

# Zesilovače biologických signálů

---

BAM31LET Lékařská technika

Zdeněk Horčík, Jan Havlík | Katedra teorie obvodů | [horcik@fel.cvut.cz](mailto: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  $300$   $\mu$ V,  $f = 0,1$  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

---

- dostatečné zesílení
- potlačení souhlasného signálu
- vysoký vstupní odpor
- požadovaný frekvenční rozsah
- 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 např. invertující a neinvertující zesilovač, komparátor, nelineární zesilovače apod.
- 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 (unipolární napájení)

# Ideální operační zesilovač

---

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

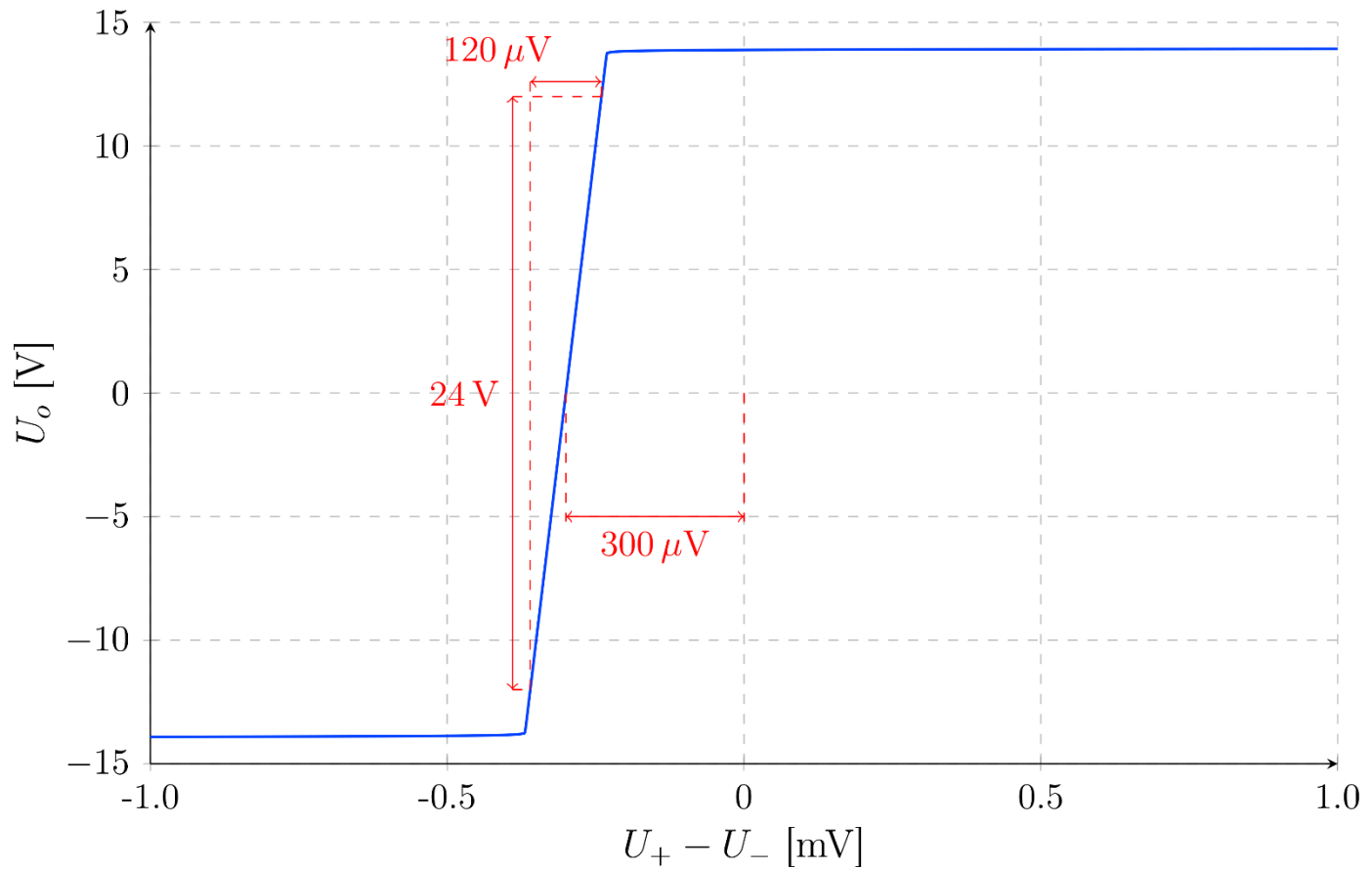
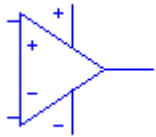
# Reálný operační zesilovač

---

- zesílení rozdílového napětí mezi vstupy konečné, velmi velké (v řádu  $10^4$  až  $10^7$ )
- zesílení souhlasného napětí o několik (4 a více) řádů menší než zesílení rozdílového
- konečný, ale velmi velký vstupní odpor – odlišnosti dle technologie (bipolární, JFET, MOSFET)
- nenulové vstupní proudy (v řádu pA až  $\mu$ A) a napěťový offset (v řádu zlomků mV až jednotek mV)
- nenulový výstupní odpor (typicky desítky  $\Omega$ )
- omezené kmitočtové pásmo a rychlost přeběhu
- nenulové šumové parametry – odlišnosti dle typu

