

Zesilovače biologických signálů

BAM31LET Lékařská technika

Zdeněk Horčík, Jan Havlík | Katedra teorie obvodů | horcik@fel.cvut.cz

Zesilovače biologických signálů

- zesilovače pro
 - EKG (elektrokardiografie, srdce)
 - $U = 0,5$ až 5 mV, $f = 0,01$ až 250 Hz, elektrody kontaktní na kůži
 - EEG (elektroencefalografie, mozek)
 - $U = 5$ až 300 mV, $f = 0,1$ až 100 Hz, elektrody kontaktní na pokožku hlavy nebo zavrtávací
 - EMG (elektromyografie, svaly)
 - $U = 0,1$ až 10 mV, $f = 0,01$ Hz až 10 kHz, elektrody kontaktní nebo jehlové
 - a další

Požadavky na zesilovače

- dostatečné zesílení
- vysoký vstupní odpor
- požadovaný frekvenční rozsah
- potlačení souhlasného signálu
- odolné proti indukovanému rušivému napětí
- odolné proti nedokonalému připojení svodů
- chráněné proti poškození velkými vstupními signály

Operační zesilovač

- základní typ univerzálního integrovaného zesilovače, spojením s vnějším zpětnovazebním obvodem lze vytvořit řadu specializovaných obvodů, např. invertující a neinvertující zesilovač, komparátor, integrátor, nelineární zesilovače apod.
- OZ má dva rozdílové vstupy, invertující a neinvertující, napěťový výstup
- napájení typicky $+U_{cc}$ a $-U_{cc}$ proti společné referenční svorce GND (ground), některé typy jsou používány i s pouze jedním napájecím napětím proti GND

Ideální operační zesilovač

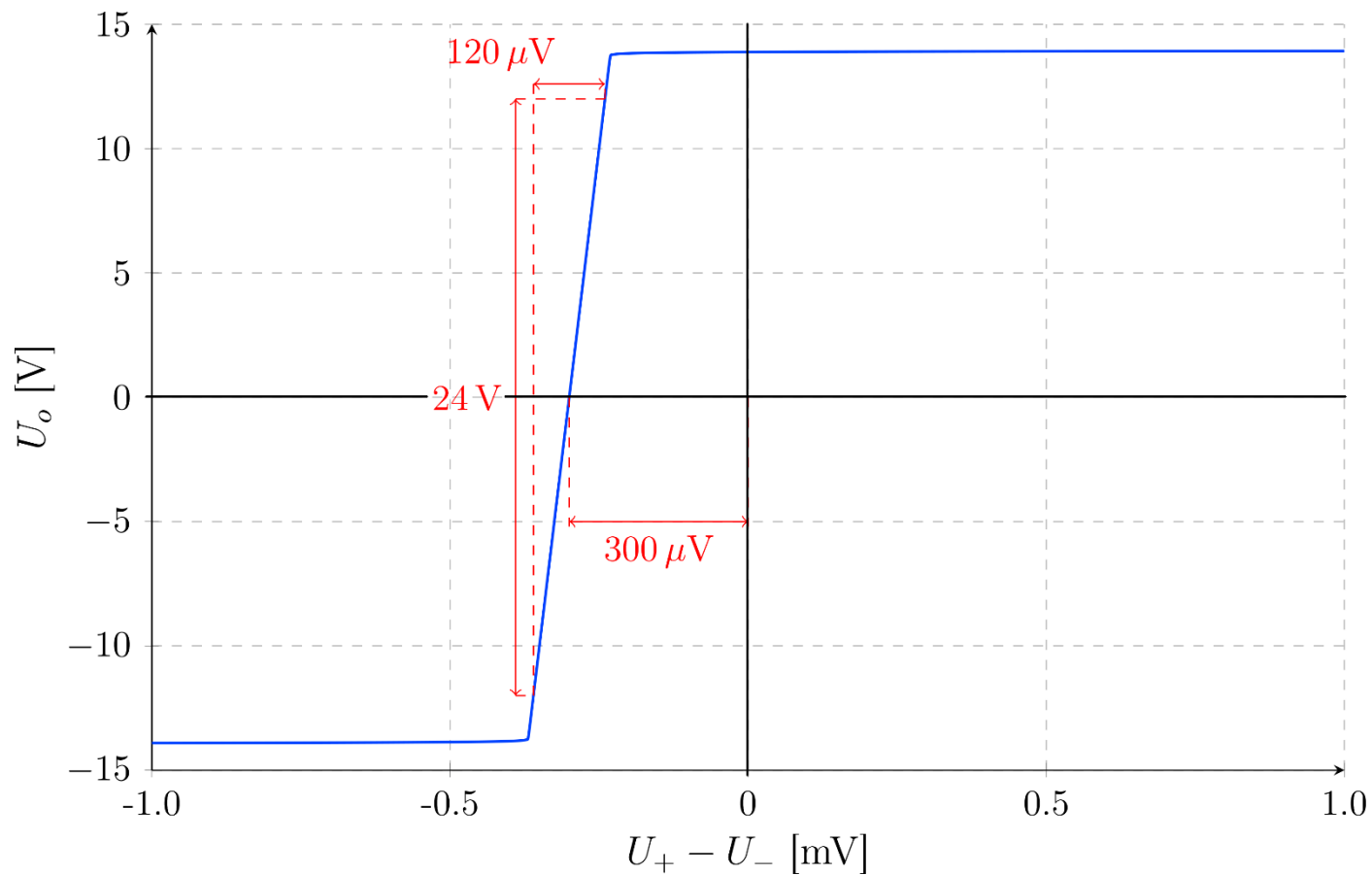
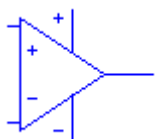
- nekonečně velké zesílení rozdílového napětí mezi vstupy
- nulové zesílení součtového napětí (stejného na obou vstupech)
- nekonečně velký vstupní odpor
- nulový výstupní odpor
- neomezené kmitočtové vlastnosti, nekonečná rychlost přeběhu
- nulové chybové veličiny (offset, vstupní proud, šumové parametry...)

