

OTE Domáci úkol 2 - Zesilovače

Vojtěch Michal

1. dubna 2022

V simulacích pro tuto úlohu bylo použito nastavení parametrů operačního zesilovače uvedené v tabulce 1. Symbolem u_2 označuji napětí na výstupu operačního zesilovače proti zemi.

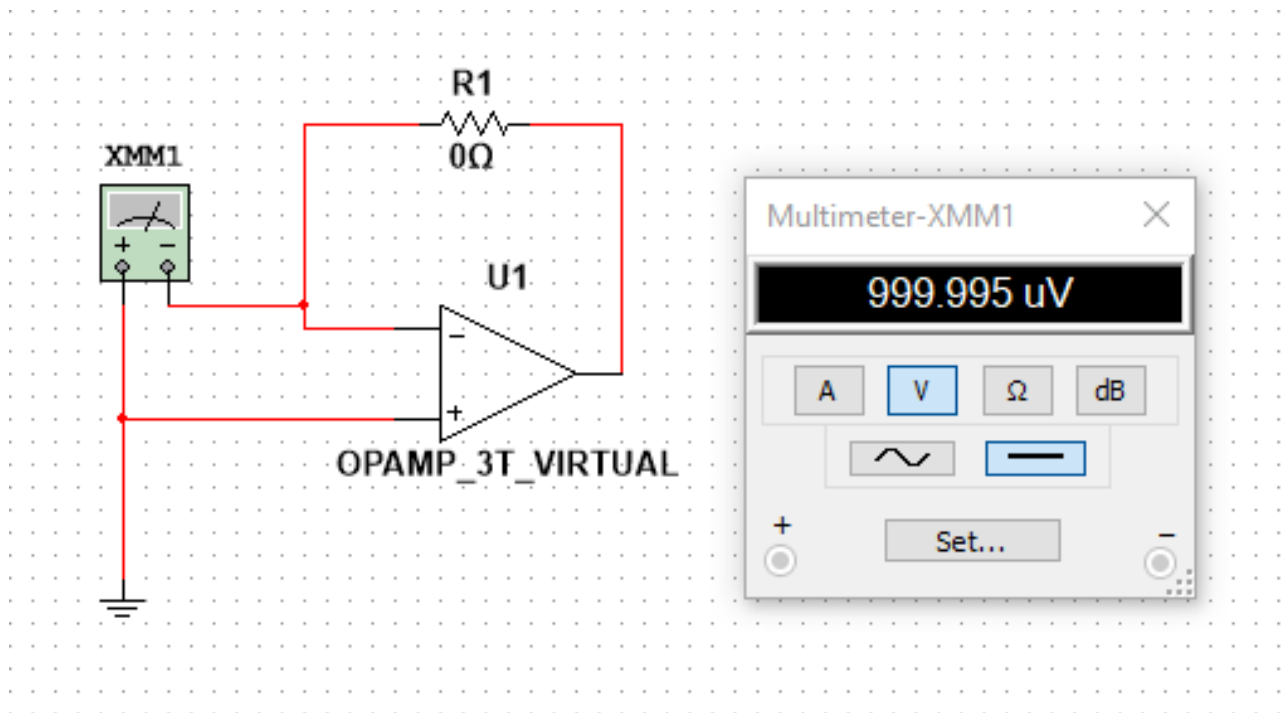
parametr	symbol	hodnota	jednotka	poznámka
Vstupní napěťový offset	U_0	1	mV	
Vstupní klidový proud	I_B	50	nA	$(I_{BP} + I_{BN})/2$
Vstupní zbytkový proud	I_0	20	nA	$I_{BP} - I_{BN}$
Zesílení v otevřené smyčce	A_D	200	kV V^{-1}	
Tranzitní kmitočet	f_T	1	MHz	

