

OTE Domácí úkol 3a - Rozdílový zesilovač

Vojtěch Michal

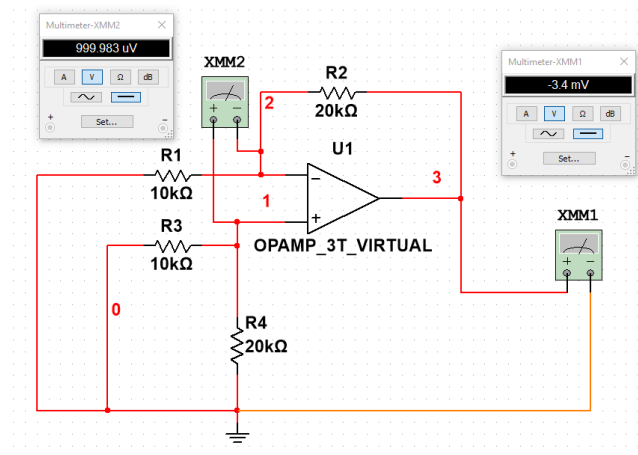
6. dubna 2022

V simulacích pro tuto úlohu bylo použito nastavení parametrů operačního zesilovače uvedené v tabulce 1. Symbolem u_3 označuji napětí na výstupu operačního zesilovače proti zemi, napětí u_2 a u_1 jsou po řadě napětí kladného a záporného vstupu rozdílového zesilovače proti zemi (konvence použitá v zadání).

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 Zbytková napětí



Obrázek 1: Zapojení pro změření zbytkového výstupního napětí rozdílového zesilovače

Multimetrem byly změřeny hodnoty zbytkových výstupních napětí uvedené v tabulce 2, použité zapojení je na obrázku 1.

jmenovité rozdílové zesílení G_D	výstupní zbytkové napětí
2	-3,4 mV
4	-5,8 mV
8	-10,6 mV
16	-20,2 mV

Tabulka 2: Naměřená výstupní zbytková napětí rozdílového zesilovače v závislosti na zesílení

1.1 Odvození vstupních zbytkových napětí

Předpokládám $u_1 = u_3 = 0\text{V}$. Kvůli klidovému proudu I_{BN} je napětí na invertující svorce OZ rovno

$$u_- = -(R_1 || R_2) I_{\text{BN}} = -\frac{R_1 R_2}{R_1 + R_2} I_{\text{BN}}. \quad (1)$$

Aby byl splněn předpoklad $u_3 = 0\text{V}$, potřebuji na neinvertující vstup dostat napětí

$$u_+ = u_- + U_0, \quad (2)$$

kde U_0 je vstupní zbytkové napětí samotného OZ dle 1. Protože dále dle Kirchhoffova zákona proudů, aplikovaného na uzel u neinvertující svorky, platí

$$\begin{aligned} \frac{u_2 - u_+}{R_3} &= I_{\text{BP}} + \frac{u_+}{R_4}, \\ u_2 &= u_+ + R_3 \left(I_{\text{BP}} + \frac{u_+}{R_4} \right), \\ u_2 &= R_3 I_{\text{BP}} + \frac{R_3 + R_4}{R_4} u_+, \end{aligned} \quad (3)$$

je vstupní zbytkové napětí rozdílového zesilovače rovno

$$u_2 = R_3 I_{\text{BP}} + \frac{R_3 + R_4}{R_4} \left(U_0 - \frac{R_1 R_2}{R_1 + R_2} I_{\text{BN}} \right). \quad (4)$$

S použitím diagonalizační podmínky $R_1 = R_3$ a $R_2 = R_4$ po úpravách platí

$$\begin{aligned} u_2 &= R_1 I_{\text{BP}} + \frac{R_1 + R_2}{R_2} \left(U_0 - \frac{R_1 R_2}{R_1 + R_2} I_{\text{BN}} \right), \\ u_2 &= R_1 I_{\text{BP}} + \frac{R_1 + R_2}{R_2} U_0 - R_1 I_{\text{BN}}. \end{aligned} \quad (5)$$