Reálný operační zesilovač

- zesílení rozdílového napětí konečné, velmi vysoké (v řádu 10^4 až 10^7)
- zesílení souhlasného napětí o několik (4 a více) řádů menší než zesílení rozdílového napětí
- konečný, ale velmi velký vstupní odpor – odlišnosti dle technologie
- nenulové vstupní proudy (v řádu pA až μA) a napěťový offset (v řádu zlomků mV až jednotek mV)
- nenulový výstupní odpor (typicky desítky Ω)
- omezené kmitočtové pásmo a rychlost přeběhu
- nenulové šumové parametry – odlišnosti dle typu

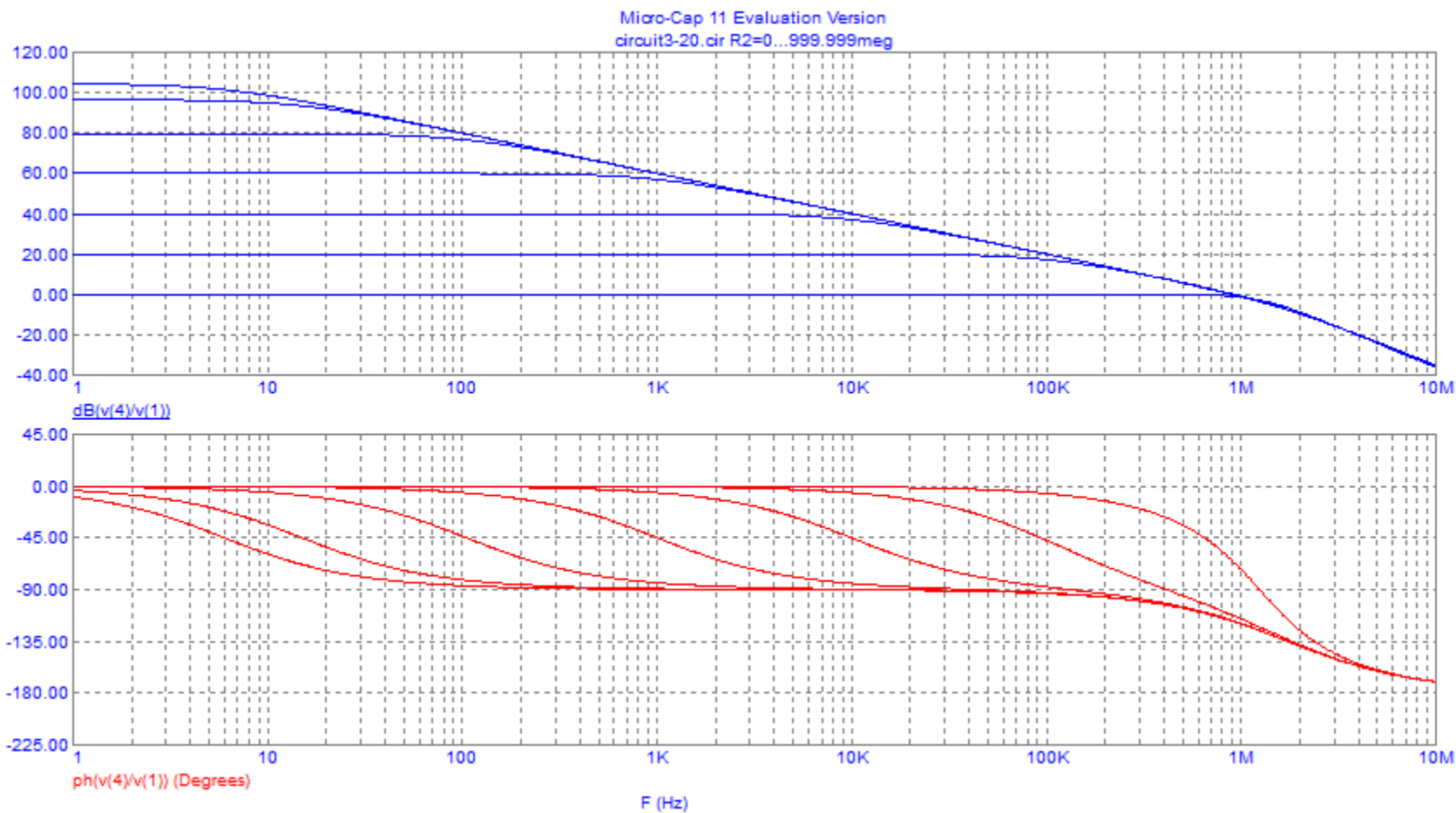
Operační zesilovač

převodní charakteristika OZ – zesílení 200 000, vliv offsetu



Operační zesilovač

frekvenční charakteristiky pro různá nastavená zesílení

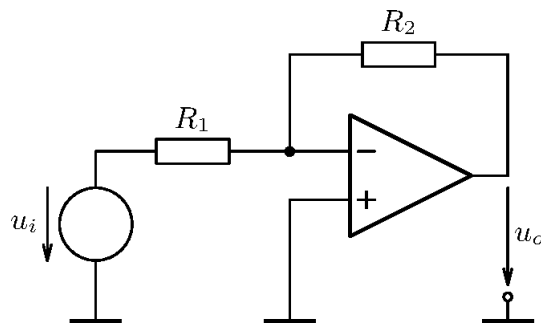


Operační zesilovač – napájení

- napájecí napětí je obvykle symetrické $+U_{cc}$ a $-U_{cc}$
- rozsah bývá +/- 3 V až +/- 15, 18, 21 V proti GND
- na rozsah napájecích napětí se váže povolený rozsah vstupních napětí, obvykle musí být vstupní napětí uvnitř rozsahu napájecích napětí, příp. dle typu s mírným přesahem do 0,5 V či naopak odstupem několika voltů, např. $-U_{cc} + 3 V$ až $+U_{cc} - 2 V$
- od napájecího napětí je odvozen rozkmit výstupního napětí, opět obvykle o jednotky voltů menší než je rozsah napájecích napětí, některé OZ jsou tzv. rail to rail, výstup dojde až k napájecímu napětí
- některé OZ pracují i s jen jedním napájecím napětím

Invertující zesilovač

- základní zapojení invertujícího zesilovače

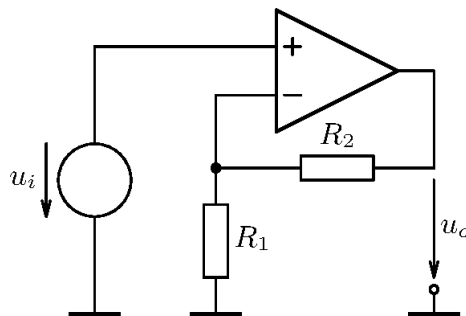


$$A_U = -\frac{R_2}{R_1} \quad R_{in} = R_1$$

- není řešen vliv chybových parametrů zesilovače, vliv vnitřního odporu zdroje vstupního napětí