Tabulka 1: Parametry operačního zesilovače použité pro simulaci

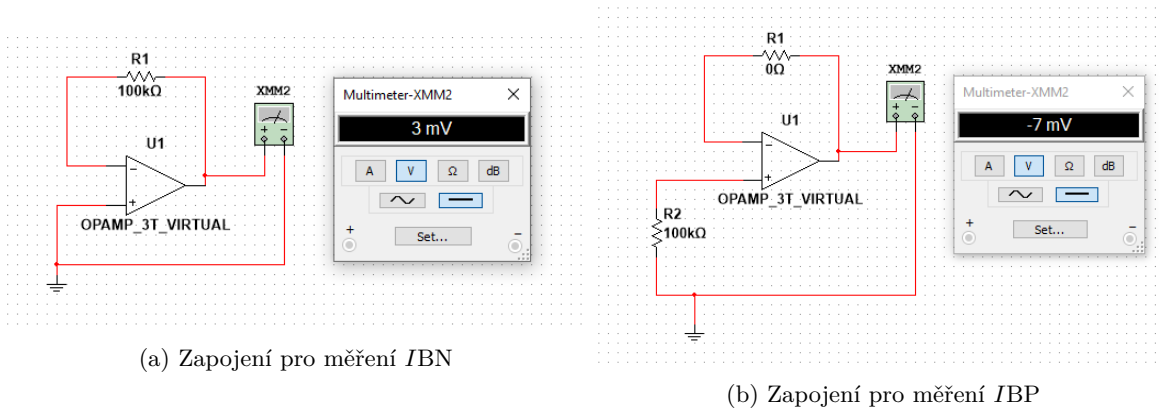
1 Napěťový sledovač

Multimetrem byly změřeny hodnoty statických parametrů operačního zesilovače. Zapojením sledovače napětí a připojením neinvertujícího vstupu na zem podle schématu 1 bylo změřeno zbytkové napětí

$$U_0 = 999.995 \mu\text{V} \approx 1\text{mV}. \quad (1)$$



Obrázek 1: Zapojení pro změření zbytkového napětí OZ



Obrázek 2: Měření vstupních proudů svorek OZ

Zapojením rezistoru $R_1 = 100\text{k}\Omega$ do záporné zpětné vazby dle schématu 2a byl změřen vstupní proud invertující svorky

$$I_{BN} = \frac{u_2 - U_0}{R_1} = \frac{3\text{mV} - (-1\text{mV})}{100\text{k}\Omega} = 4 \cdot 10^{-5-3}\text{A} = 40\text{nA}. \quad (2)$$

Zapojením rezistoru $R_2 = 100\text{k}\Omega$ mezi neinvertující vstup a zem dle schématu 2b byl změřen vstupní proud neinvertující svorky

$$I_{BP} = -\frac{u_2 + U_0}{R_2} = -\frac{-7\text{mV} + 1\text{mV}}{100\text{k}\Omega} = 6 \cdot 10^{-5-3}\text{A} = 60\text{nA}. \quad (3)$$