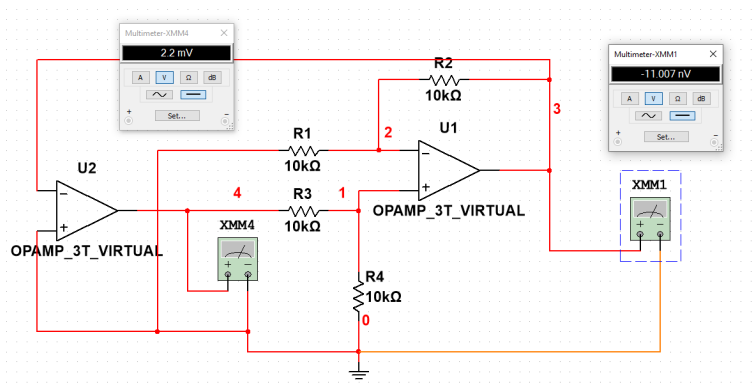
Výsledky dosazení různých hodnot odporu R_2 do rovnice (5) jsou v tabulce 3, kde jsou porovnány s hodnotami ze simulací při fixovaném $R_1 = 10\text{k}\Omega$. Výpočty byly prováděny v prostředí *MATLAB* vyhodnocením výrazu $R2 = 10e3; R1 = 10e3; IBP = 60e-9; IBN = 40e-9; U0 = 1e-3; R1 * IBP + (R1 + R2) / R2 * U0 - R1 * IBN$. Simulačně bylo vstupní zbytkové napětí získáno zapojením záporné zpětné vazby dle schématu 2 regulující výstupní napětí rozdílového zesilovače na nulu. Vypočtená napětí dokonale odpovídají výsledkům simulace.

R_2 [k Ω]	vypočtené vstupní zbytkové U	simulované vstupní zbytkové U
10	2,2 mV	2,2 mV
20	1,7 mV	1,7 mV
40	1,45 mV	1,45 mV
80	1,325 mV	1,325 mV
160	1,26 mV	1,263 mV

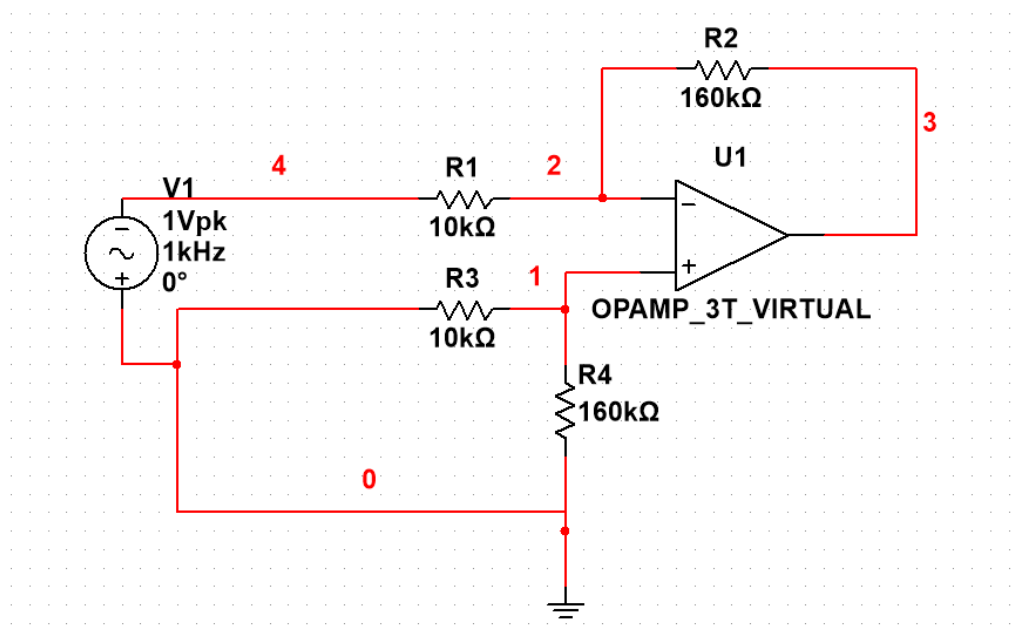
Tabulka 3: Vypočítaná a změřená vstupní zbytková napětí rozdílového zesilovače