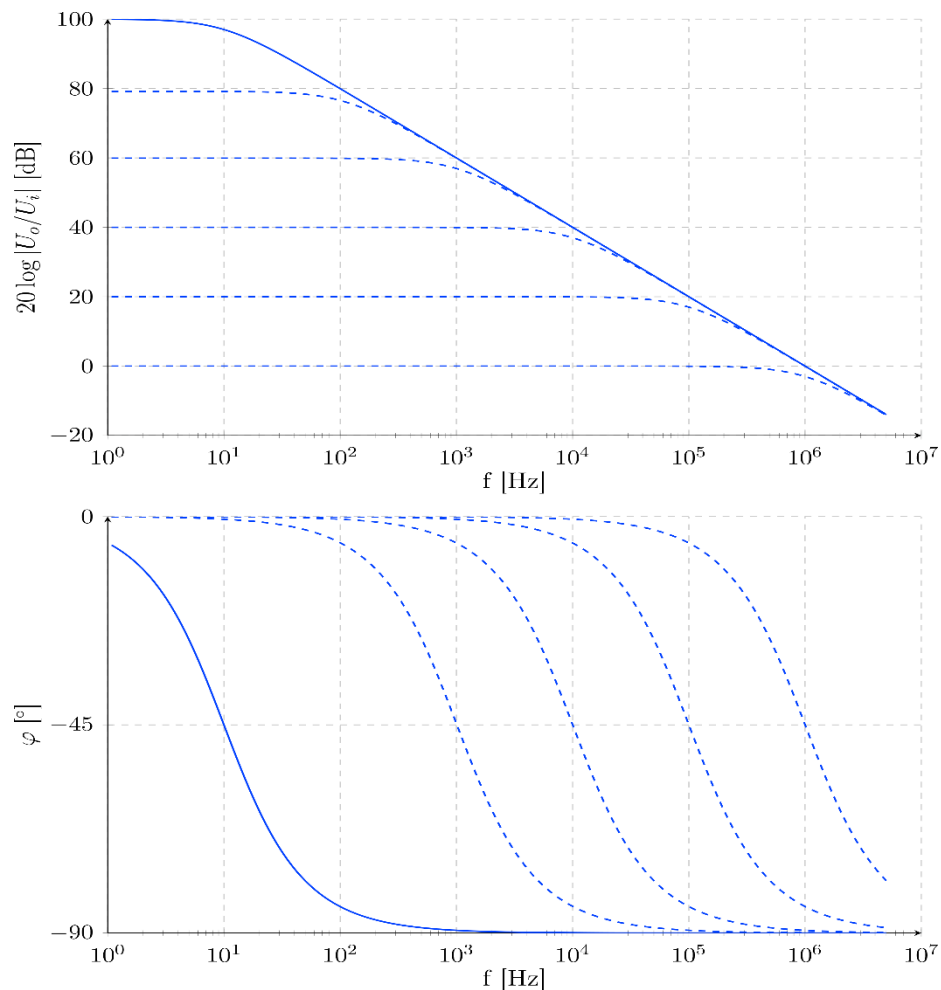
# Operační zesilovač

převodní charakteristika – zesílení 200 000, vliv offsetu



# Operační zesilovač

frekvenční charakteristiky pro různá zesílení





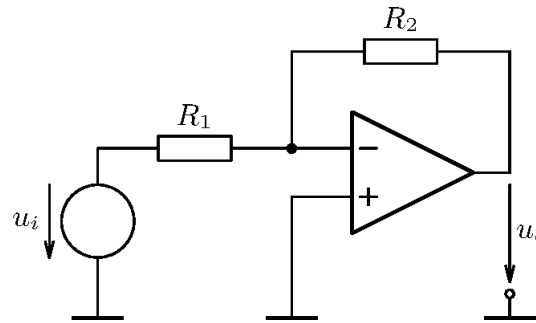
# Operační zesilovač – napájení

---

- napájecí napětí je obvykle symetrické  $+U_{cc}$  a  $-U_{cc}$
- rozsah bývá  $\pm 3$  V až  $\pm 15$ , 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. s odstupem několika voltů, např.  $-U_{cc}+3$  V až  $+U_{cc}-3$  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

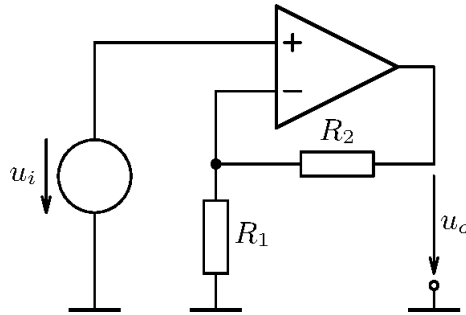


$$A_U = -\frac{R_2}{R_1} \quad R_{in} = R_1$$

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

# Neinvertující zesilovač

- základní zapojení neinvertujícího zesilovače

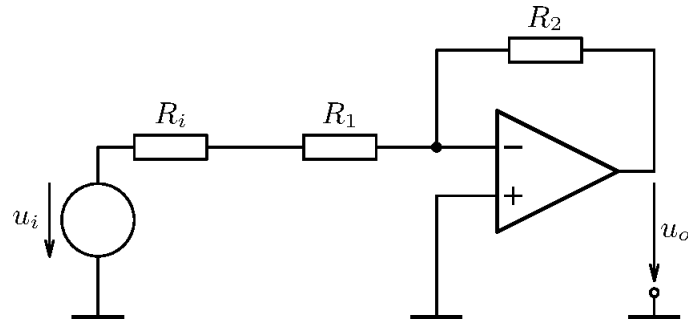


$$A_U = 1 + \frac{R_2}{R_1} \quad R_{in} = \text{velmi vysoký}$$

- není řešen vliv chybových parametrů zesilovače

# Invertující zesilovač

- invertující zesilovač, zdroj signálu s vnitřním odporem

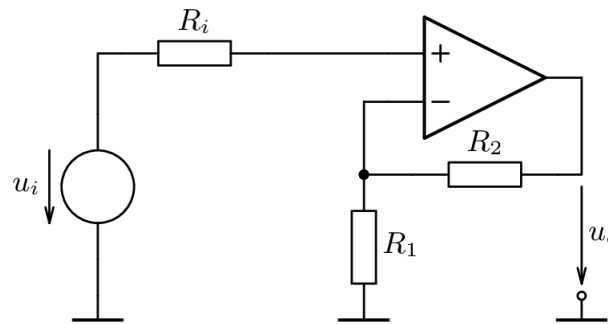


$$A_U = -\frac{R_2}{R_1 + R_i} \quad R_{in} = R_1$$

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

# Neinvertující zesilovač

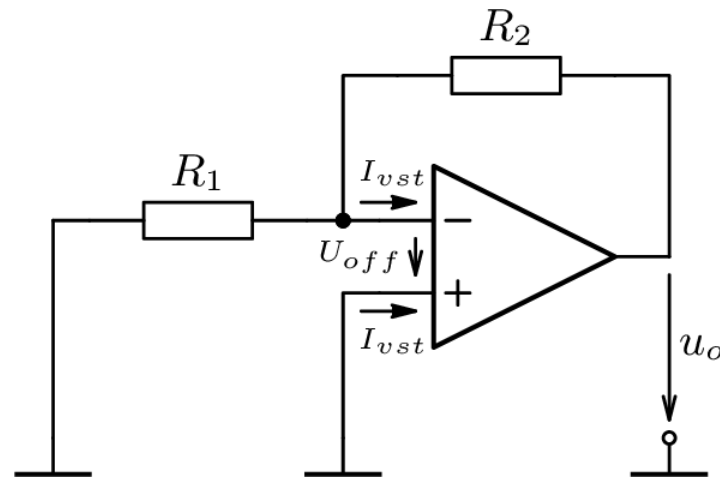
- neinvertující zesilovač, zdroj signálu s vnitřním odporem



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

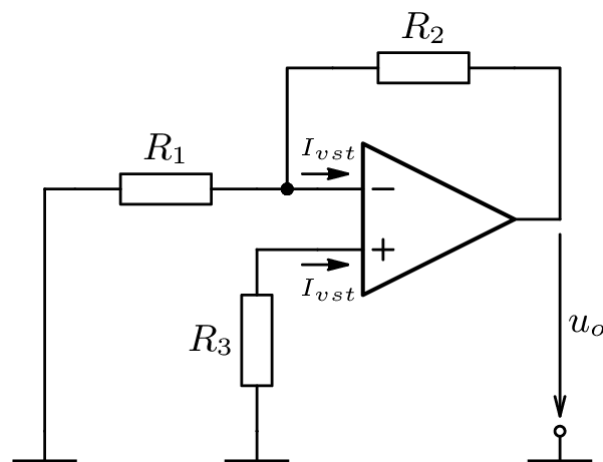
- vnitřní odpor zdroje vstupního napětí se neprojeví na zesílení – vůbec nevystupuje ve vztahu pro zesílení
- stále není řešen vliv chybových parametrů zesilovače