Odtud lze vypočíst velikosti vstupního zbytkového proudu

$$I_0 = I_{BP} - I_{BN} = 20\text{nA} \quad (4)$$

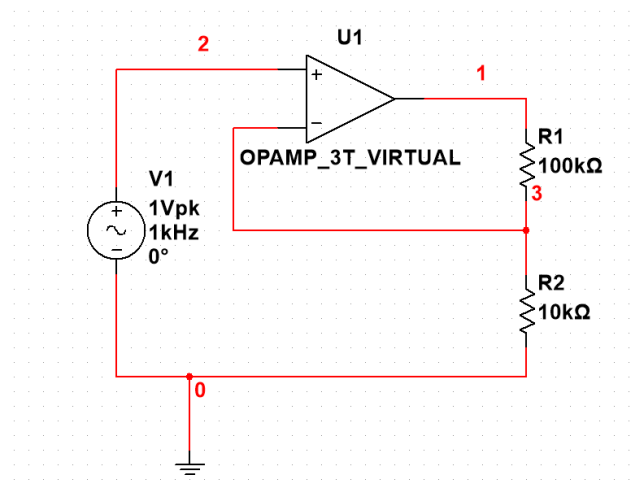
a vstupního klidového proudu

$$I_B = \frac{I_{BP} + I_{BN}}{2} = 50\text{nA}, \quad (5)$$

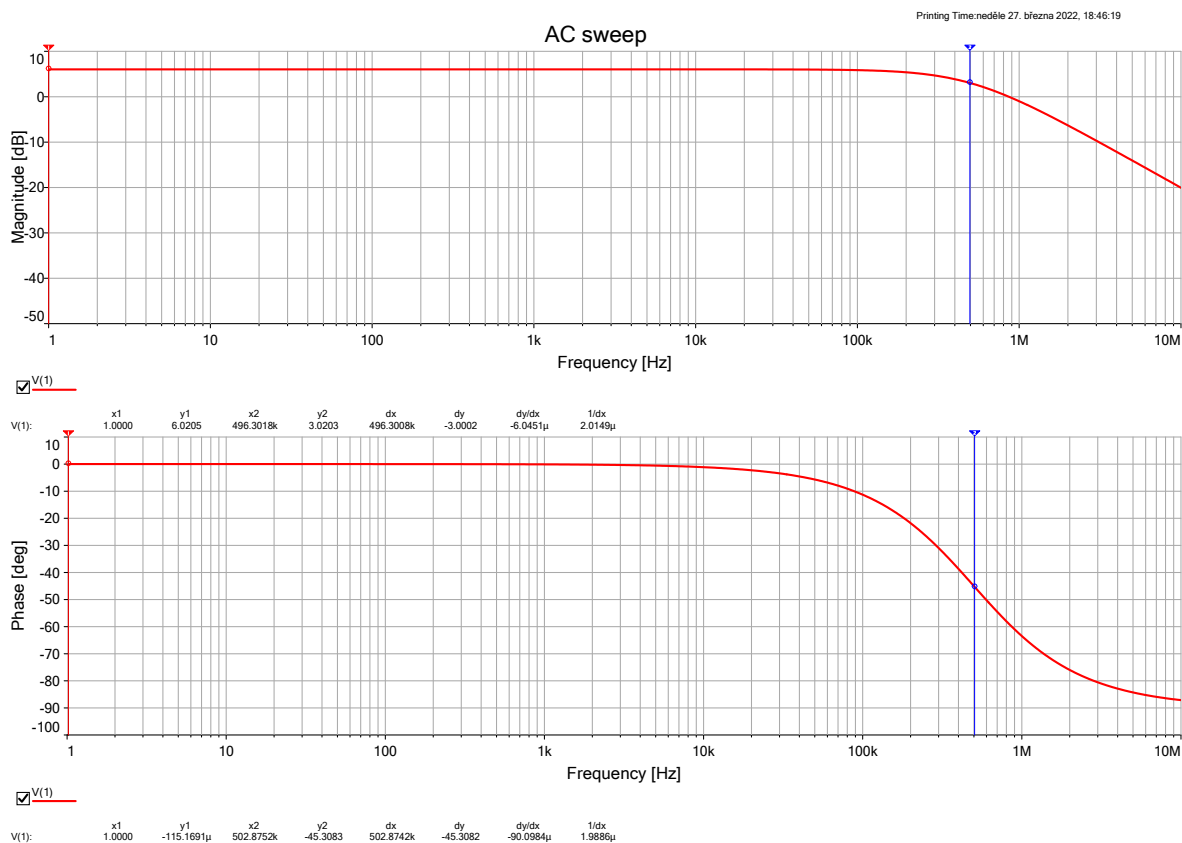
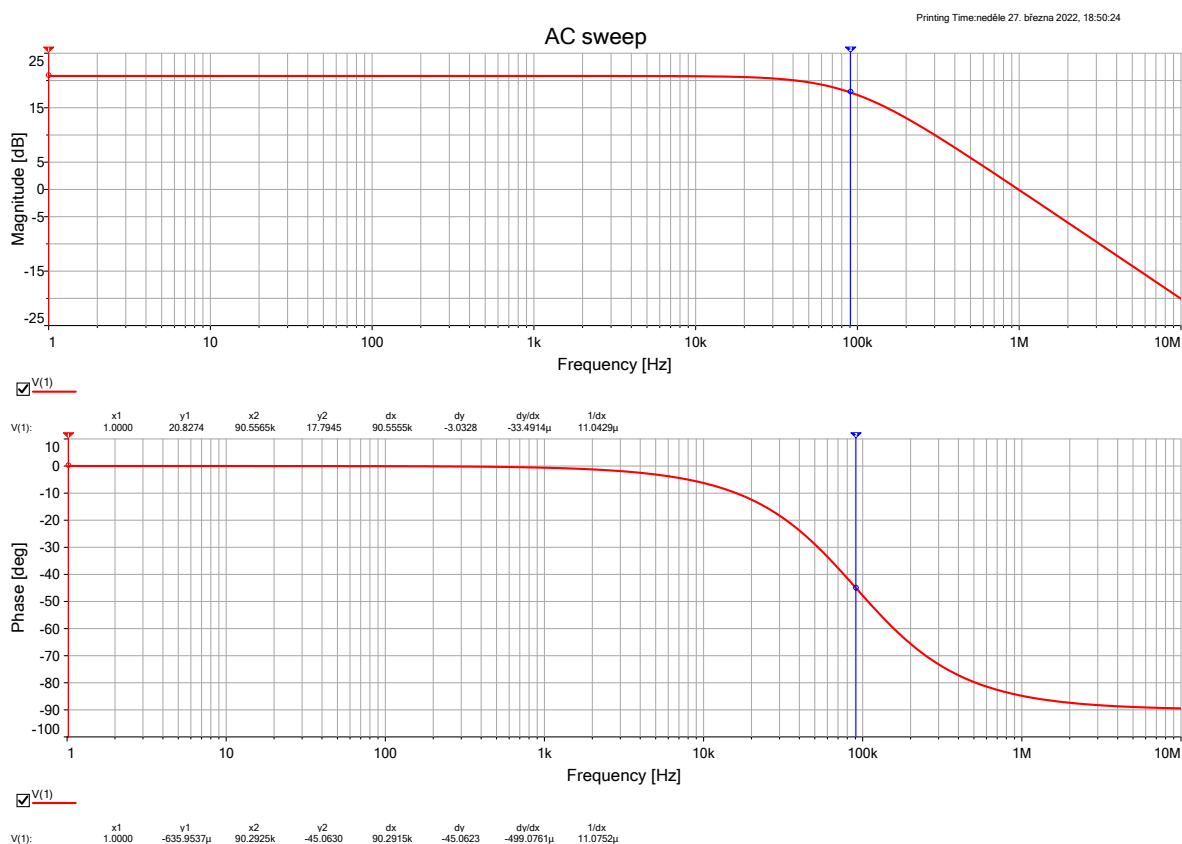
které přesně odpovídají parametrům nastaveným dle tabulky 1.