2 Frekvenční charakteristika rozdílového zesílení G_D

S pomocí zapojení na schématu 3 a funkce *AC sweep* byly získány frekvenční charakteristiky rozdílového zesílení pro $G_D \in \{4, 16\}$, které jsou vykresleny na obrázcích 4 a 5. Mezní kmitočty pro jednotlivá rozdílová zesílení jsou zanesena v tabulce 4 a odpovídají analytickému vztahu pro *gain-bandwidth product* $f_m \cdot (G_D + 1) = f_T$.



Obrázek 2: Zpětnovazební zapojení pro zjištění vstupního zbytkového napětí rozdílového zesilovače

Obrázek 3: Zapojení pro získání frekvenční charakteristiky rozdílového zesílení G_D

rozdílové zesílení G_D	mezní kmitočet f_m [kHz]
1	500
2	330
4	200
8	112
16	58

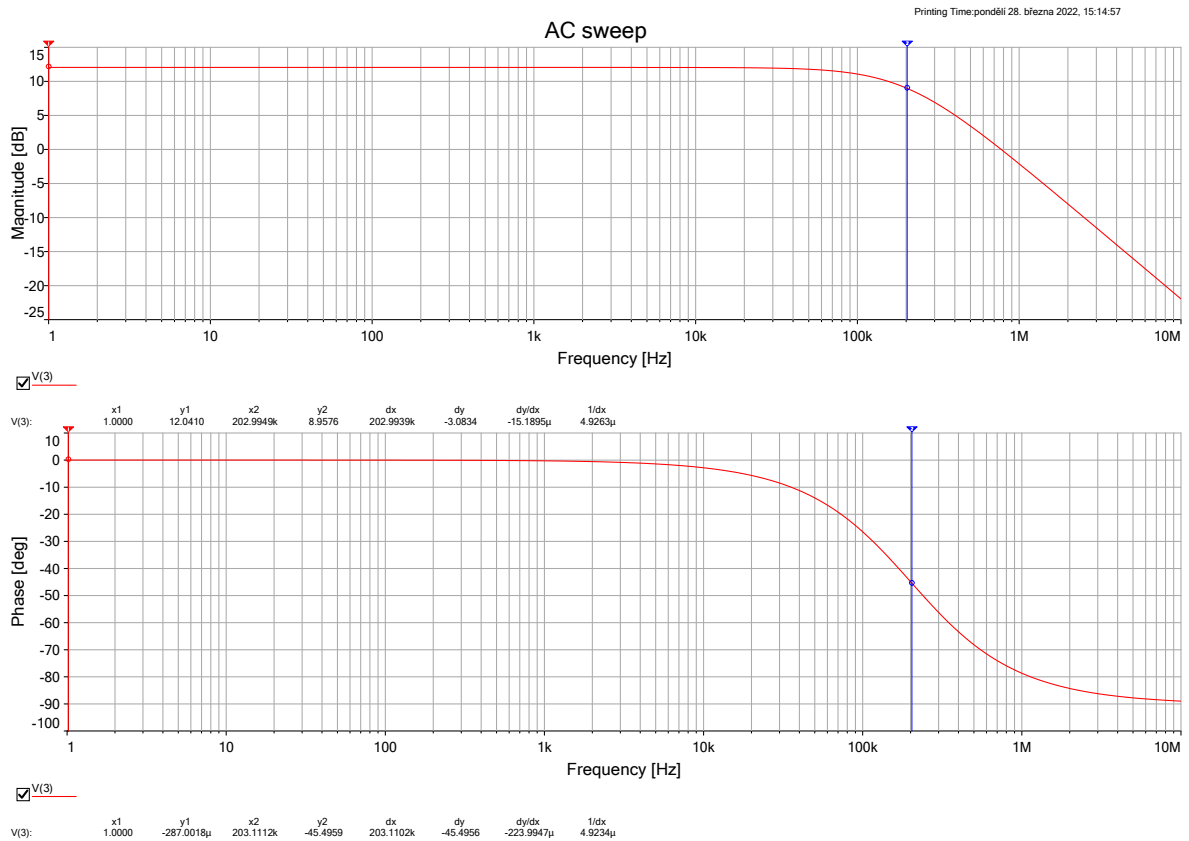
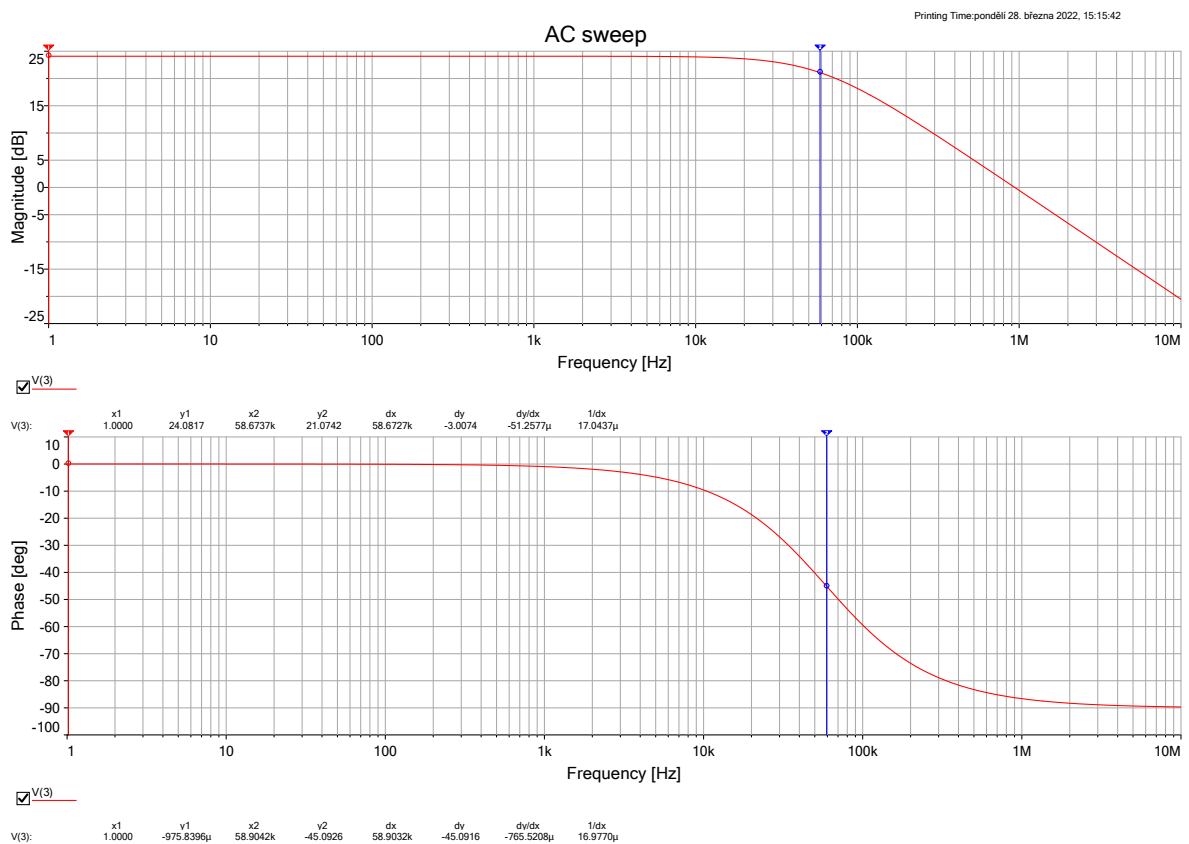
Tabulka 4: Závislost mezní frekvence na rozdílovém zesílení