# Hlavní zdroje chyb



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

# Odstranění vlivu chyb OZ

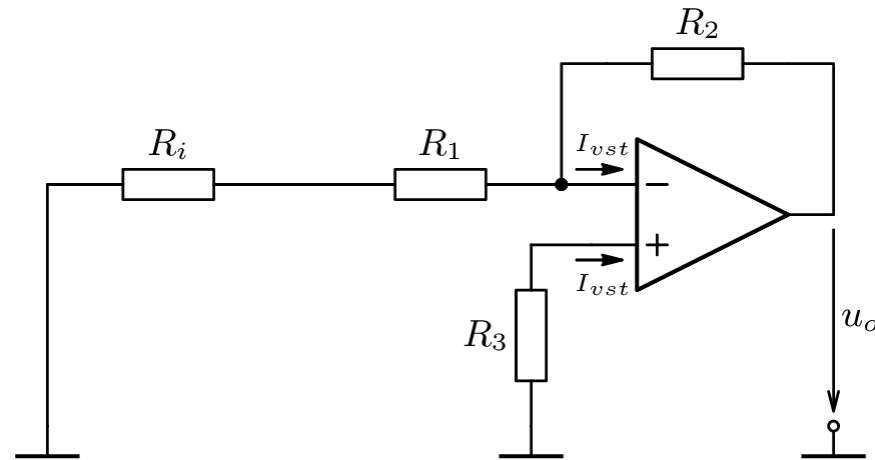


- vliv vstupního klidového proudu – potlačuje se nastavením stejné velikosti odporu v obou vstupech

$$R_3 = R_1 \parallel R_2 = \frac{R_1 R_2}{R_1 + R_2}$$

- kompenzace offsetu – nastavuje se dle výrobce OZ, např. odporovým trimrem

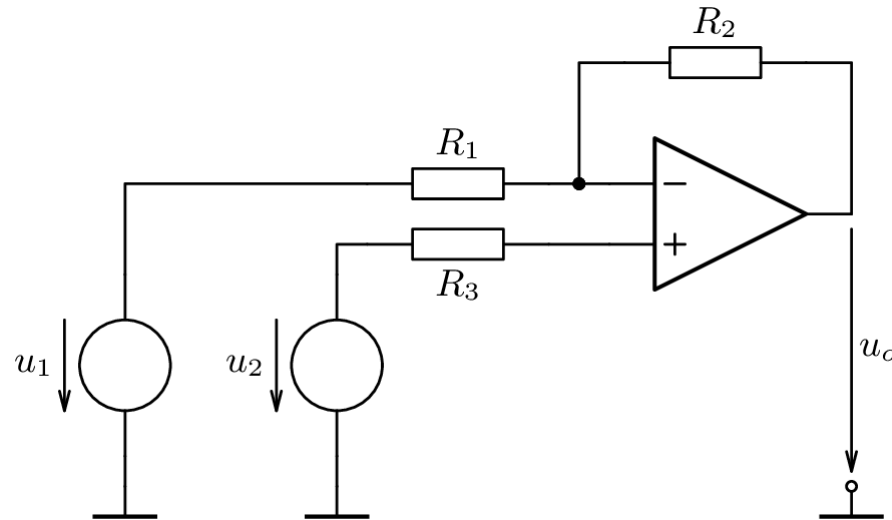
# Odstranění vlivu odporu zdroje



- Ize kompenzovat vliv vnitřního odporu zdroje signálu?



# Měření rozdílových signálů



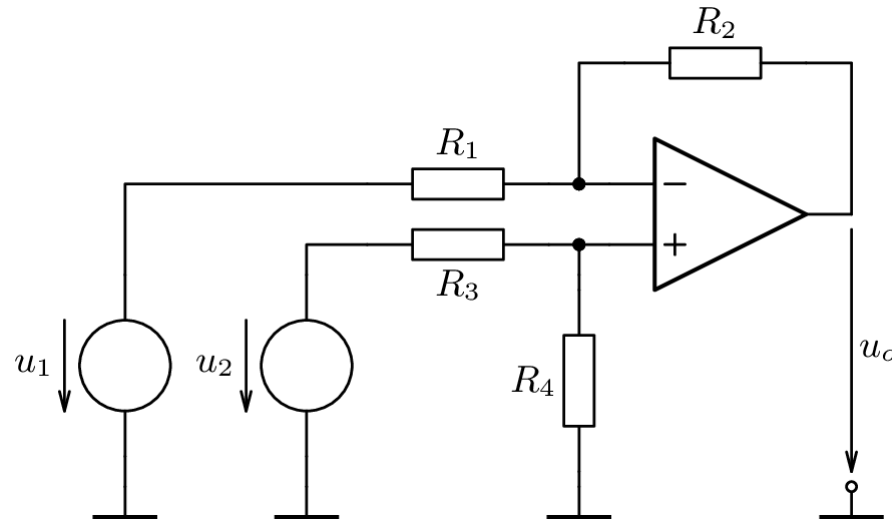
Jak lze zařídit měření rozdílových signálů?

- 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 souhlasného (common) a rozdílového (differential) napětí, odvodíme je ze vstupního napětí  $U_1$  a  $U_2$
- souhlasný signál jako střední hodnotu vstupních napětí

$$U_{CM} = \frac{U_1 + U_2}{2}$$

- rozdílový signál jako rozdíl vstupních napětí

$$U_{DIF} = U_2 - U_1$$

- potom platí, že

$$U_1 = U_{CM} - \frac{U_{DIF}}{2}$$

$$U_2 = U_{CM} + \frac{U_{DIF}}{2}$$

# 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 (i s ohledem na kompenzaci vstupních proudů)

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

- potom

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

$$A_{CM} = 0$$

- platí ale pouze pro dokonale přesné rezistory, což je v praxi obtížné splnit

# Potlačení souhlasné složky

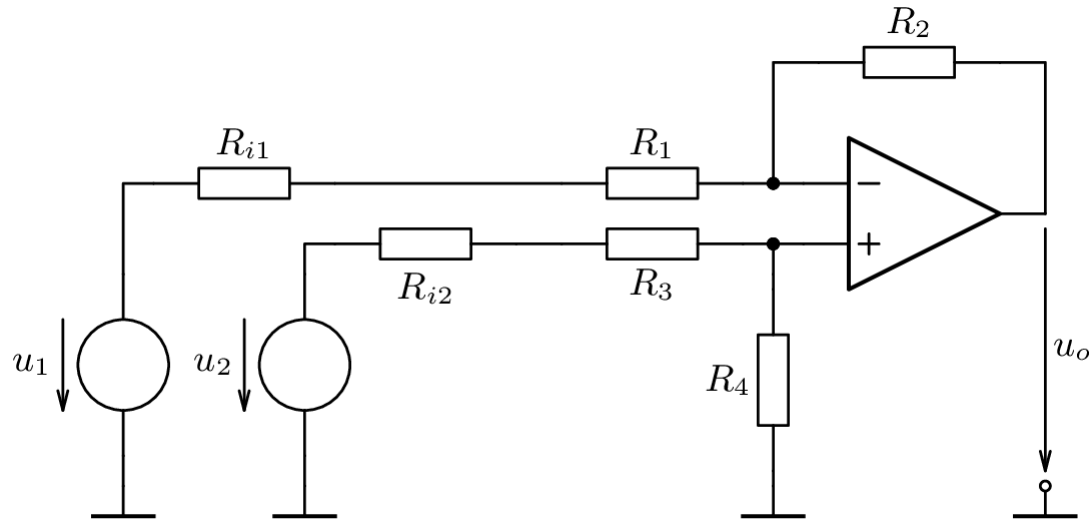
---

- 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 ( $A_{CM} = 0$ ) teoreticky nekonečný, **prakticky více než 80 dB (tj. 10000:1)**