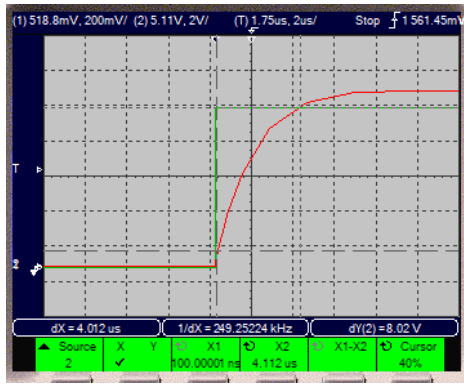
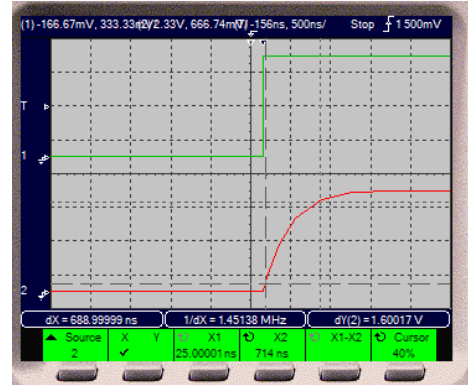
2 Neinvertující zesilovač

Zadaných zesílení 2 a 11 lze s neinvertujícím zesilovačem dosáhnout fixováním $R_2 = 10\text{k}\Omega$ a použitím $R_1 \in \{10, 100\}\text{k}\Omega$ dle schématu 3.

Obrázek 3: Neinvertující zesilovač, zde $G = 11$

Na obrázcích 4 a 5 jsou frekvenční charakteristiky pro obě zadaná zesílení. Pro $G = 2$ je $f_m \approx 500\text{kHz}$, pro $G = 11$ je $f_m \approx 90\text{kHz}$. Pro simulaci byl použit tranzitní kmitočet $f_T = 1\text{MHz}$, obě konfigurace proto splňují rovnost $G \cdot f_m = f_T$, takzvaný *gain-bandwidth product*.

Obrázek 4: Frekvenční charakteristika neinvertujícího zesilovače pro $G = 2$ Obrázek 5: Frekvenční charakteristika neinvertujícího zesilovače pro $G = 11$

(a) Pro $G = 11$ (b) Pro $G = 2$ Obrázek 6: Měření doby náběhu T_n neinvertujícího zapojení

Nahrazením harmonického buzení za obdélníkové *clock voltage* je možné změřit dobu náběhu. Na uvedených obrázcích přísluší zelený průběh vstupnímu obdélníkovému signálu, zatímco červený průběh je napětí na výstupu zesilovače. S použitím amplitudy vstupního signálu $U_1 = 909\text{mV}$ a zesílením $G = 11$ je ustálené napětí rovno 10 V , pro což lze snadno dopočítat úroveň 10 a 90% . Na obrázku 6a je vidět doba náběhu mezi kurzory $T_n = 4,012\mu\text{s}$.

S použitím přibližného vztahu a změřené mezní frekvence f_m pro $G = 11$ je očekávaná doba náběhu

$$T_n = \frac{0,35}{90 \cdot 10^3} = 3,88\mu\text{s}, \quad (6)$$

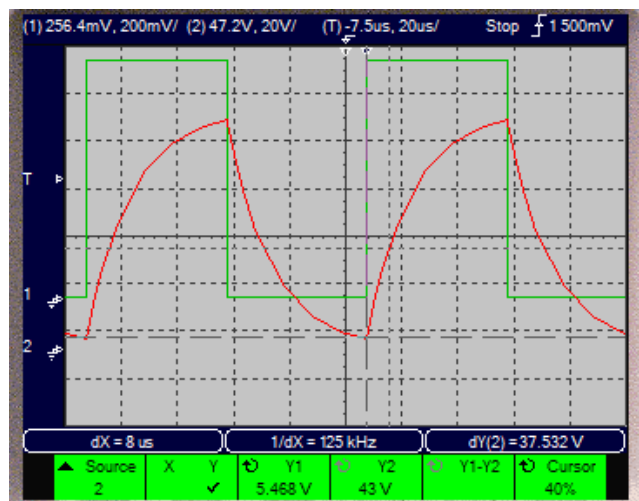
což řádově odpovídá skutečné hodnotě změřené pomocí osciloskopu. Skutečná doba náběhu je trochu delší než teoretická, jedním z důvodů je omezení derivace napětí na počátku konečnou rychlostí přeběhu (*slew rate SR*).