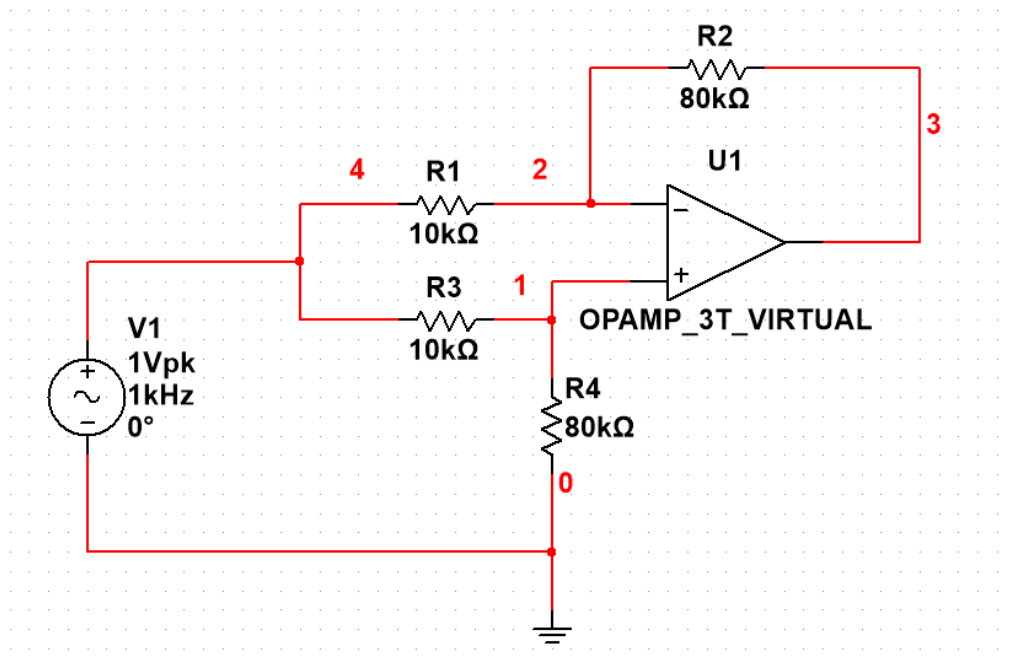
3 Frekvenční charakteristika souhlasného zesílení G_C

S pomocí zapojení na schématu 6 a funkce *AC sweep* byly získány frekvenční charakteristiky souhlasného zesílení pro $G_D \in \{4, 16\}$, které jsou vykresleny na obrázcích 7 a 8.