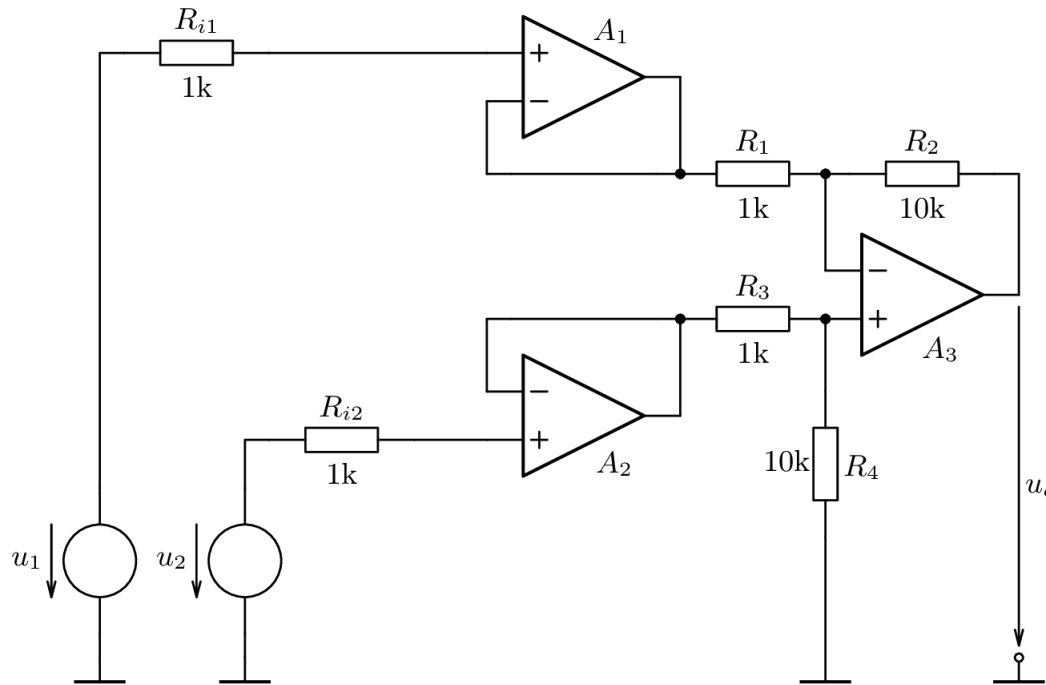
# Rozdílový zesilovač



- jaký je vliv  $R_{i1}$  a  $R_{i2}$  (reprezentují nedokonalé připojení snímacích elektrod)?
- liší se jejich vliv v invertující a neinvertující větvi?
- vadí více stejné nebo nestejně hodnoty  $R_{i1}$  a  $R_{i2}$  a proč?

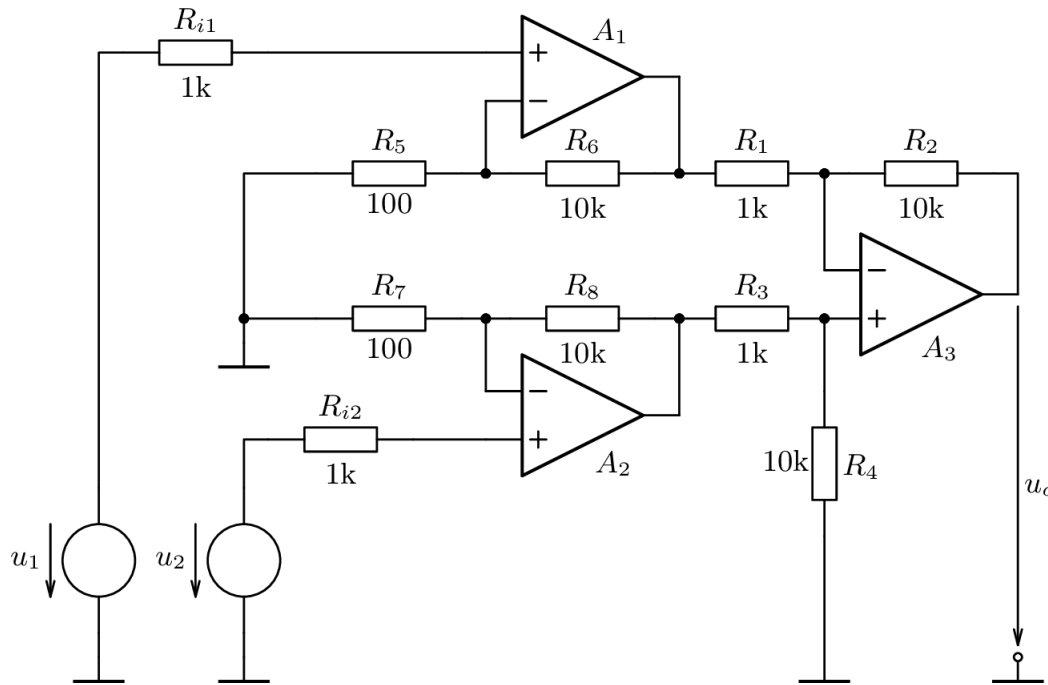


# Rozdílový zesilovač



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

# Rozdílový zesilovač

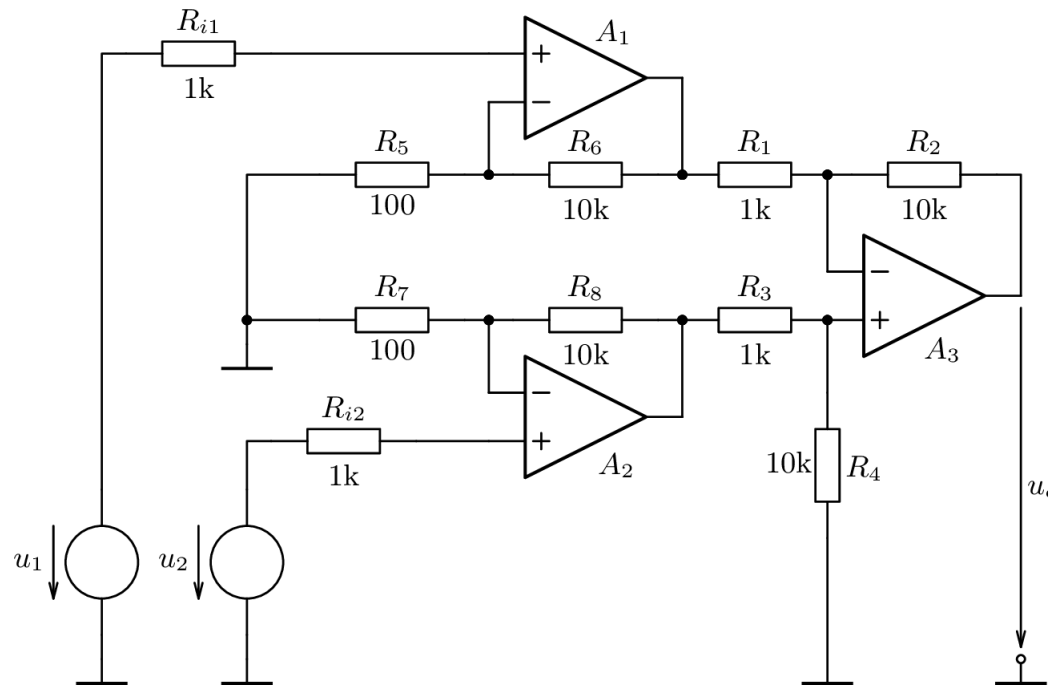


$$A_{A1} = 1 + \frac{R_6}{R_5}$$

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

- 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?