Stejné měření lze provést pro zesílení $G = 2$, tedy $R_1 = R_2 = 10\text{k}\Omega$. Na obrázku 6b je zachycen průběh odezvy na skok, ze kterého lze vyčíst doba náběhu $T_n \approx 690\text{ns}$, což odpovídá očekávané analyticky vypočtené hodnotě

$$T_n \approx \frac{0,35}{500\text{kHz}} = 700\text{ns}. \quad (7)$$

Velikost rychlosti přeběhu se nepodařilo spolehlivě změřit s pomocí mezního výkonového kmitočtu, protože deformace harmonického průběhu nebyla nikdy příliš patrná. Na časovém průběhu napětí na výstupu OZ nebyl nikdy patrný bod, kde přeběh přechází z lineárního na exponenciální. Proto byl proveden jen hrubý odhad z počátku odezvy na jednotkový skok (s pomocí *clock voltage*). Na základě průběhu zobrazeného na obrázku 7 lze odhadnout

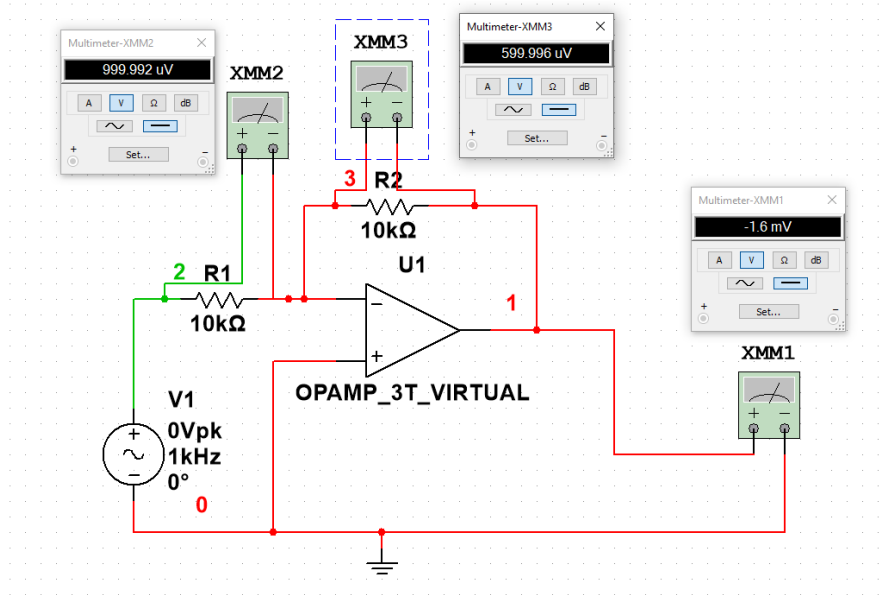
$$SR = \frac{37,5\text{V}}{8\mu\text{s}} \approx 4,7\text{V}\mu\text{s}^{-1}. \quad (8)$$

Obrázek 7: Měření rychlosti přeběhu SR zesilovače s $G = 11$

3 Invertující zesilovač

Byl zapojen invertující zesilovač podle schématu 8. Připojením vstupu na zem se projeví reálné vlastnosti operačního zesilovače:

- Napětí na invertující svorce je $u_- = -1\text{mV}$, což odpovídá očekávanému zbytkovému napětí použitého OZ.
- Vlivem rozdílu napětí teče přes rezistor R_1 proud $I_1 = 100\text{nA}$, z toho se $I_{BN} = 40\text{nA}$ ztrácí do invertující svorky OZ a zbylých 60nA teče přes R_2 do výstupu OZ. Proto je výstupní napětí $u_{20} = -1,6\text{mV}$.