Neinvertující zesilovač

- základní zapojení neinvertujícího zesilovače



$$A_U = 1 + \frac{R_2}{R_1} \quad R_{in} = \text{velmi vysoký}$$

- není řešen vliv chybových parametrů zesilovače

Invertující zesilovač

- invertující zesilovač, zdroj signálu s vnitřním odporem

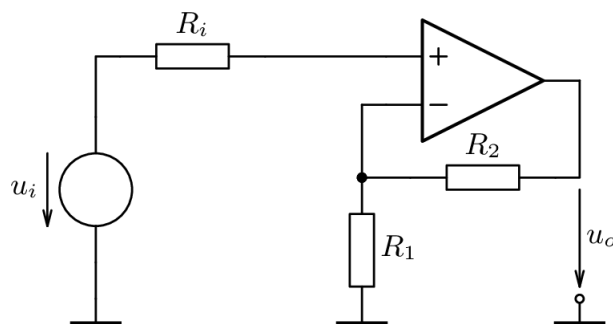


$$A_U = -\frac{R_2}{R_1 + R_i} \quad R_{in} = R_1$$

- tedy pokles absolutní hodnoty zesílení oproti $-\frac{R_2}{R_1}$
- Stále není řešen vliv chybových parametrů zesilovače

Neinvertující zesilovač

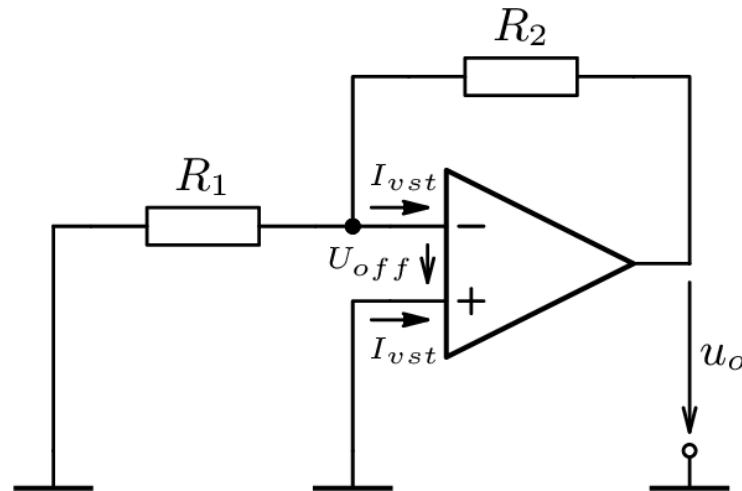
- neinvertující zesilovač, zdroj signálu s vnitřním odporem



$$A_U = 1 + \frac{R_2}{R_1} \quad R_{in} = \text{velmi vysoký}$$

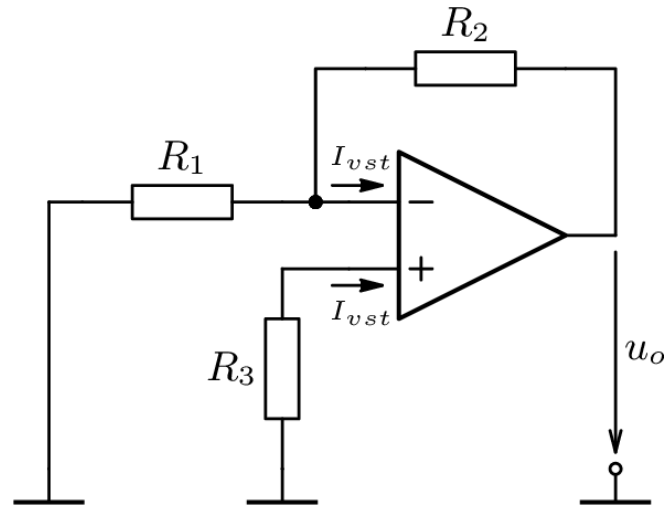
- vnitřní odpor zdroje vstupního napětí se neprojevív na zesílení – vůbec nevystupuje ve vztahu pro zesílení
- není řešen vliv chybových parametrů zesilovače

Hlavní zdroje chyb



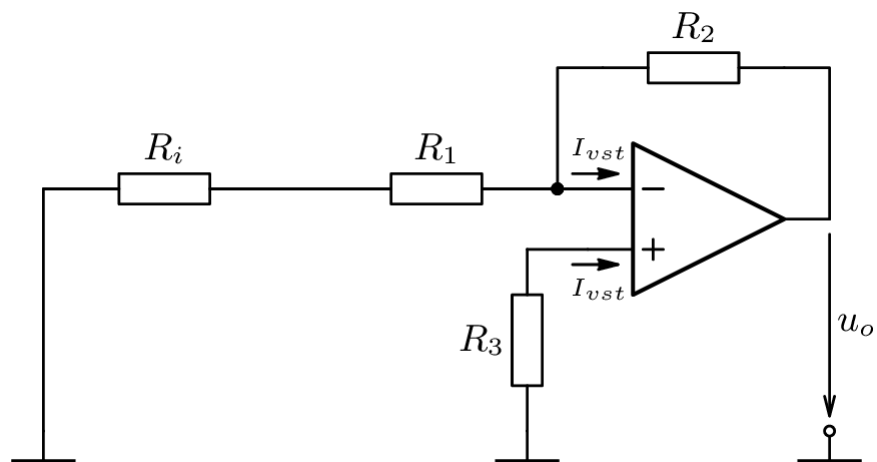
- nenulové vstupní proudy (ale podobně velké pro oba vstupy)
- napěťový offset

Odstranění vlivu chyb OZ



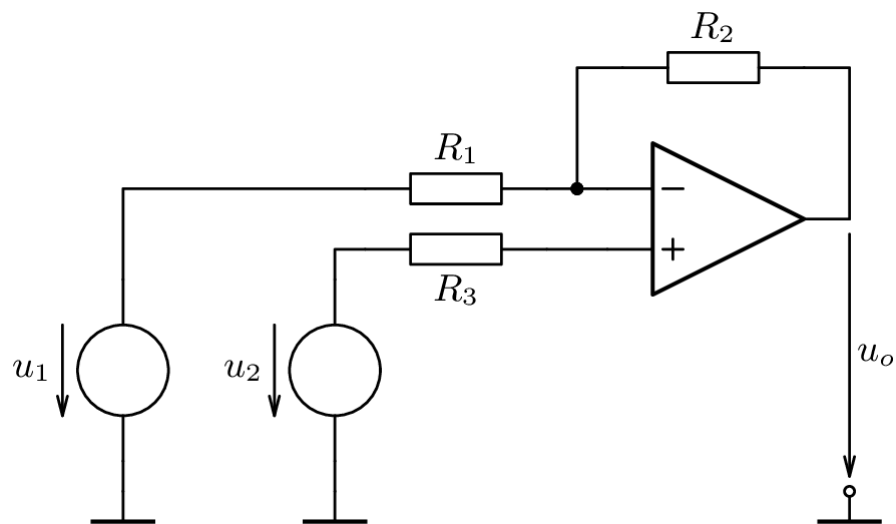
- vliv vstupního klidového proudu $R_3 = R_1 \parallel R_2 = \frac{R_1 R_2}{R_1 + R_2}$
- kompenzace offsetu – dle výrobce OZ, např. odporovým trimrem

Odstranění vlivu odporu zdroje



Lze kompenzovat vliv vnitřního odporu zdroje signálu? Jak?

