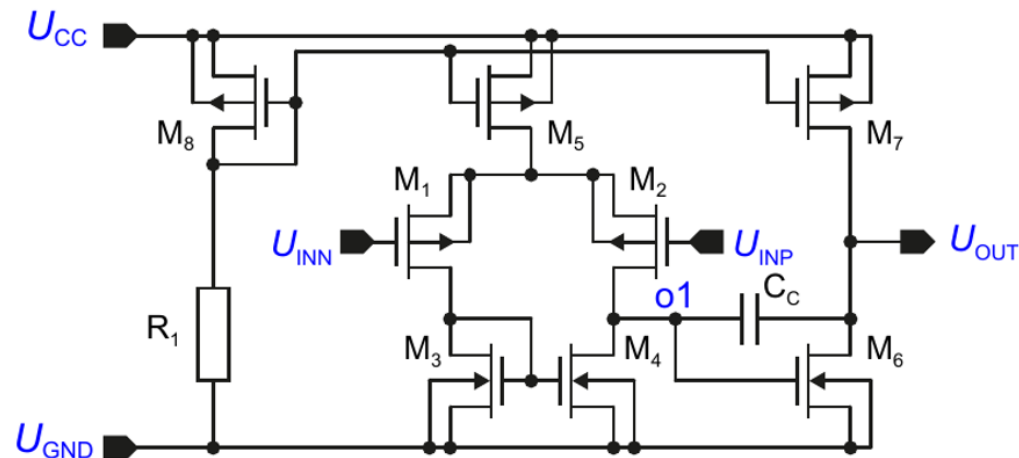
$$g_{m6} = \frac{2 \cdot I_{D6}}{U_{OV6}} \Rightarrow I_{D6} = \frac{g_{m6} \cdot U_{OV6}}{2} = \frac{475\mu \cdot 0,2}{2} = 47,5\mu\text{A}$$

$$W_6 = \frac{I_6}{I_{3,4}} \cdot W_{3,4} = 10 \cdot 2,4\mu = 24\mu\text{m}$$

Nyní lze jednoduše dopočítat M_7 , který bude $(W/L)_7 = 95/2$.

Spotřeba obvodu

$$P = U_{CC} \cdot I_{CC} = 1,8 \cdot (I_8 + I_5 + I_7) = (4,75\mu + 9,5\mu + 47,5\mu) = 111,15\mu\text{W}$$



Dvoustupňový zesilovač - příklad

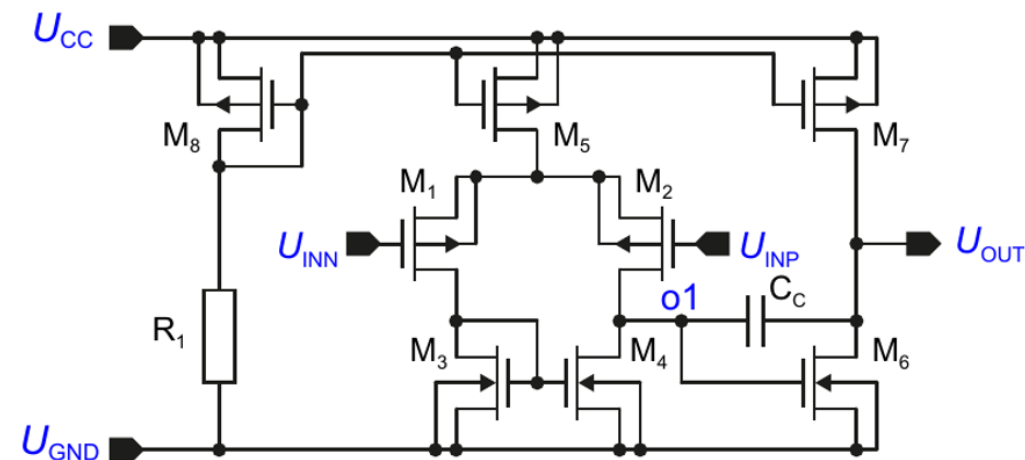
Pro zesílení je nejdříve nutné dopočítat r_{DS} . Dále tento výpočet nebude rozepisován. Je obdobný, jako u předchozích úloh. Pro $L = 2 \mu\text{m}$ jsou $\lambda_N = 0,044 \text{ V}^{-1}$ a $\lambda_P = 0,08 \text{ V}^{-1}$.