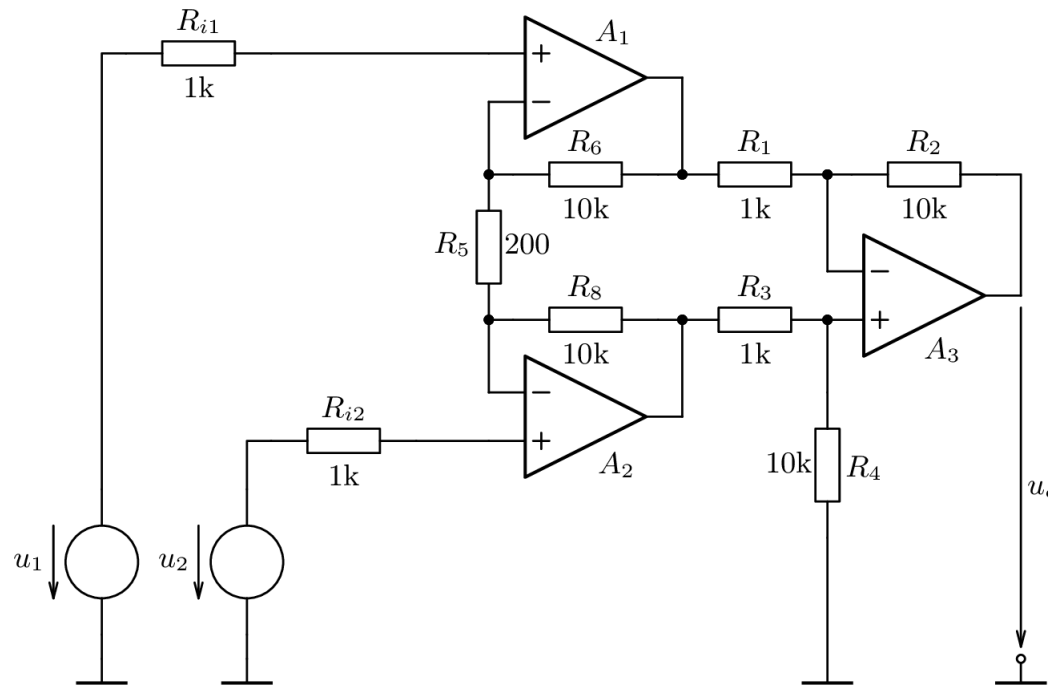
# Rozdílový zesilovač



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

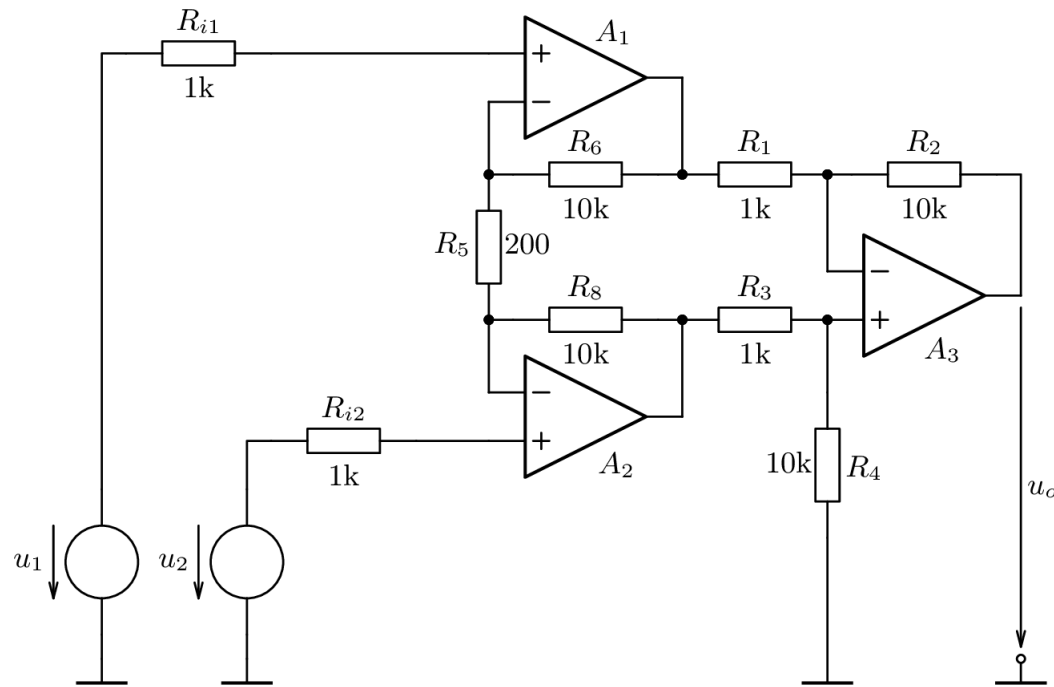
$$U_{OUT} = (U_2 - U_1) \left( 1 + \frac{R_6}{R_5} \right) \frac{R_2}{R_1}$$

# Přístrojový zesilovač



- elegantnější řešení, zesílení předzesilovacích stupňů lze ovládat jedním prvkem  $R_5$ , který nahrazuje sériovou kombinaci  $R_5$ ,  $R_7$
- to usnadňuje přepínání rozsahů a plynulou regulaci zisku