Obrázek 8: Zbytkové napětí invertujícího zesilovače

Invertující zapojení operačního zesilovače má mezní kmitočet

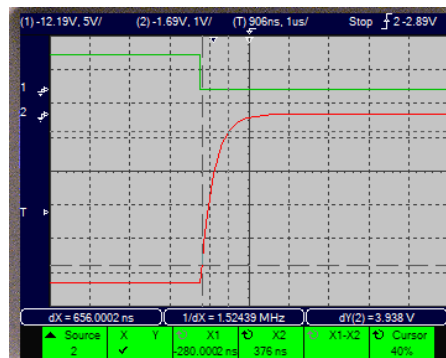
$$f_m = \frac{f_T}{1 + |G|}, \quad (9)$$

konfiguracím se zesílením $G_1 = -1$ a $G_2 = -10$ proto teoreticky přísluší mezní kmitočty $f_{m_1} = 500\text{kHz}$ a $f_{m_2} = 90\text{kHz}$. Bodeho charakteristiky vykreslené na obrázcích 10 a 11 tento teoretický předpoklad potvrzují simulací.

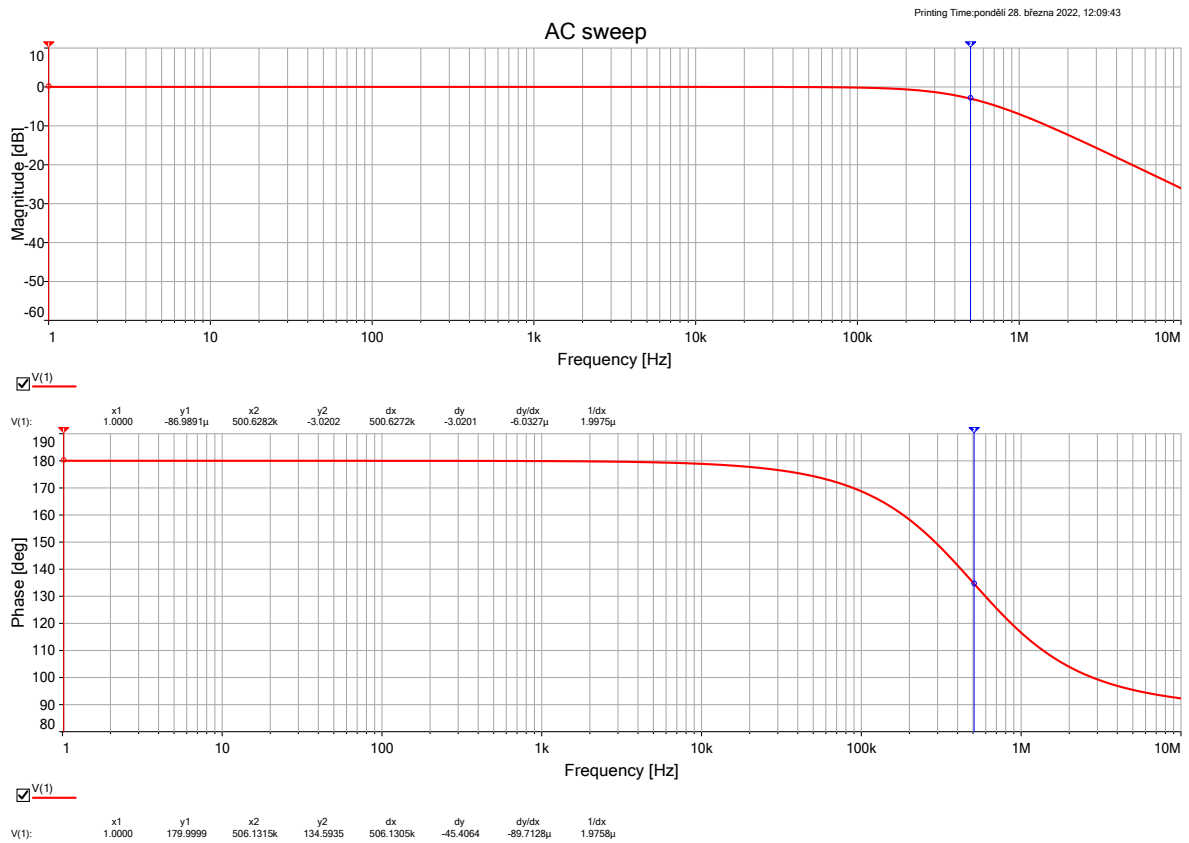