$$r_{DS1,2} = 2,6 \text{ M}\Omega$$

$$r_{DS3,4} = 4,8 \text{ M}\Omega$$

$$r_{DS6} = 480 \text{ k}\Omega$$

$$r_{DS7} = 260 \text{ M}\Omega$$



$$A_{U0} = A_1 \cdot A_2 = g_{m1} \cdot R_{o1} \cdot g_{m6} \cdot R_{o2} = 47,5\mu \cdot \frac{2,6\text{M} \cdot 4,8\text{M}}{2,6\text{M} + 4,8\text{M}} \cdot 475\mu \cdot \frac{260\text{k} \cdot 480\text{k}}{260\text{k} + 480\text{k}} = 80,1 \cdot 80,1 = 6417,3$$

$$A_{U0} = 20 \cdot \log(6417,3) = 76,15 \text{ dB}$$

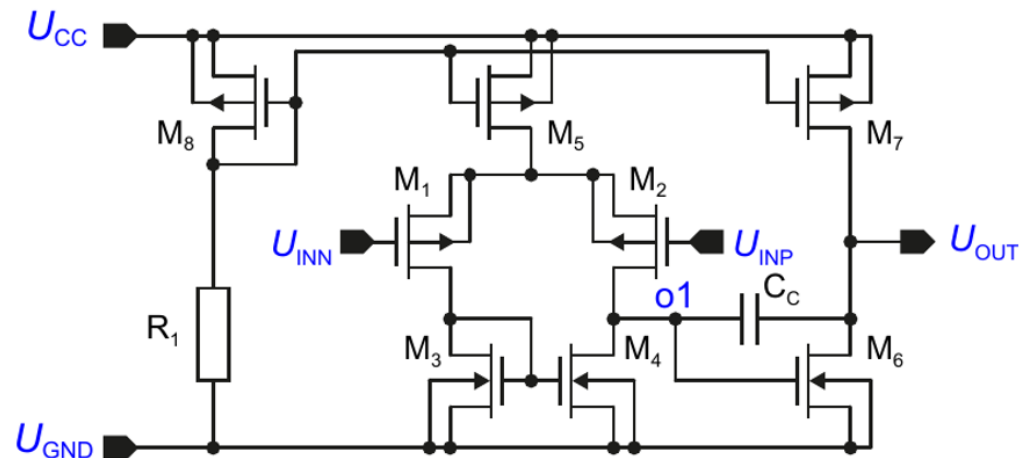
Dvoustupňový zesilovač - příklad

Vstupní a výstupní rozsah vycházejí z oblastí saturace tranzistorů.
Pro daný rozsah, musejí být všechny tranzistory v saturaci.

$$U_{O(min)} = U_{OV6} = 0,2 \text{ V}$$

$$U_{O(max)} = U_{CC} - U_{OV7} = 1,8 - 0,2 = 1,6 \text{ V}$$

Výstupní rozsah je tedy (0,2 – 1,6) V.