# Přístrojový zesilovač

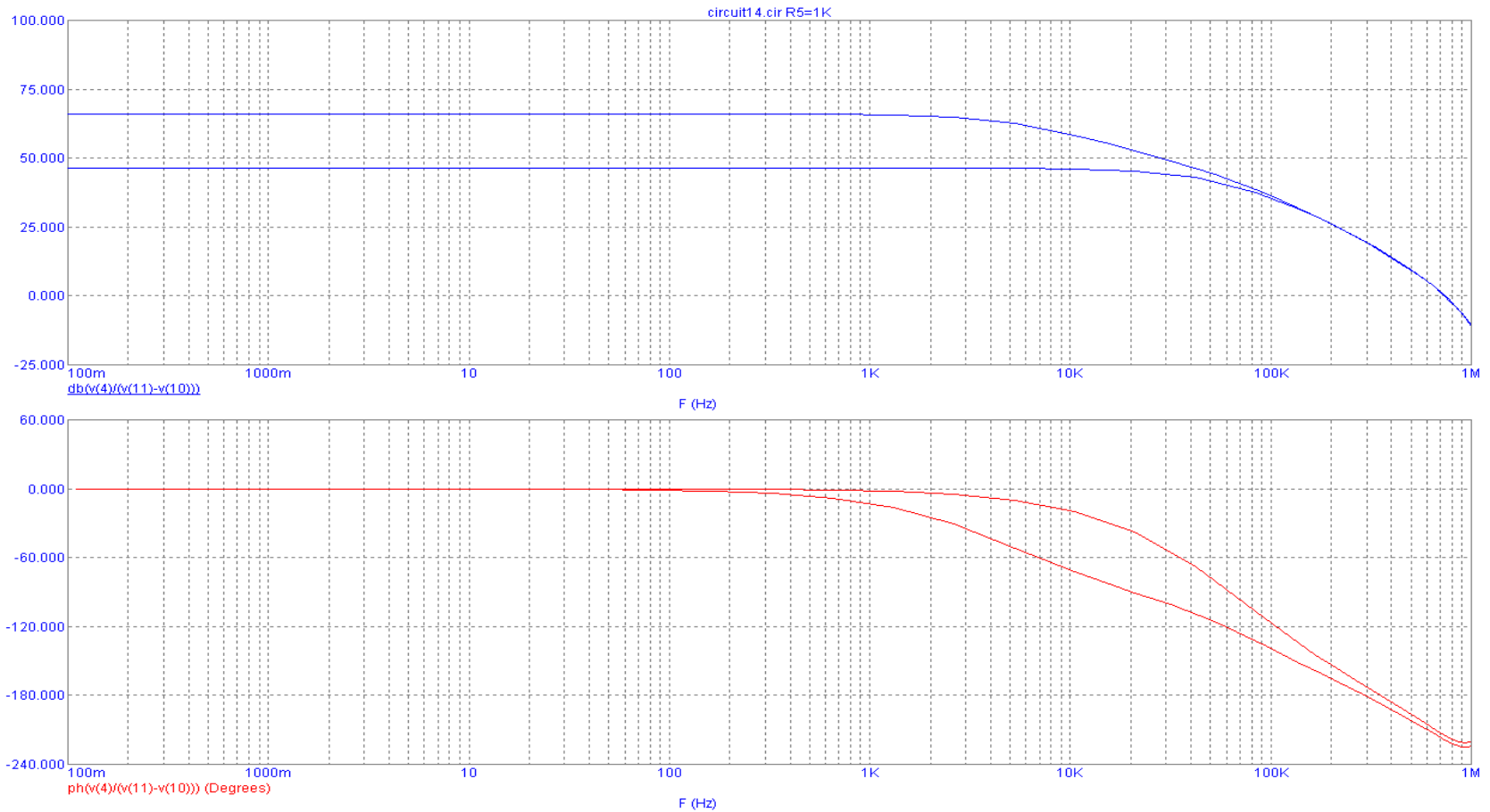


- výstupní napětí při  $R_1 = R_3$ ,  $R_2 = R_4$ ,  $R_6 = R_8$

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

# Přístrojový zesilovač

frekvenční charakteristiky pro zesílení 200 a 2 000



# Přístrojový zesilovač

přístrojový zesilovač Analog Devices AD620

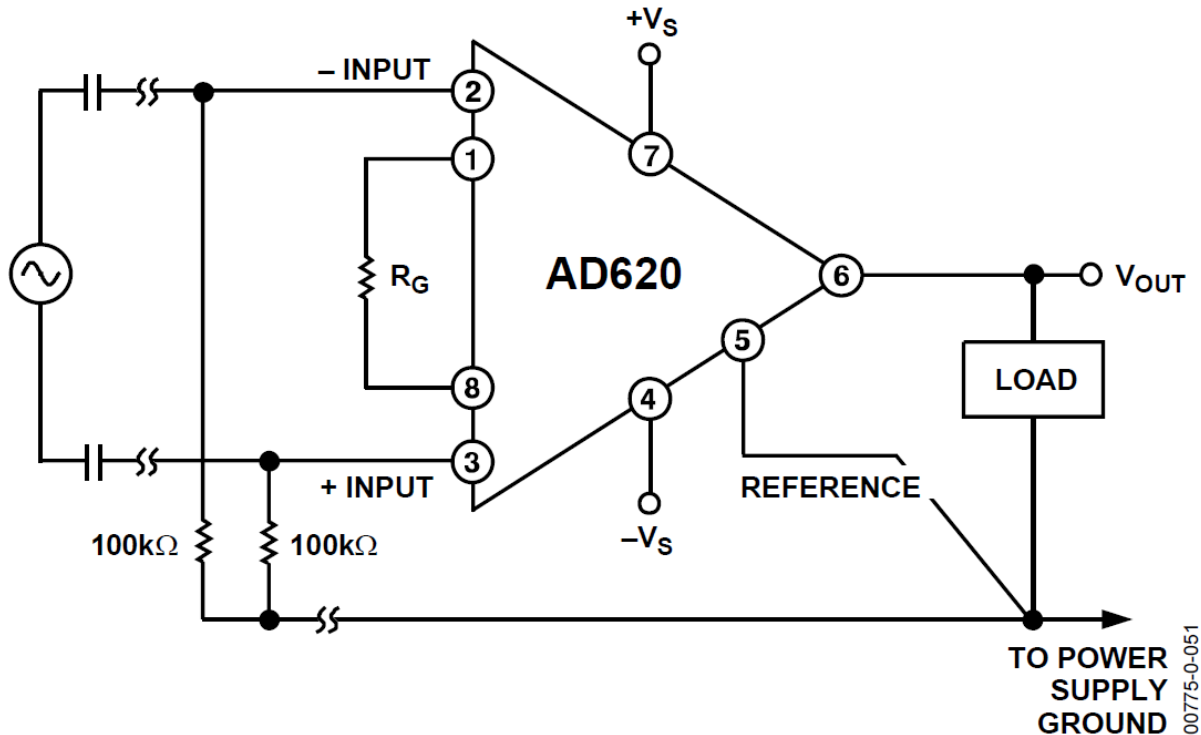
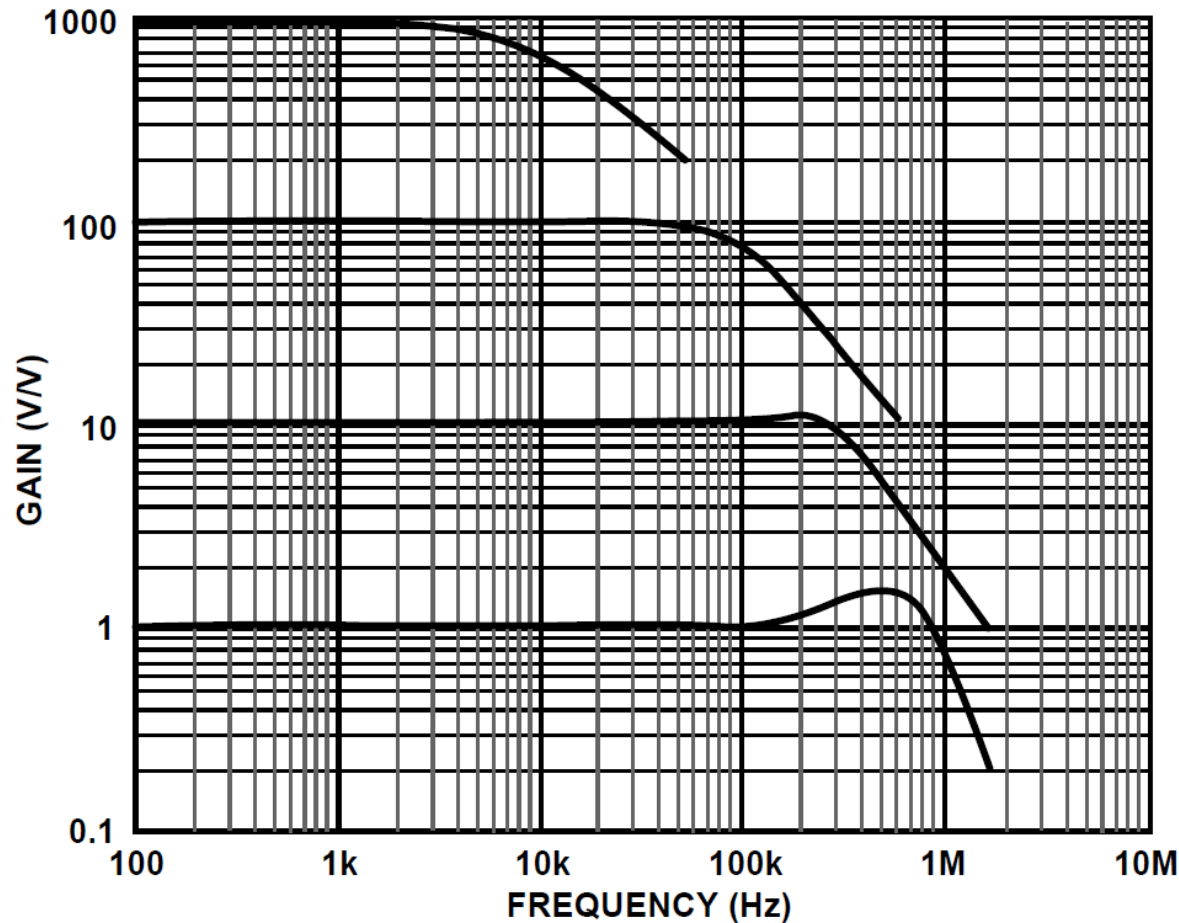