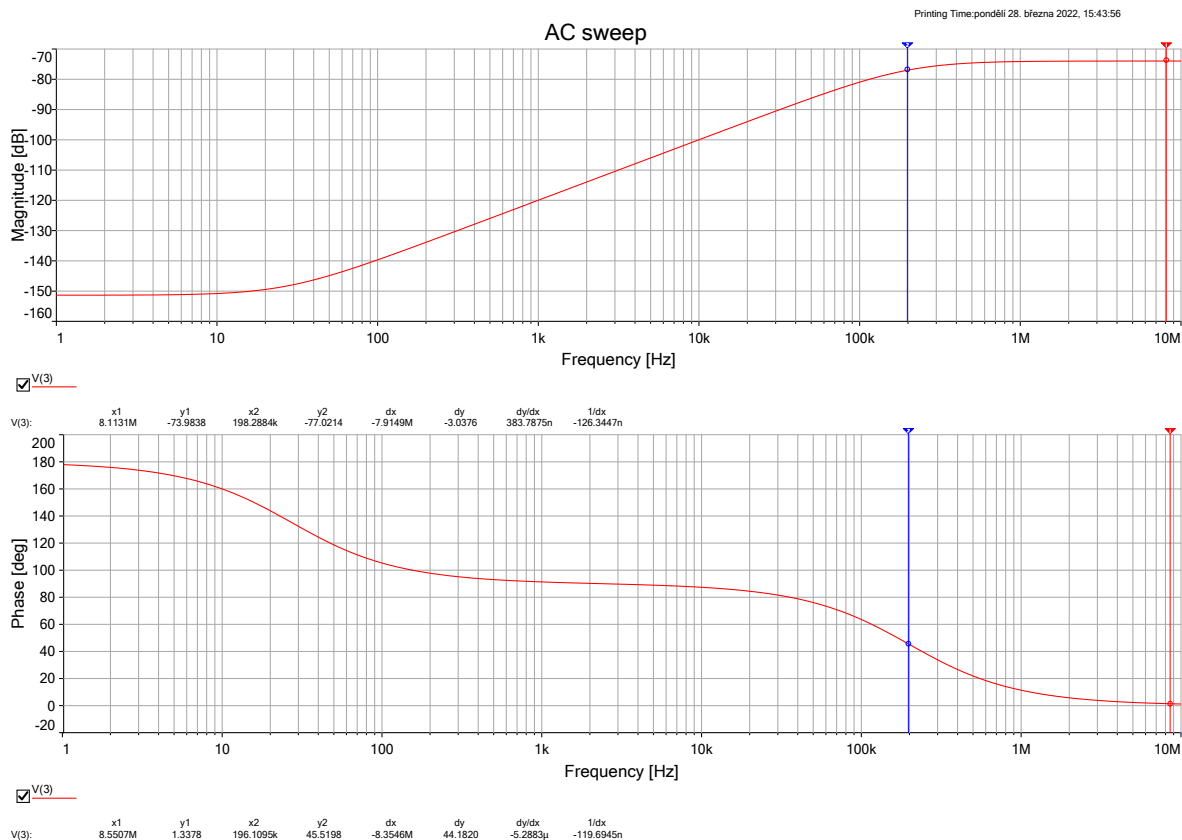
Mezní kmitočty jsou stejné jako u rozdílových zesílení (viz tabulka 4), frekvenční charakteristika má derivační charakter - vyšší kmitočty jsou propouštěny lépe než nižší. Srovnání CMRR pro různá zesílení a frekvence je v tabulce 5. Hodnoty souhlasného zesílení G_C jsou uvedeny v decibelech a tedy platí $\text{CMRR} = G_D - G_C$.