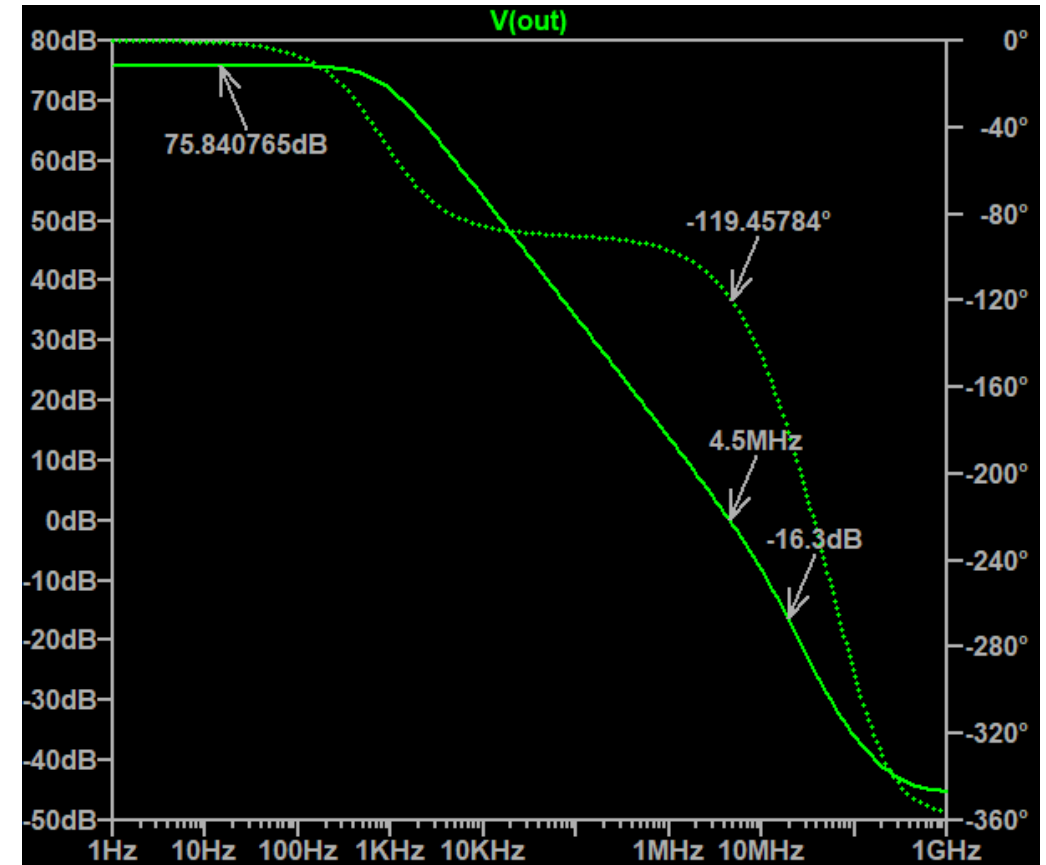
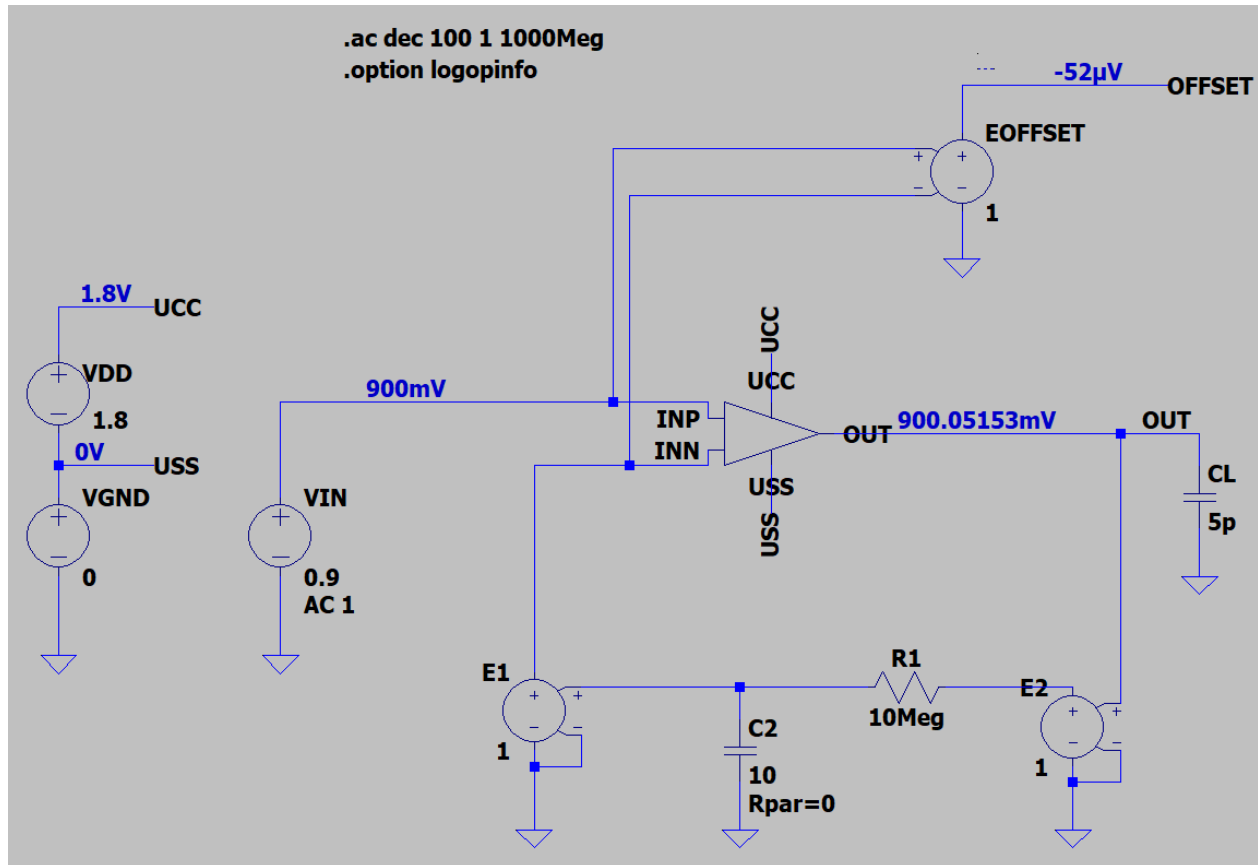
$$U_{I(min)} = U_{GS6} + U_{OV1} - U_{GS1} = 0,6 + 0,2 - 0,6 = 0,2 \text{ V}$$

$$U_{I(max)} = U_{CC} - U_{GS1} - U_{OV5} = 1,8 - (0,4 + 0,2) - 0,2 \text{ V} = 1 \text{ V}$$

Vstupní rozsah je tedy (0,2 – 1) V.