Figure 49. Ground Returns for Bias Currents with AC-Coupled Inputs

# Přístrojový zesilovač

frekvenční charakteristiky AD620 pro různá zesílení



00775-0-019

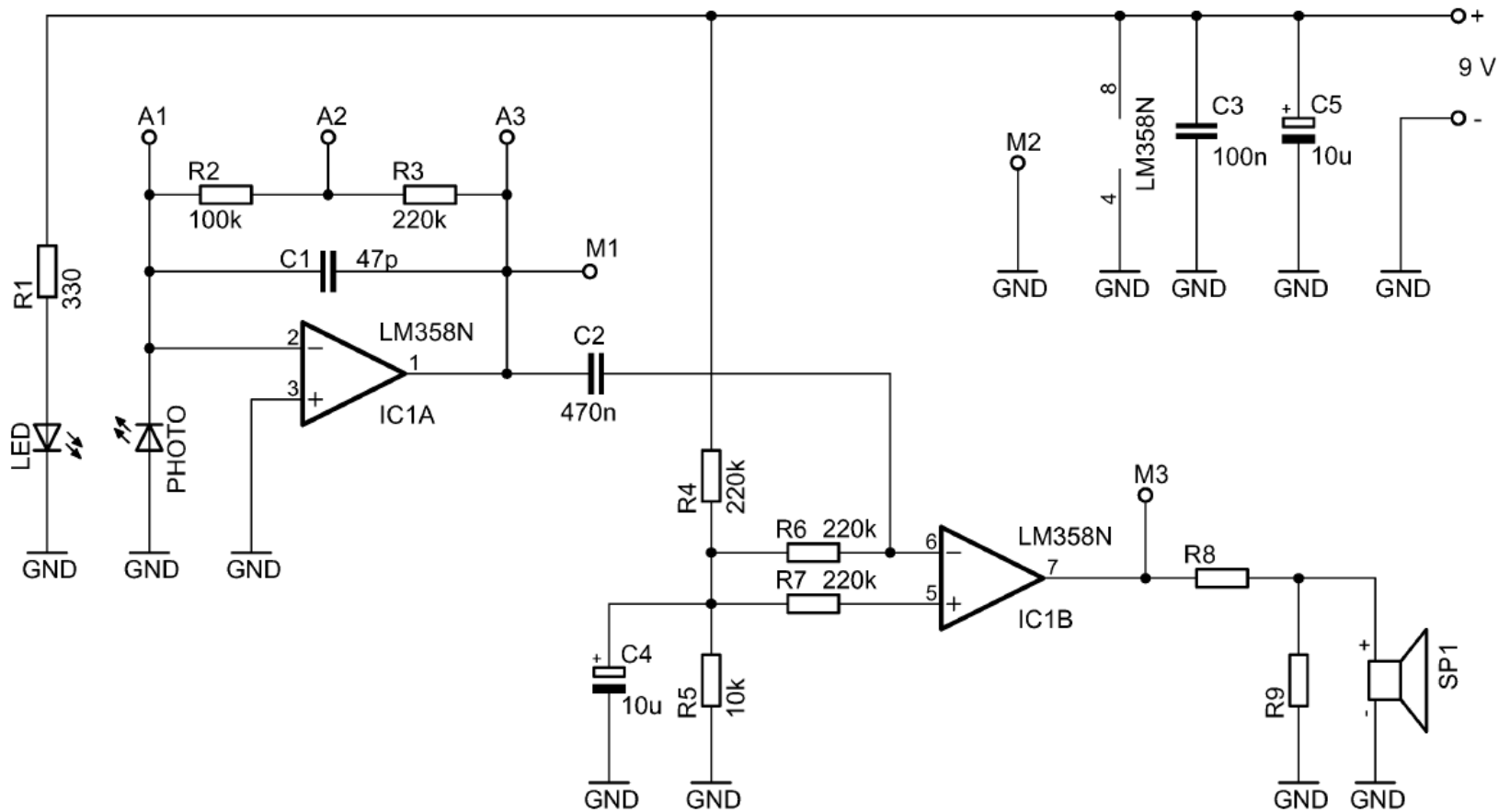


# PPG - Photoplethysmograph

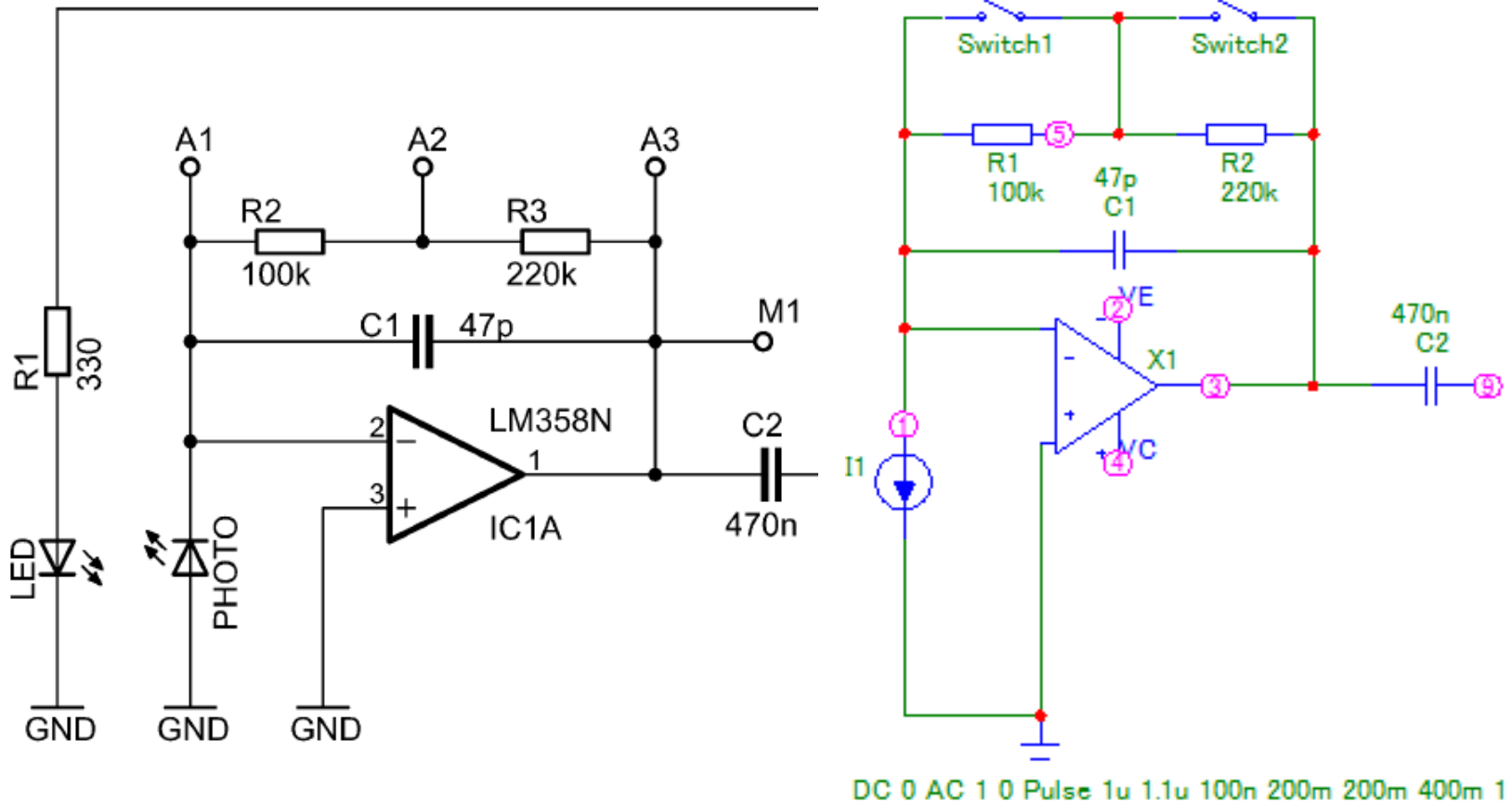
---

- obecně je pletysmografie měřením změn objemu tkáně např. vlivem dýchání nebo průtoku krve
- optická pletysmografie je využívána např. v pulsní oxymetrii, tj. při měření kyslíkové saturace, měříme změnu odrazu světla od tkáně na dvou vlnových délkách, pro červené a infračervené záření (kolíček na prstu ruky)
- odraz se liší v závislosti na prokrvení tkáně dle tepu a barvě krve dle okysličení
- dále popsaný fotoplethysmograf měří na jedné vlnové délce, tj. zaznamenává pouze tep

# PPG - Photoplethysmograph



# PPG - Photoplethysmograph



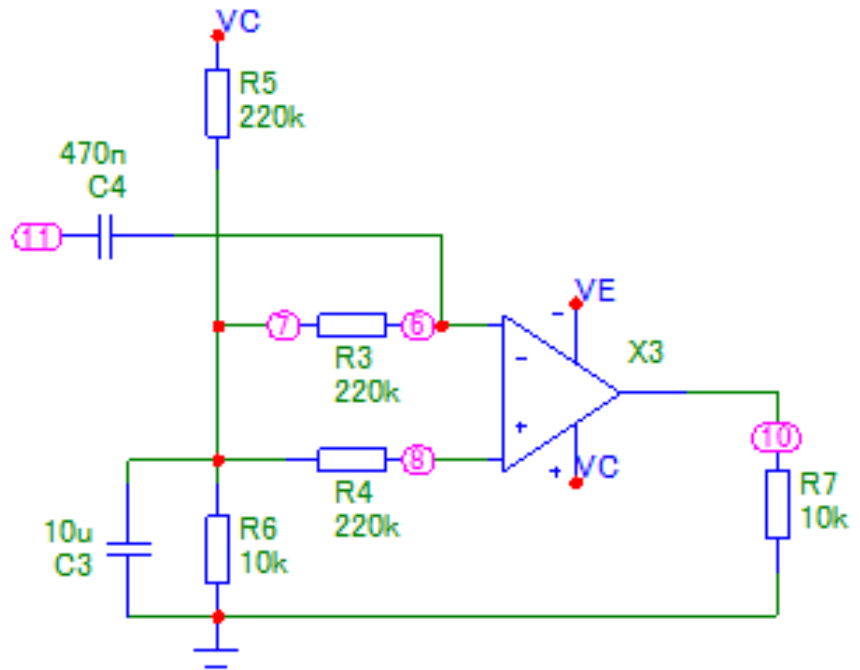
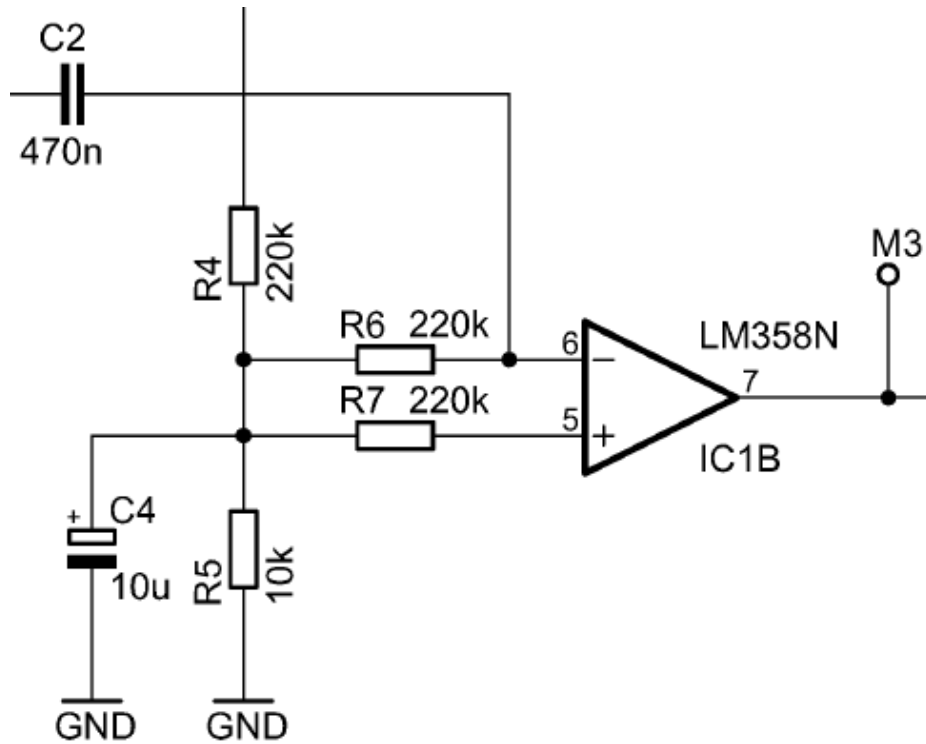
skutečné zapojení s optickým snímačem a schéma pro simulaci

# PPG - Photoplethysmograph

---

- optický snímač – pár infračervené LED a fotodiody v hradlovém režimu, při osvětlení dodává proud
- fotodioda citlivá v infračervené oblasti omezuje vliv okolního osvětlení
- proud je v obvodu operačního zesilovače převáděn na napětí, strmost převodní charakteristiky je určena přepínáním odporů ve zpětné vazbě (100 k $\Omega$ , 220 k $\Omega$ , 320 k $\Omega$ )