Měření rozdílových signálů



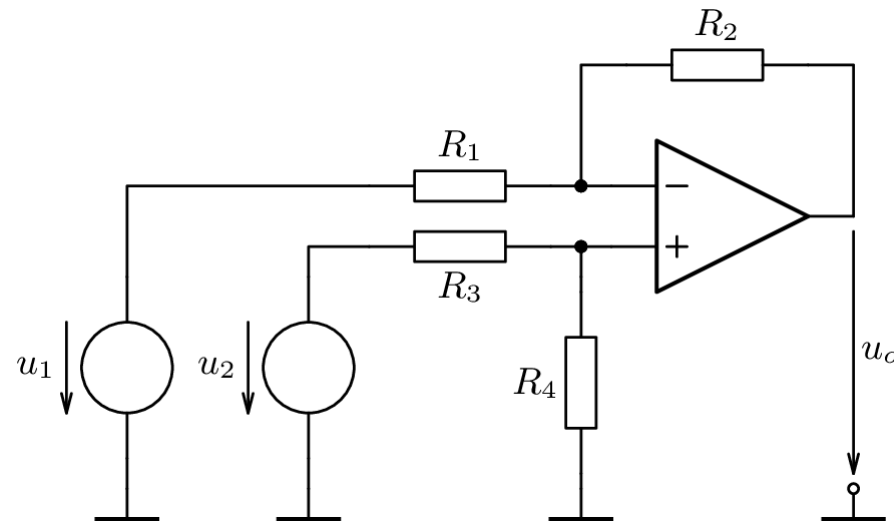
Jak lze zařídit měření rozdílových signálů?

- toto zapojení nevyhovuje

Proč? Vždyť operační zesilovač má rozdílové vstupy.

Jaká jsou zesílení A_{U_-} a A_{U_+} (vstupní napětí U_1 a U_2 na zdrojích u_1, u_2 ve schématu)?

Rozdílový zesilovač



- dělič R_3 R_4 zmenšuje zesílení neinvertující větve
- při vhodné volbě R_3 a R_4 lze dosáhnout shodného zesílení invertující a neinvertující větve $A_{U+} = -A_{U-}$

Souhlasný a rozdílový signál

- Pro výpočty s OZ zavádíme pojem součtového (někdy nazývaného souhlasného, common) a rozdílového (differential) napětí, odvodíme je ze vstupního napětí U_1 a U_2 dle vztahů:
- Součtové napětí jako střední hodnotu vstupních napětí:
$$U_{CM} = \frac{U_1 + U_2}{2}$$
- rozdílové napětí jako rozdíl vstupních napětí:
$$U_{DIF} = U_2 - U_1$$
- potom lze U_1 a U_2 vyjádřit vztahy:
$$U_1 = U_{CM} - \frac{U_{DIF}}{2}$$
$$U_2 = U_{CM} + \frac{U_{DIF}}{2}$$

Zesílení souhlasné a rozdílové složky

- zesílení z jednotlivých vstupů

$$A_{U+} = \frac{R_1 + R_2}{R_1} \frac{R_4}{R_3 + R_4} \quad \text{při } U_1 = 0$$

$$A_{U-} = -\frac{R_2}{R_1} \quad \text{při } U_2 = 0$$

- výstupní napětí

$$U_{OUT} = A_{U+} U_2 + A_{U-} U_1$$

$$U_{OUT} = \frac{R_1 + R_2}{R_1} \frac{R_4}{R_3 + R_4} U_2 - \frac{R_2}{R_1} U_1$$

Zesílení souhlasné a rozdílové složky

- zesílené rozdílové složky

$$A_{DIF} = \frac{1}{2} \left(\frac{R_1 + R_2}{R_1} \frac{R_4}{R_3 + R_4} + \frac{R_2}{R_1} \right)$$

- zesílení souhlasné složky

$$A_{CM} = \frac{R_1 + R_2}{R_1} \frac{R_4}{R_3 + R_4} - \frac{R_2}{R_1}$$

Zesílení souhlasné a rozdílové složky

- obvykle volíme

$$\frac{R_2}{R_1} = \frac{R_4}{R_3}$$

- často dokonce

$$R_1 = R_3 \quad R_2 = R_4$$

- potom

$$A_{DIF} = \frac{R_2}{R_1}$$

$$A_{CM} = 0$$

- platí ovšem pouze pro dokonale přesné rezistory, to je obtížné dodržet

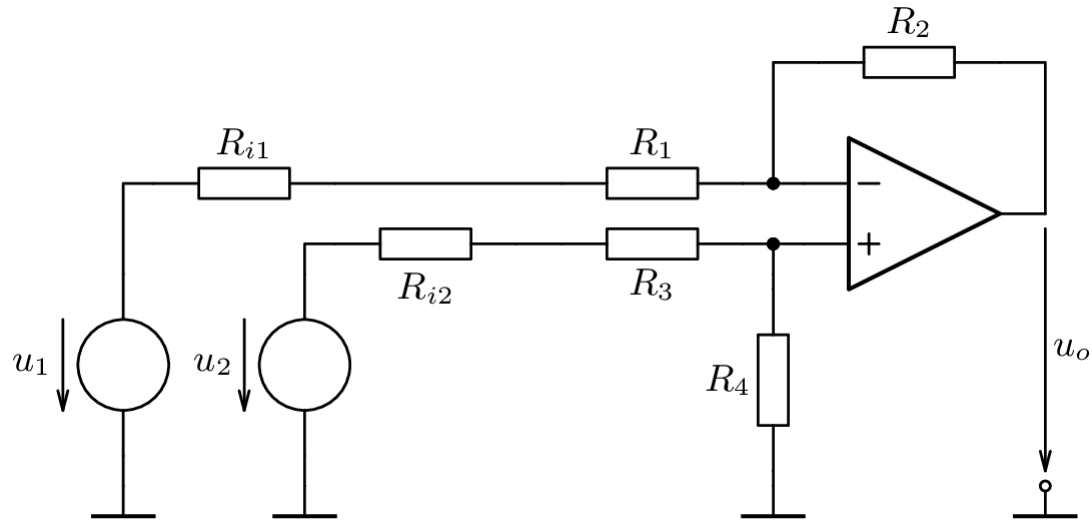
Potlačení souhlasné složky

- Poměr mezi rozdílovým a souhlasným zesílením určuje parametr **CMRR** – činitel potlačení souhlasného signálu (Common Mode Rejection Ratio), někdy označovaný pouze **CMR**

$$CMRR = 20 \log \frac{A_{DIF}}{A_{CM}}$$

- Jeho velikost požadujeme co nejvyšší
- dle předchozích výpočtů ($A_{CM} = 0$) je teoreticky nekonečný, **prakticky více než 80 dB**