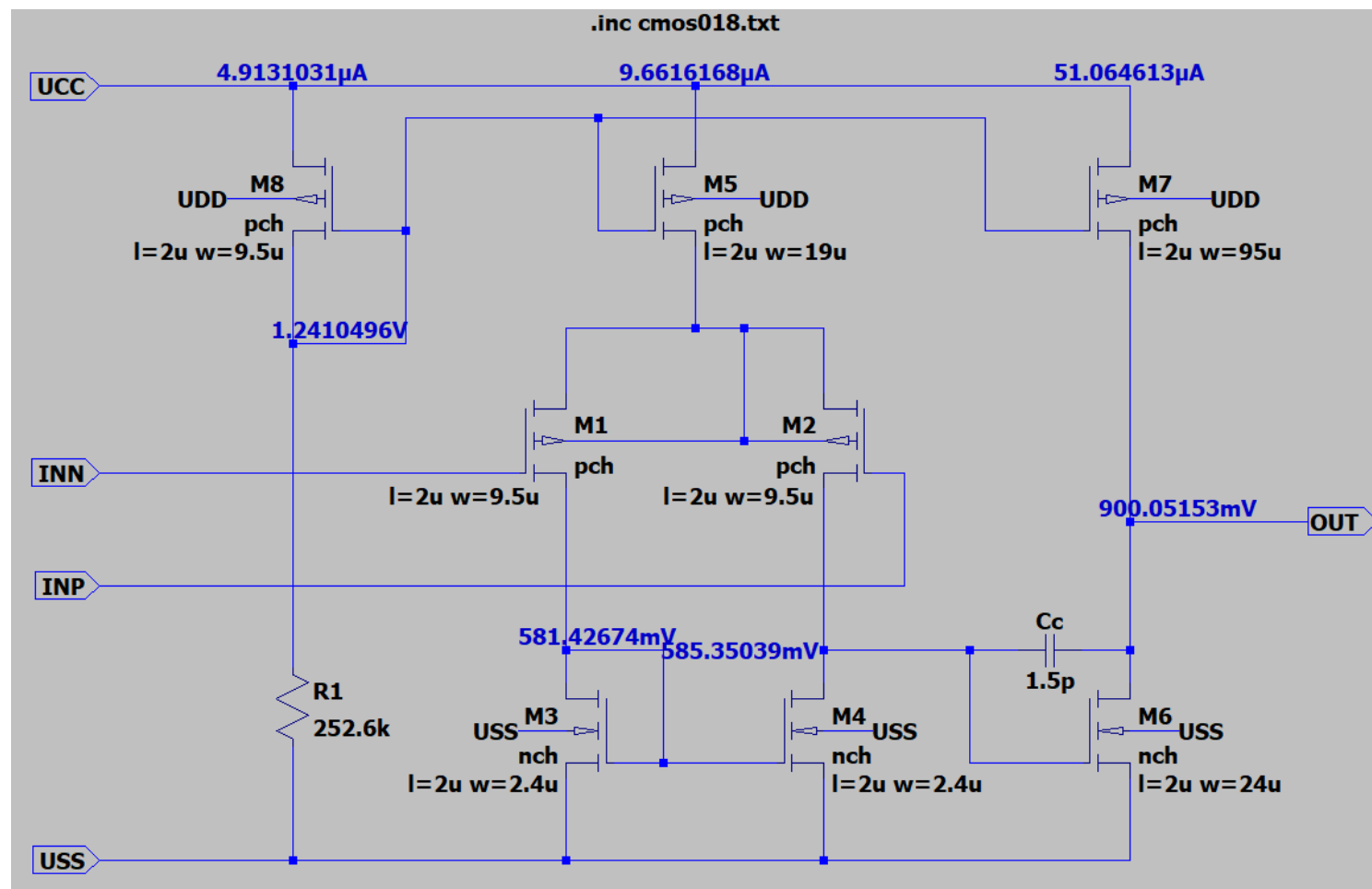
Dvoustupňový zesilovač – Analýza AC

Ověření parametrů z analýzy AC



Dvoustupňový zesilovač – Analýza AC

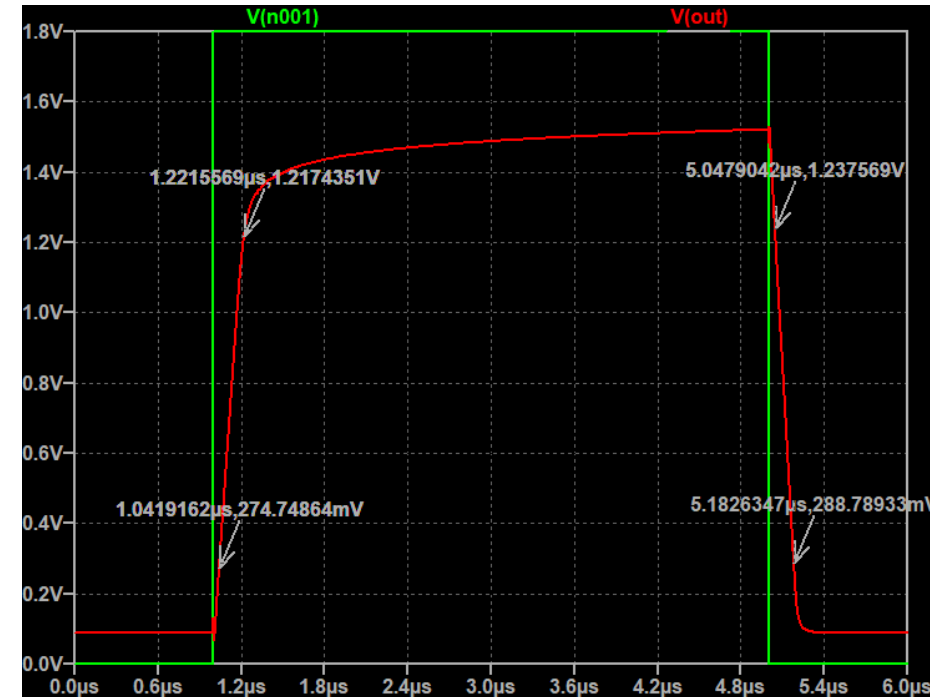
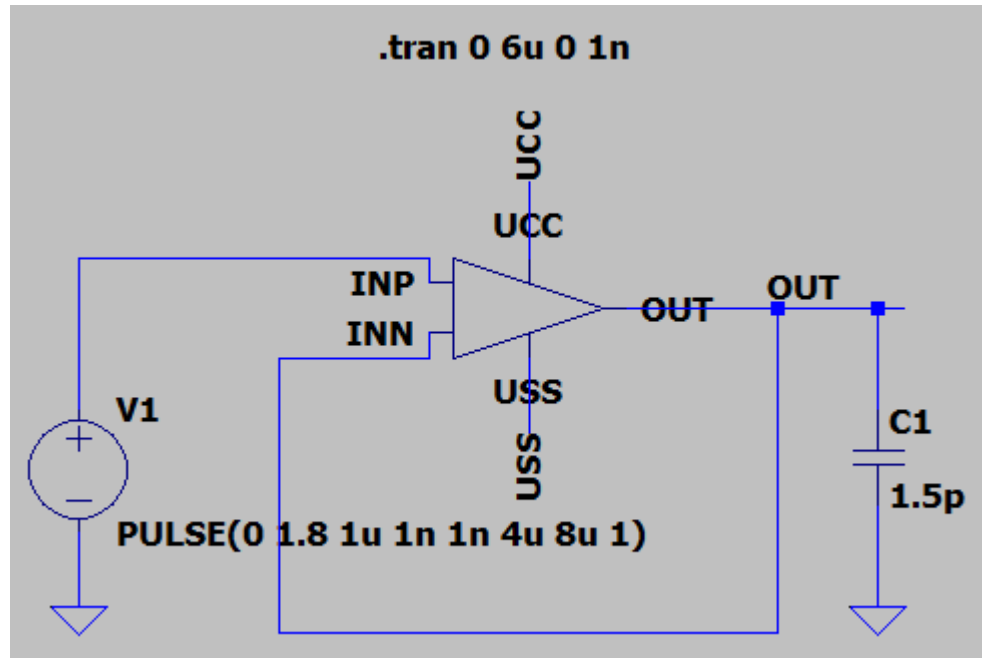
Ověření parametrů z analýzy AC – proudy a napětí v pracovním bodě



Name:	x1:M3	x1:M4	x1:M6	x1:M1	x1:M2
Model:	nch	nch	nch	pch	pch
Id:	4.83e-06	4.83e-06	5.11e-05	4.83e-06	4.83e-06
Vgs:	5.81e-01	5.81e-01	5.85e-01	3.19e-01	3.15e-01
Vds:	5.81e-01	5.85e-01	9.00e-01	9.08e-01	9.04e-01
Vbs:	0.00e+00	0.00e+00	0.00e+00	9.08e-01	9.04e-01
Vth:	3.82e-01	3.82e-01	3.82e-01	-4.03e-01	-4.03e-01
Vdsat:	1.54e-01	1.54e-01	1.58e-01	-1.57e-01	-1.57e-01
Gm:	5.04e-05	5.04e-05	5.20e-04	4.84e-05	4.84e-05
Gds:	2.46e-07	2.45e-07	2.32e-06	3.90e-07	3.90e-07
Gmb:	3.97e-05	3.99e-05	5.57e-04	1.52e-05	1.52e-05