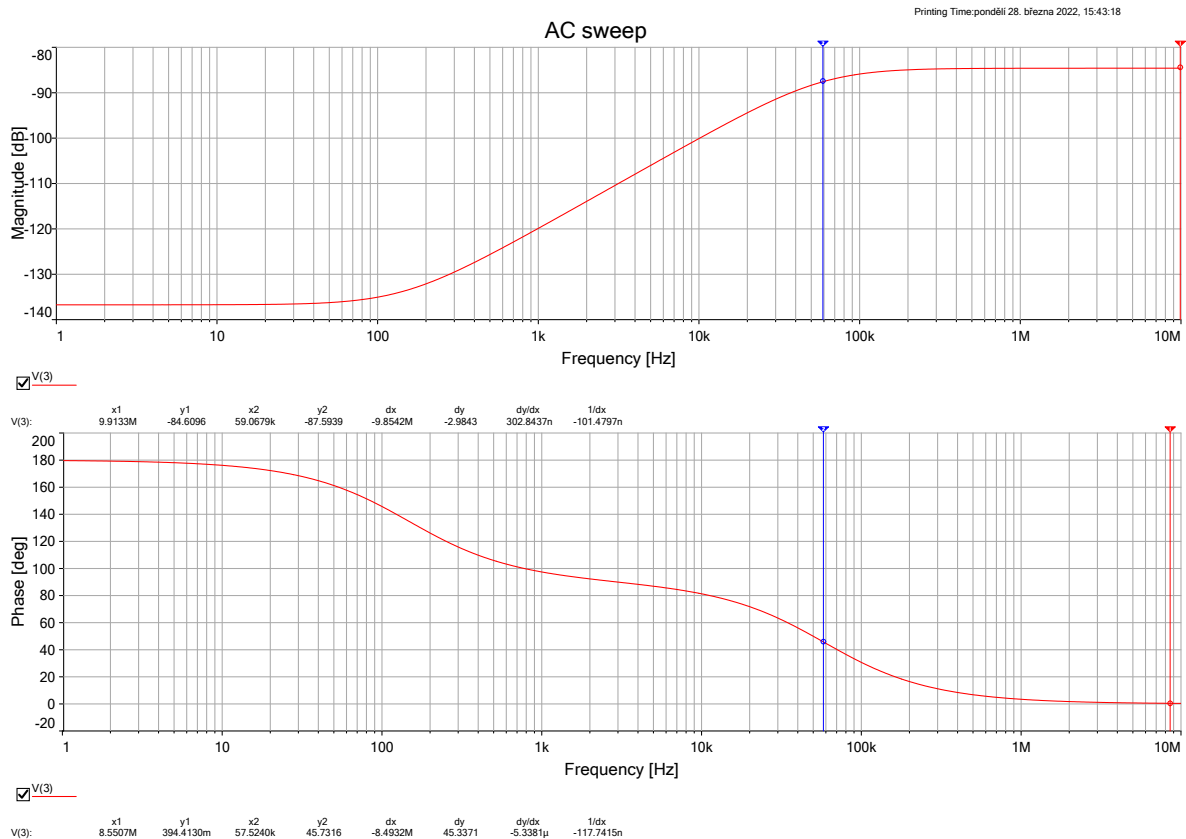
Stejnoseměrné souhlasné rušení lépe potlačuje méně zesilující rozdílový zesilovač (pro $G_D = 4 = 12\text{dB}$ je $\text{CMRR} = 164\text{dB}$), naopak na vyšších frekvencích lépe potlačuje více zesilující zesilovač (pro $G_D = 16 = 24\text{dB}$ je $\text{CMRR} = 109\text{dB}$).

Obrázek 4: Frekvenční charakteristika rozdílového zesílení pro $G_D = 4$ Obrázek 5: Frekvenční charakteristika rozdílového zesílení pro $G_D = 16$

Obrázek 6: Zapojení pro získání frekvenční charakteristiky souhlasného zesílení G_C