Rozdílový zesilovač

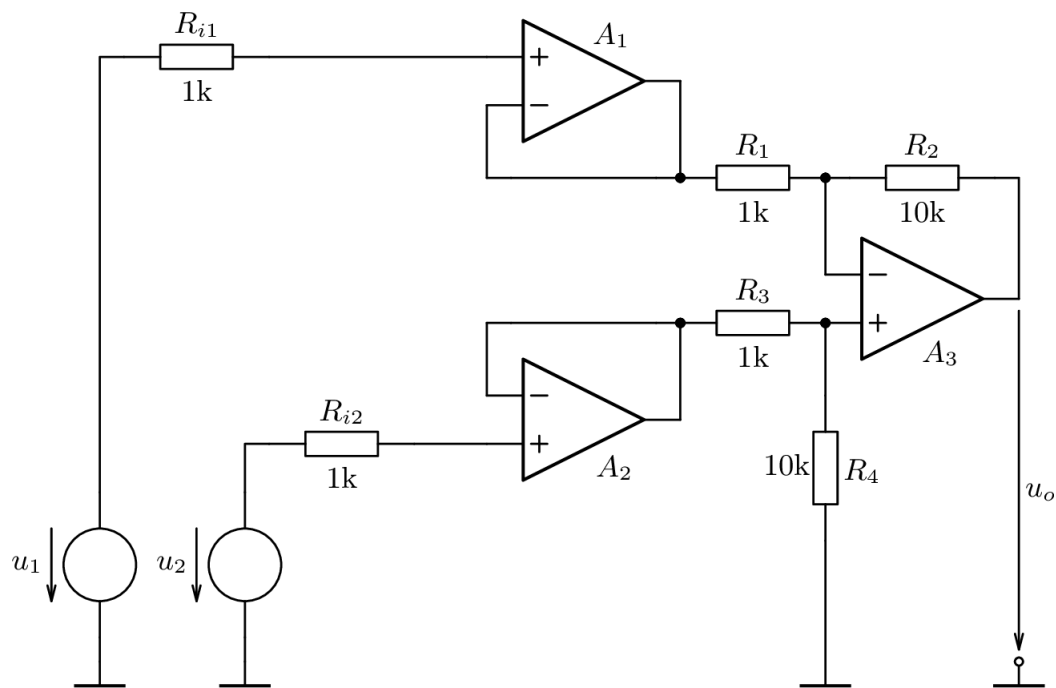


Jaký je vliv R_{i1} a R_{i2} (reprezentují nedokonalé připojení snímacích elektrod)?

Liší se vliv v invertující a neinvertující větvi?

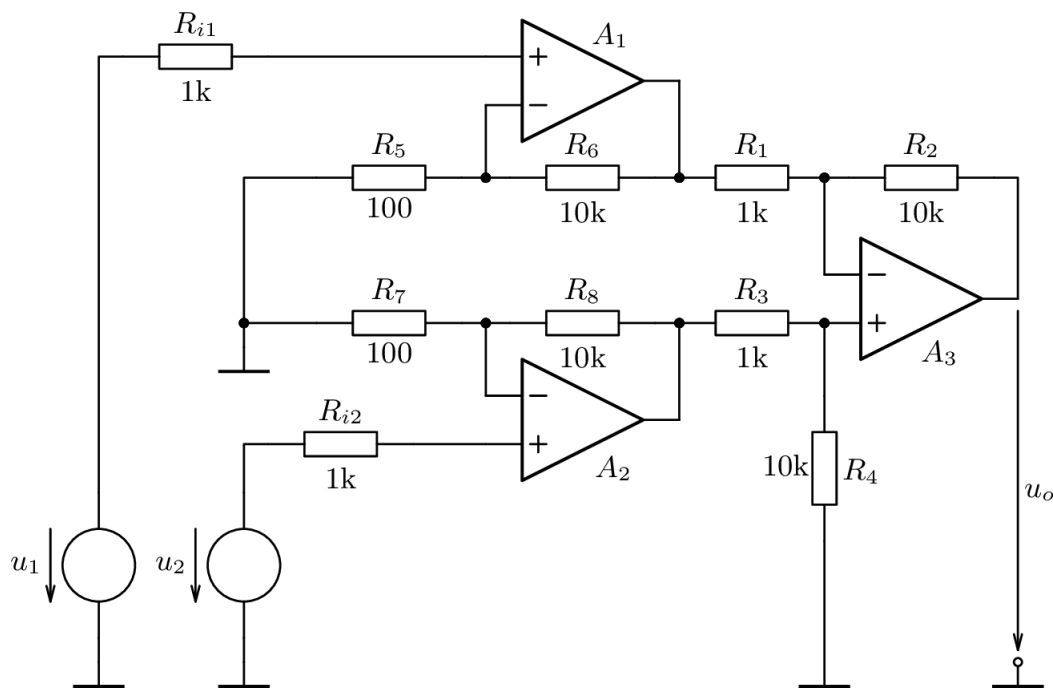
Vadí víc stejné nebo nestejně hodnoty R_{i1} a R_{i2} ? Jak?

Rozdílový zesilovač



- řešením je oddělení vstupů sledovačem signálu nebo neinvertujícím zesilovačem
 - Jaký je vliv R_{i1} a R_{i2} , jaký je vstupní R_{in} ?