Cbd:	0.00e+00	0.00e+00	0.00e+00	0.00e+00	0.00e+00
Cbs:	0.00e+00	0.00e+00	0.00e+00	0.00e+00	0.00e+00
Cgsov:	1.68e-15	1.68e-15	1.69e-14	6.51e-15	6.51e-15
Cgdov:	1.67e-15	1.67e-15	1.67e-14	6.54e-15	6.54e-15
Cgbov:	1.98e-18	1.98e-18	1.98e-18	1.96e-18	1.96e-18
dQgdVgb:	3.60e-14	3.60e-14	3.61e-13	1.40e-13	1.40e-13
dQgdVdb:	-1.62e-15	-1.62e-15	-1.61e-14	-6.28e-15	-6.28e-15
dQgdVsb:	-4.42e-14	-4.43e-14	-5.11e-13	-1.28e-13	-1.28e-13
dQddVgb:	-1.49e-14	-1.49e-14	-1.50e-13	-5.85e-14	-5.85e-14
dQddVdb:	1.64e-15	1.64e-15	1.64e-14	6.39e-15	6.39e-15
dQddVsb:	2.43e-14	2.44e-14	2.83e-13	6.88e-14	6.88e-14
dQbdVgb:	-6.18e-15	-6.18e-15	-6.23e-14	-2.31e-14	-2.31e-14
dQbdVdb:	-4.47e-18	-4.15e-18	6.47e-17	2.87e-17	2.86e-17
dQbdVsb:	-6.17e-15	-6.19e-15	-7.21e-14	-1.65e-14	-1.65e-14