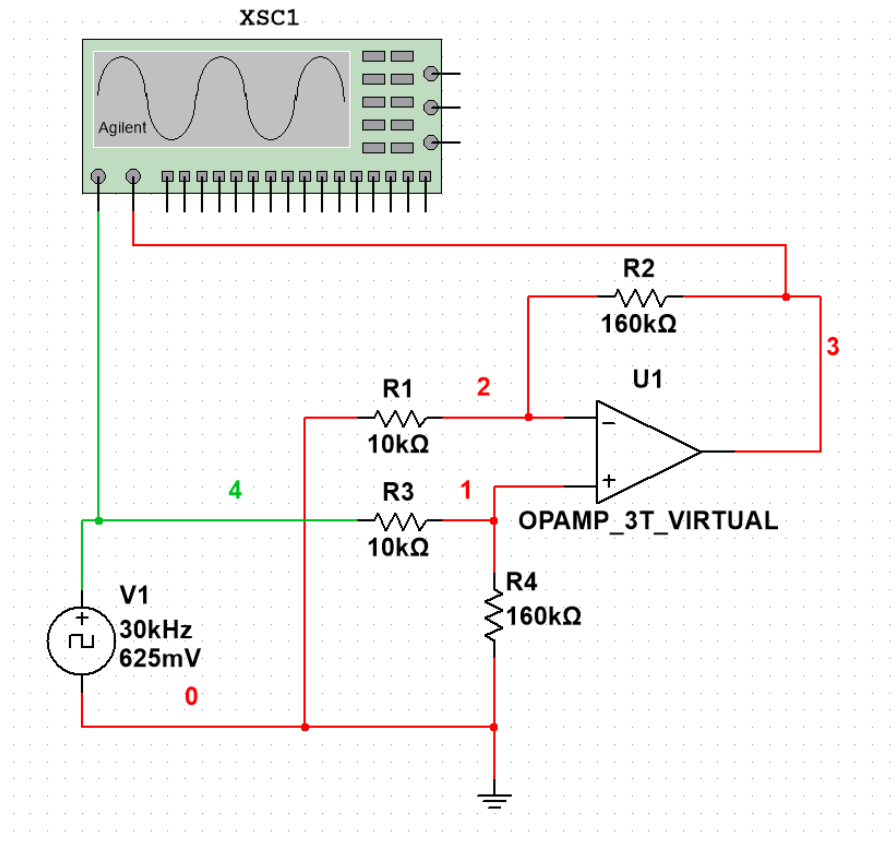
	$G_D = 12\text{dB}$	$G_D = 24\text{dB}$
$f \rightarrow 0$	-152 dB	-136 dB
$f \rightarrow \infty$	-73 dB	-85 dB

Tabulka 5: Závislost souhlasného zesílení G_C na frekvenci f a G_D Obrázek 7: Frekvenční charakteristika souhlasného zesílení pro $G_D = 4$

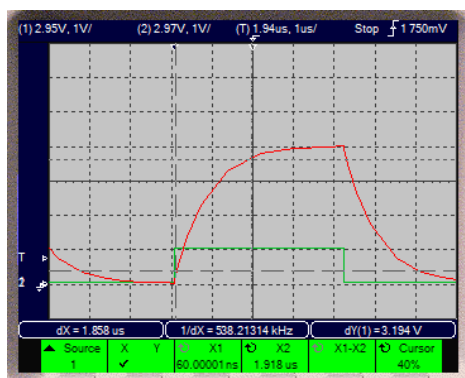
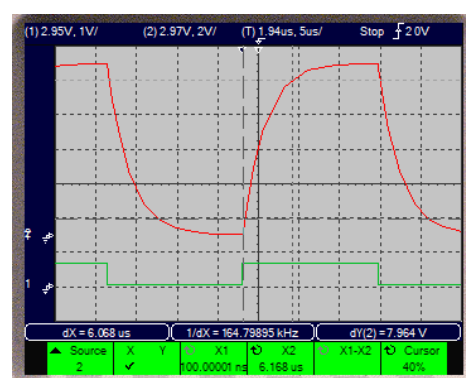
Obrázek 8: Frekvenční charakteristika souhlasného zesílení pro $G_D = 16$

4 Doba náběhu

S pomocí generátoru obdélníkového signálu a osciloskopu zapojeného dle schématu 9 byly zachyceny časové průběhy vykreslené na obrázcích 10a a 10b. Pomocí kurzorů byly odečteny doby náběhu $T_n = 1,858\mu\text{s}$ pro $G_D = 4$ a $T_n = 6,068\mu\text{s}$ pro $G_D = 16$. Oba odpovídají očekávaným dobám náběhu vypočteným dle vztahu $T_n \approx 0,35/f_m$.



Obrázek 9: Zapojení pro měření doby náběhu

(a) Pro $G_D = 4$ (b) Pro $G_D = 16$ Obrázek 10: Měření doby náběhu T_n rozdílového zesilovače