Rozdílový zesilovač



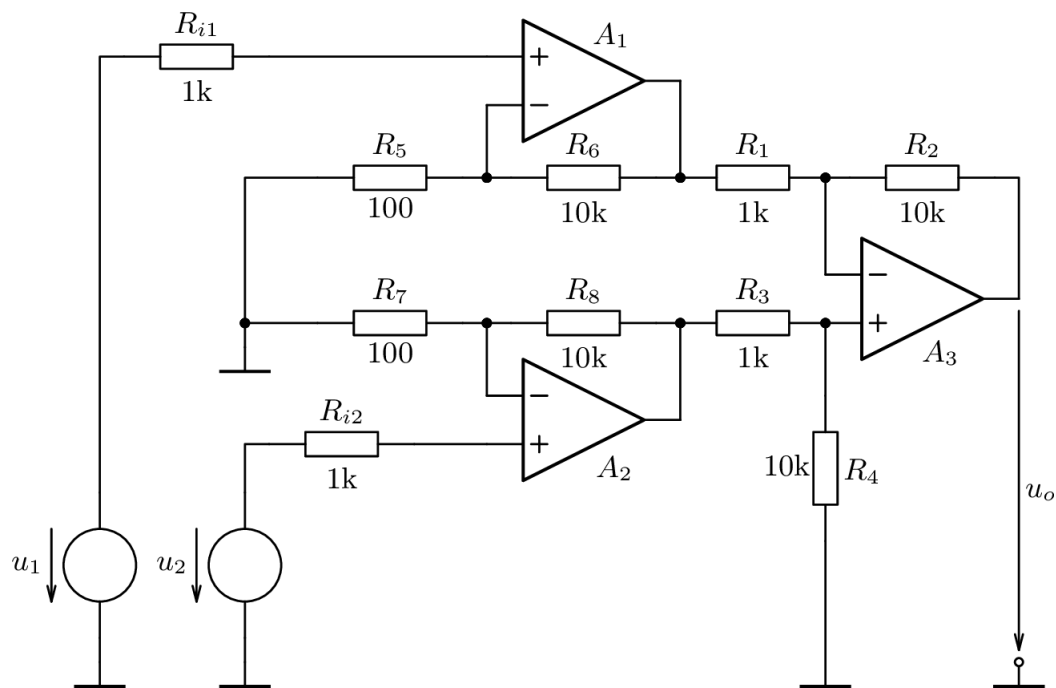
$$A_{A1} = 1 + \frac{R_6}{R_5}$$

$$A_{A2} = 1 + \frac{R_8}{R_7}$$

Na zesilovače A_1 a A_2 lze přenést část požadovaného zesílení signálu (dodatečné zesílení) – jaký je vliv na kmitočtovou charakteristiku?

Lze jednoduše měnit zesílení, nejlépe jedním prvkem?

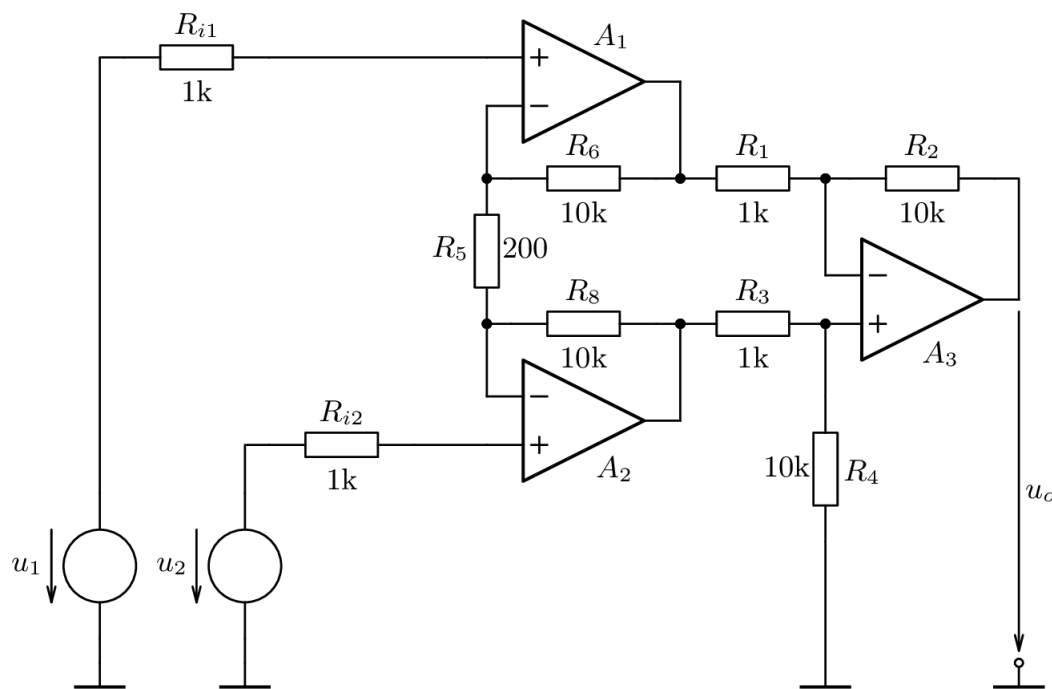
Rozdílový zesilovač



- výstupní napětí při $R_1 = R_3, R_2 = R_4, R_5 = R_7, R_6 = R_8$

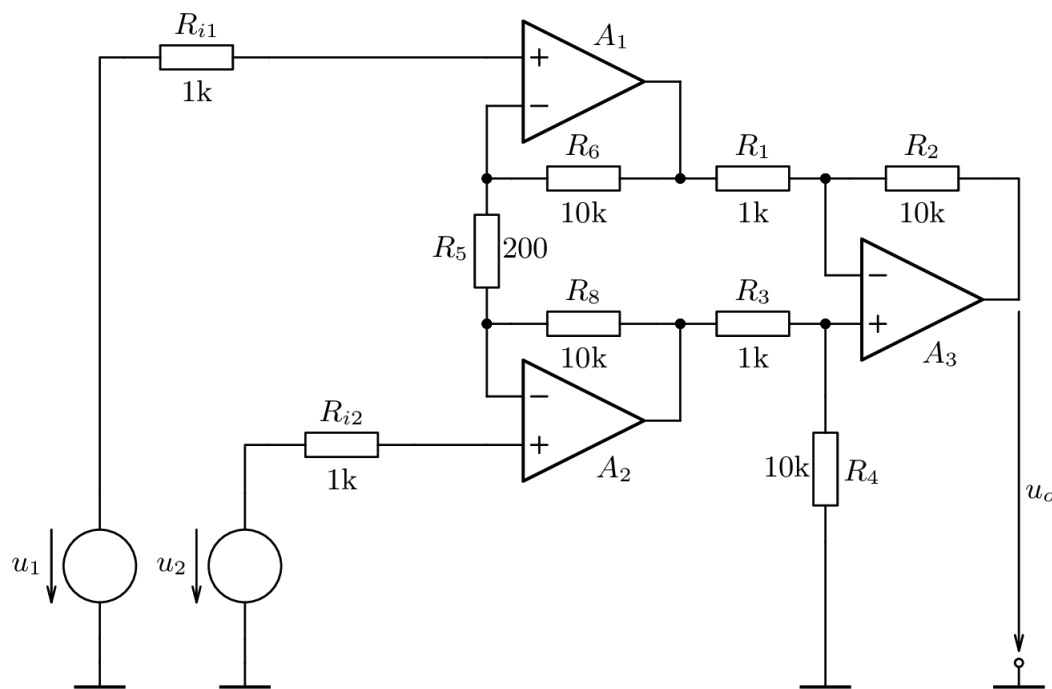
$$U_{OUT} = (U_2 - U_1) \left(1 + \frac{R_6}{R_5} \right) \frac{R_2}{R_1}$$