Name:	x1:M7	x1:M5	x1:M8
Model:	pch	pch	pch
Id:	5.11e-05	9.66e-06	4.91e-06
Vgs:	3.41e-01	-2.48e-01	0.00e+00
Vds:	9.00e-01	3.11e-01	5.59e-01
Vbs:	7.83e-01	1.93e-01	4.42e-01
Vth:	-3.67e-01	-3.69e-01	-3.69e-01
Vdsat:	-1.59e-01	-1.57e-01	-1.56e-01
Gm:	5.03e-04	9.62e-05	4.88e-05
Gds:	4.04e-06	1.13e-06	4.07e-07
Gmb:	1.41e-04	2.69e-05	1.36e-05
Cbd:	0.00e+00	0.00e+00	0.00e+00
Cbs:	0.00e+00	0.00e+00	0.00e+00
Cgsov:	6.51e-14	1.30e-14	6.51e-15
Cgdov:	6.54e-14	1.31e-14	6.54e-15
Cgbov:	1.96e-18	1.96e-18	1.96e-18
dQgdVgb:	1.40e-12	2.82e-13	1.41e-13
dQgdVdb:	-6.30e-14	-1.38e-14	-6.35e-15
dQgdVsb:	-1.31e-12	-2.63e-13	-1.31e-13
dQddVgb:	-5.85e-13	-1.18e-13	-5.86e-14
dQddVdb:	6.40e-14	1.38e-14	6.45e-15
dQddVsb:	6.72e-13	1.35e-13	6.70e-14
dQbdVgb:	-2.35e-13	-4.63e-14	-2.37e-14
dQbdVdb:	2.99e-16	-8.45e-16	-1.82e-17
dQbdVsb:	-9.60e-14	-1.92e-14	-9.23e-15