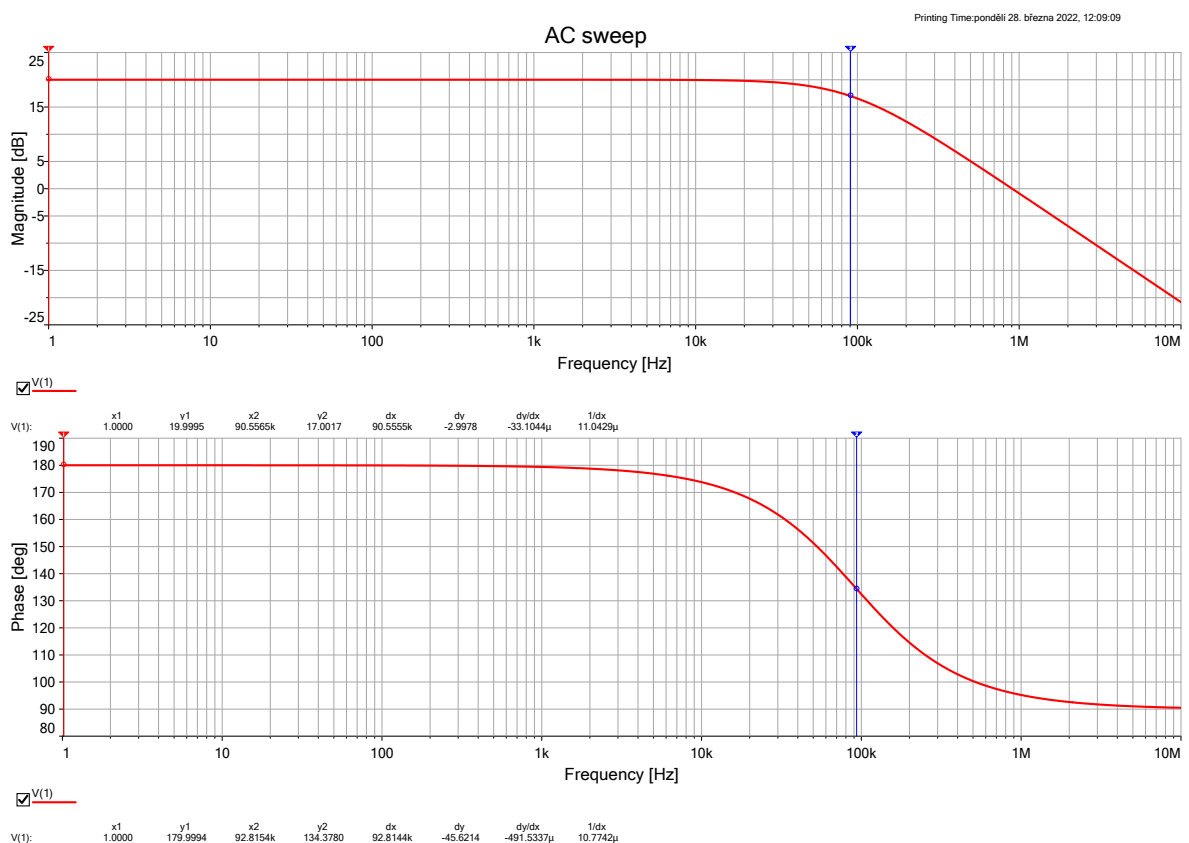
Reálná doba náběhu odpovídá, podobně jako u neinvertujícího zapojení, očekávané hodnotě

$$T_n = \frac{0,35}{f_m}. \quad (10)$$

Pro $G = -1$ je snímek časových průběhů z osciloskopu na obrázku 9, ze kterého je patrné $T_n \approx 660\text{ns}$.



Obrázek 9: Měření doby náběhu T_n zesilovače s $G = -1$

Obrázek 10: Frekvenční charakteristika invertujícího zesilovače pro $G = -1$ Obrázek 11: Frekvenční charakteristika invertujícího zesilovače pro $G = -10$