Přístrojový zesilovač



- elegantnější řešení, zesílení předzesilovacích stupňů lze ovládat jedním prvkem R_5 ,
- to usnadňuje přepínání rozsahů a plynulou regulaci zisku

Přístrojový zesilovač

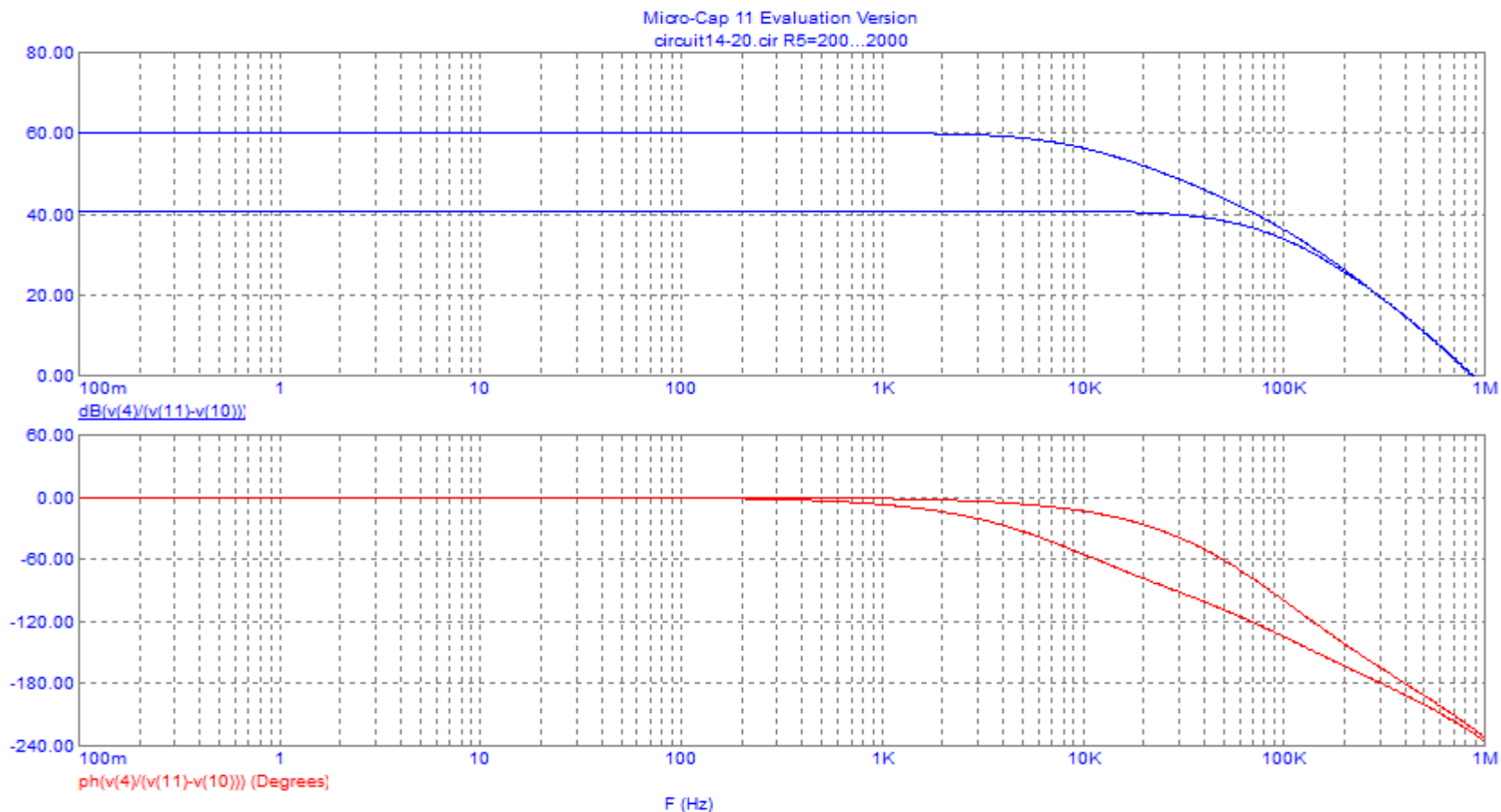


- výstupní napětí pro $R_1 = R_3, R_2 = R_4, R_6 = R_8$

$$U_{OUT} = (U_2 - U_1) \left(1 + \frac{2R_6}{R_5} \right) \frac{R_2}{R_1}$$

Přístrojový zesilovač

frekvenční charakteristiky pro zesílení 100 a 1 000



Přístrojový zesilovač

přístrojový zesilovač Analog Devices AD620

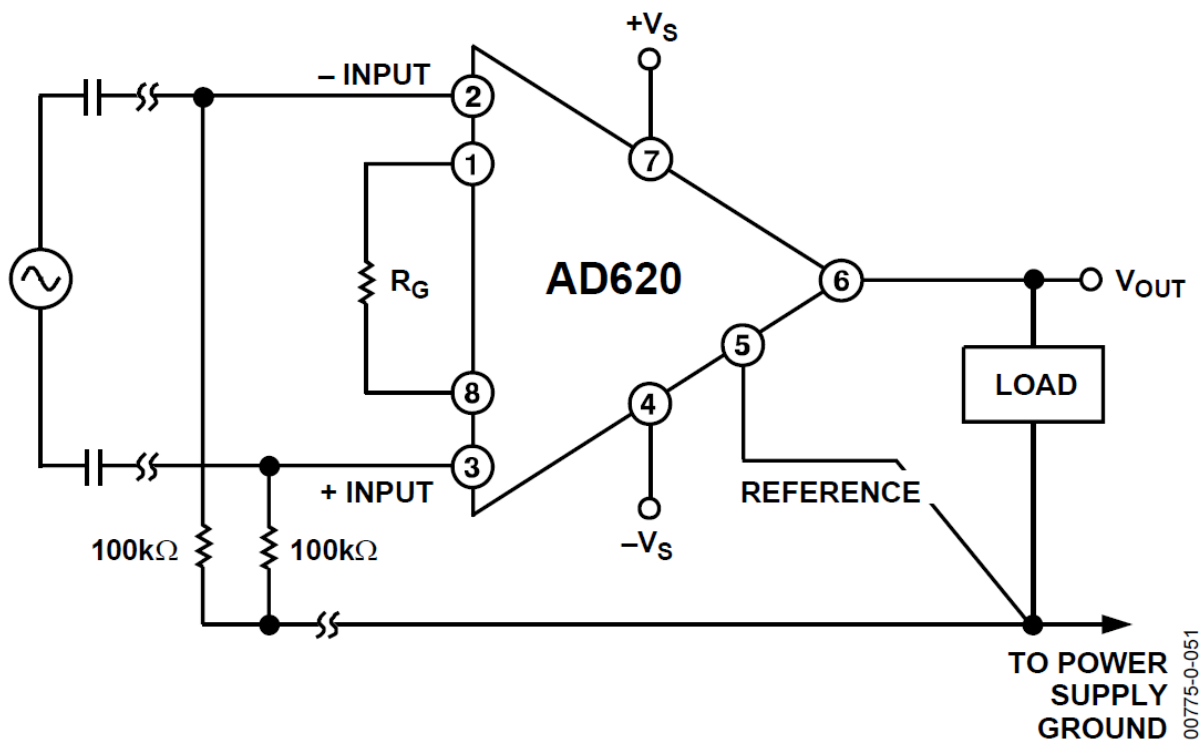
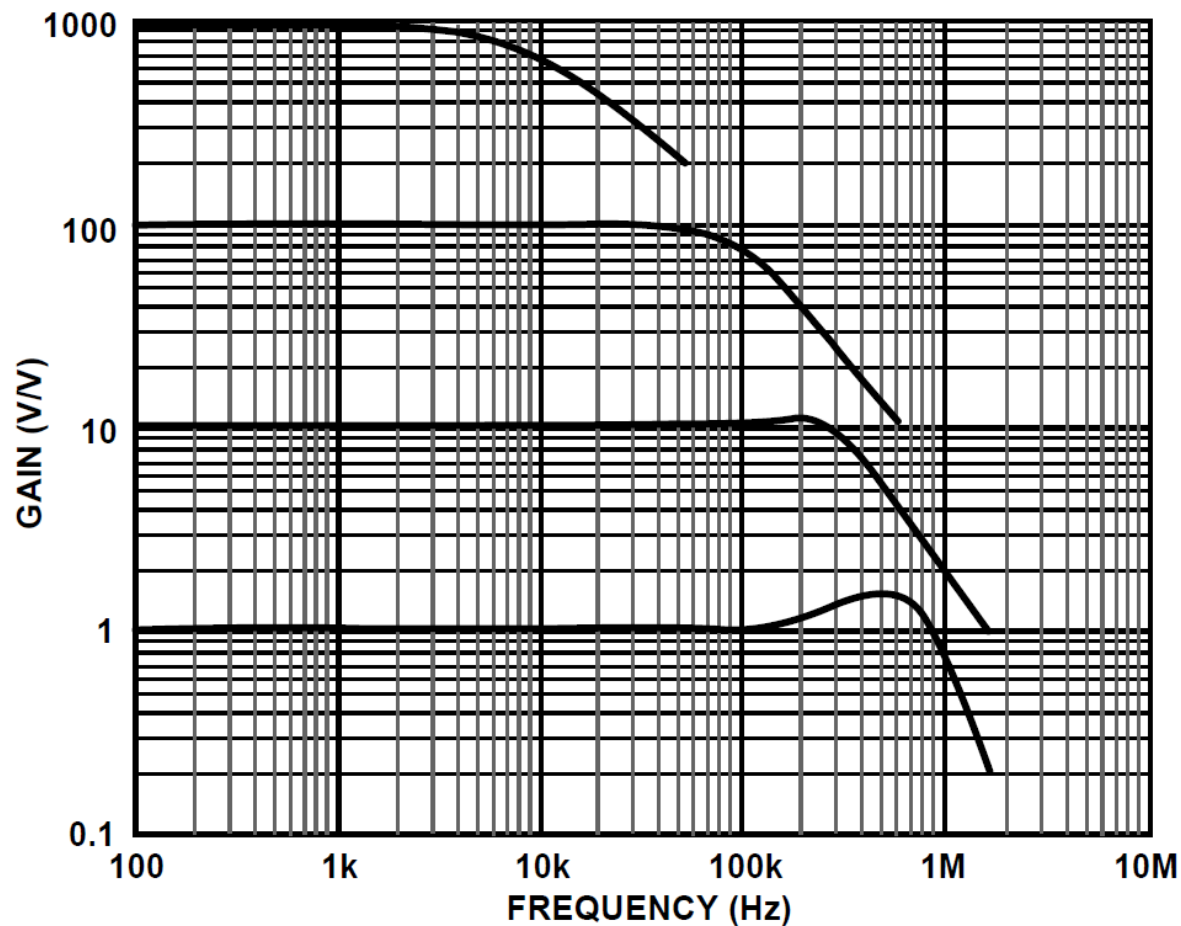


Figure 49. Ground Returns for Bias Currents with AC-Coupled Inputs

Přístrojový zesilovač

frekvenční charakteristiky AD620 pro různá zesílení



00775-0-019

Literatura

1. Neumann, P., Uhlíř, J: Elektronické obvody a funkční bloky 1. Vydavatelství ČVUT FEL Praha, 2005.
2. Neumann, P., Uhlíř, J: Elektronické obvody a funkční bloky 1. Vydavatelství ČVUT FEL Praha, 2001.
3. Online: www.analog.com/static/imported-files/data_sheets/AD620.pdf [online, 11/2020]
4. Penhaker, M. a kol.: Lékařské diagnostické přístroje —
— učební texty. VŠB TU Ostrava, Ostrava, 2004.
5. Webster, J. G.: Medical Instrumentation — Application
and Design. Wiley, 4 edition, 2007.
6. Návody na laboratorní cvičení A6M31LET - Lékařská technika, Praha, 2020
7. Datasheety www.ti.com/lit/gpn/lm2904 [online, 11/2020]