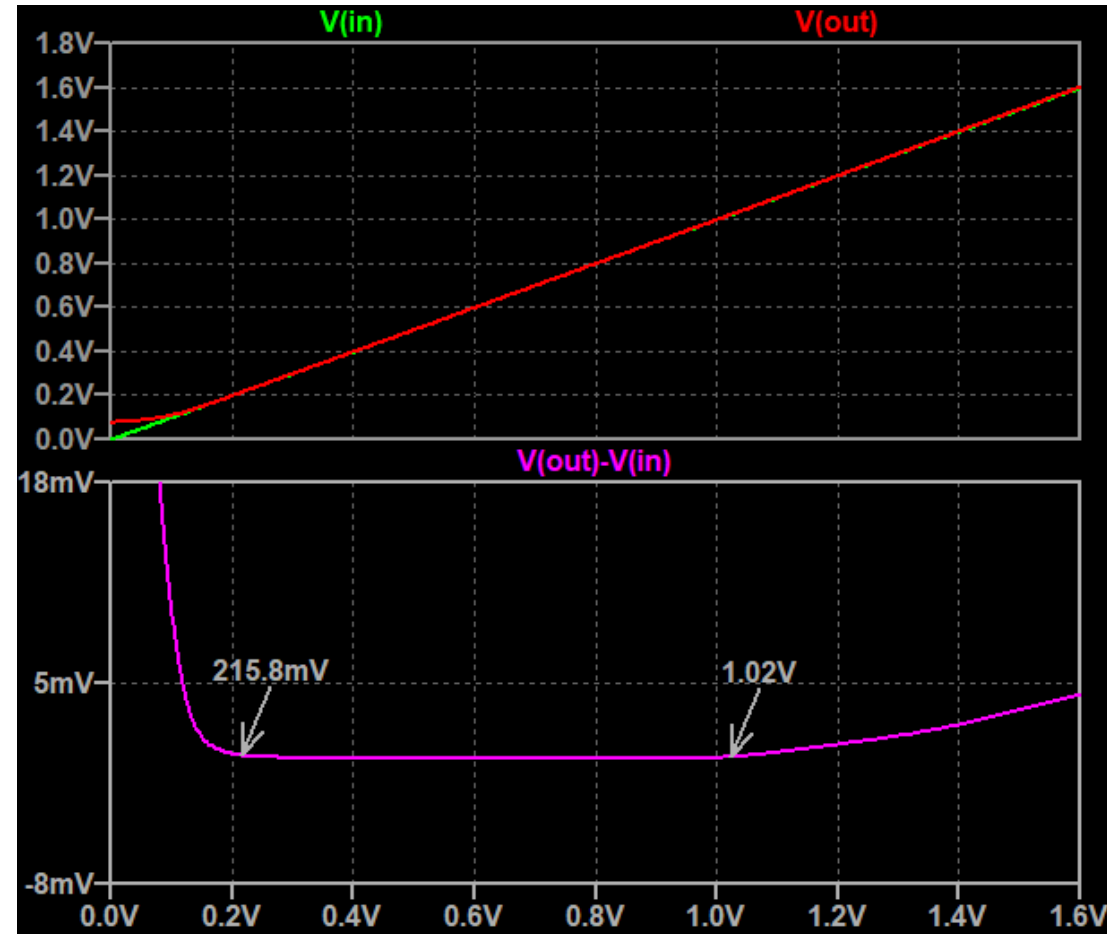
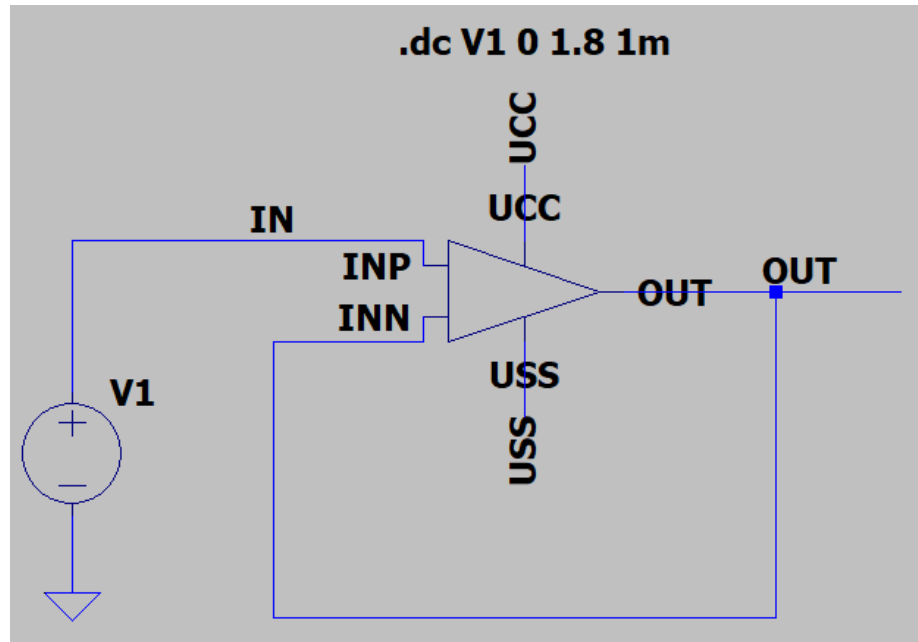
Dvoustupňový zesilovač – Rychlost přeběhu