- kondenzátor ve zpětné vazbě zlepšuje stabilitu zapojení
- pro simulaci je optický snímač modelován zdrojem proudu

# PPG - Photoplethysmograph



skutečné zapojení výstupní části a schéma pro simulaci

# PPG - Photoplethysmograph

---

- střídavá složka napětí vstupního obvodu je přivedena na vstup invertujícího komparátoru
- stejnosměrně jsou oba vstupy komparátoru na stejném napětí, posunutém do pracovního rozsahu operačního zesilovače děličem
- výstup lze sledovat na měřicím bodu a akusticky je indikován připojeným piezoměničem (sirénkou, píská při připojení napájecího napětí), předřadný odpor příp. dělič omezuje hlasitost tónu
- použitý operační zesilovač LM358A vyžaduje pouze jedno napájecí napětí +3 V až +32 V (lze i dvojitě  $\pm 1,5$  V až  $\pm 16$  V), napětí na vstupech 0 až  $U_{cc} - 1,5$  V

# 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](http://www.analog.com/static/imported-files/data_sheets/AD620.pdf) [online, 3/2017]
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. Návod na laboratorní cvičení A6M31LET - Lékařská technika, Praha, 2017
7. Datasheety [www.ti.com/lit/gpn/lm2904](http://www.ti.com/lit/gpn/lm2904) [online, 3/2017]