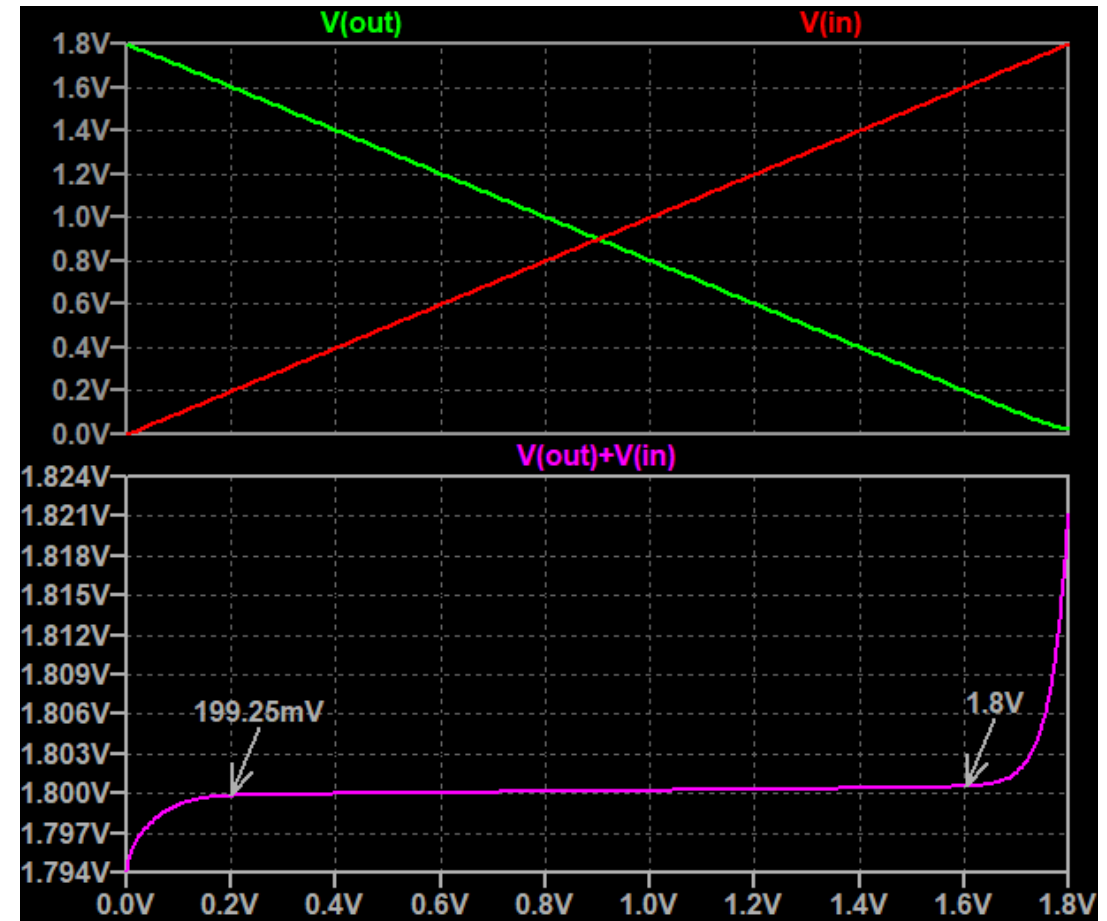
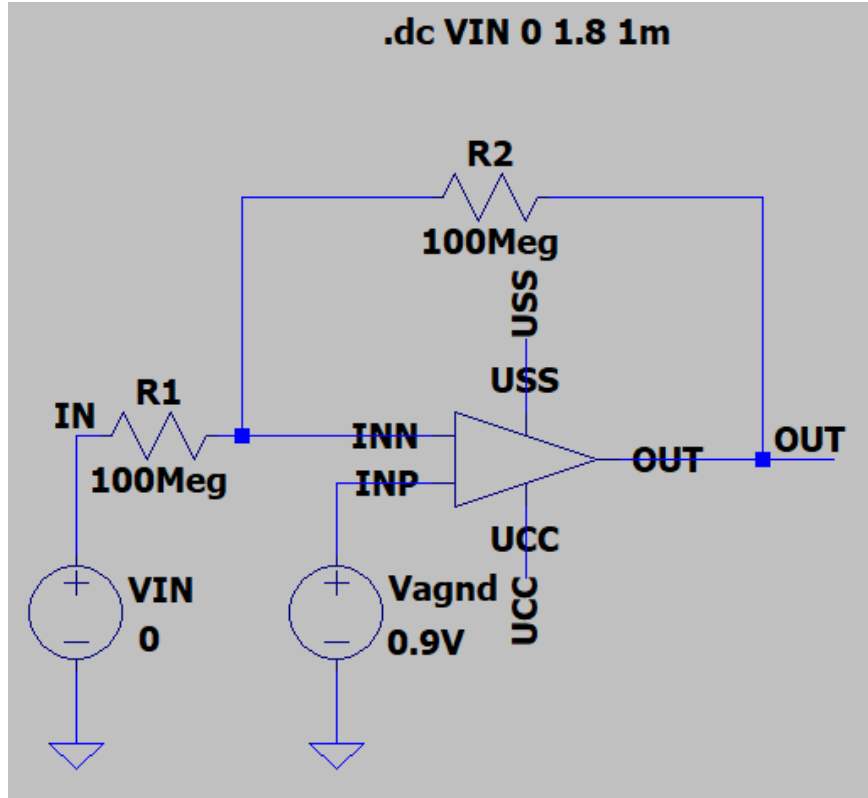
$$SR_{n\acute{a}st} = 5,2 \text{ V}/\mu\text{s}$$

$$SR_{sest} = 7 \text{ V}/\mu\text{s}$$

Dvoustupňový zesilovač – Vstupní napěťový rozsah



Dvoustupňový zesilovač – Výstupní napěťový rozsah



parametr	hodnota	Vypočítané	Simulace
zesílení (A_{U0})	≥ 60 dB	76,15 dB	75,8 dB
šířka pásma (GBW)	≥ 5 MHz	5 MHz	4,5 MHz
fázová rezerva (PM)	$\geq 60^\circ$	60°	$60,5^\circ$
amplitudová rezerva (AM)	- dB	Nepočítá se	-16,3 dB
rychlost přeběhu (SR)*	≥ 5 V/ μ s	6,3 V/ μ s	5,2/7 V/ μ s
systematický offset (U_{OFF})	≤ 500 μ V	0	-52 μ V
spotřeba (P_{diss})	- mW	111,15 μ W	118 μ W
vstupní napěťový rozsah ($ICMR$)	- V	0,2 – 1	(0,22 – 1) V
výstupní napěťový rozsah (OVS)	- V	0,2 – 1,6	(0,199-1,8) V