



Aktivní součástky

Operační zesilovač

Vyučující:

Zdeněk Plíva

e-mail: zdenek.pliva@tul.cz

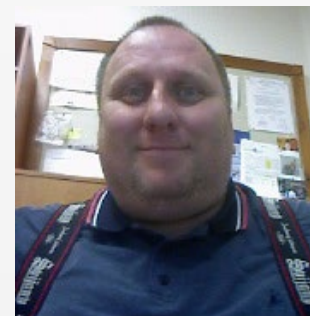
3536



Miroslav Holada

Leoš Petržílka

...



Přehled témat

- Operační zesilovač
- Vybrané senzory
- (práce s operačními zesilovači)

Operační zesilovač (OPAMP)

Operační zesilovač (OZ) je univerzální stejnoseměrný zesilovač se 2 vstupy, obvykle integrovaný z mnoha tranzistorů (až 4 OZ v 1 pouzdře).



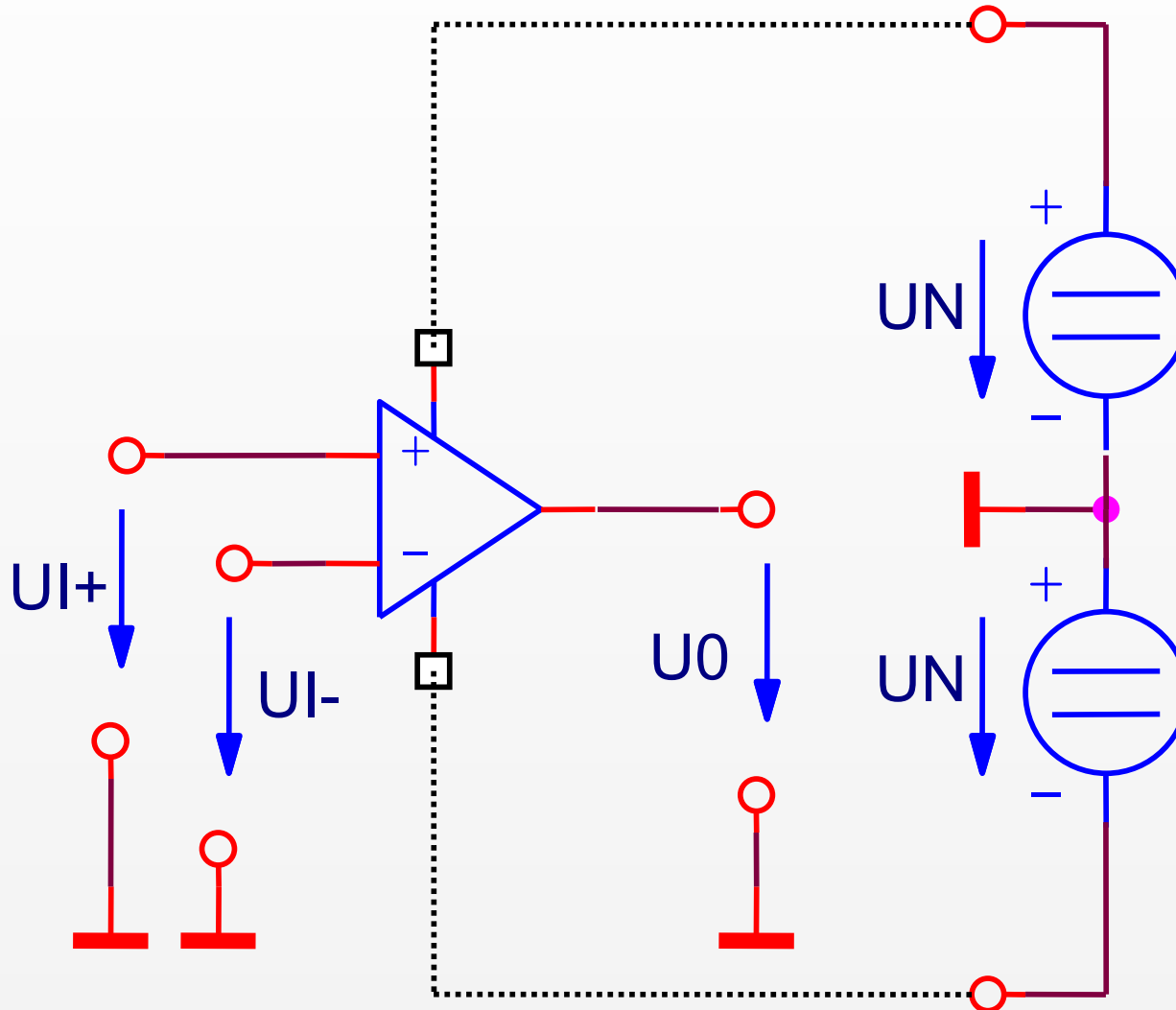
Původně používané v analogových počítačích (vojenství, teorie řízení)

Vstupy:

neinvertující (označen $+$) a *invertující* (označen $-$)
s odpovídajícím znaménkem přenosu napětí na výstup

OZ mají takové parametry, že vlastnosti obvodů zapojených s nimi jsou určeny především vlastnostmi vnějších obvodových prvků (operační síť).

Operační zesilovač (bez ZV = komparátor)



Operační zesilovače



$$U_O = A_{u0} (U_{I+} - U_{I-})$$

- platí pouze v lineárním režimu, kdy je výstupní napětí $|U_O|$ menší než maximální možné $|U_{OM}|$
- obecně rozdílná napětí $|U_{OM+}|$ (kladná saturace) ev. $|U_{OM-}|$ (záporná saturace) jsou o 1 V až 3 V nižší než příslušné napájecí napětí $|+U_N|$ resp. $|-U_N|$.
- Operační zesilovač je tedy *zdroj napětí řízený rozdílem vstupních napětí*.

Operační zesilovač



Napájení OZ

- pro bipolární signály **symetrické** se středem (společný vodič), vůči kterému jsou signály vztaženy
- pův. signály v automatizaci v rozsahu $\pm 10\text{ V}$ \Rightarrow stand. napájení $\pm 15\text{ V}$ (vzhledem k nemožnosti zpracovat vstupní napětí v rozsahu napájení a úbytkům na výstupu)
- s bateriovým napájením se rozšiřují zesilovače **rail-to-rail**, rozsah vstupu a/nebo výstupu shodný s napájecím napětím

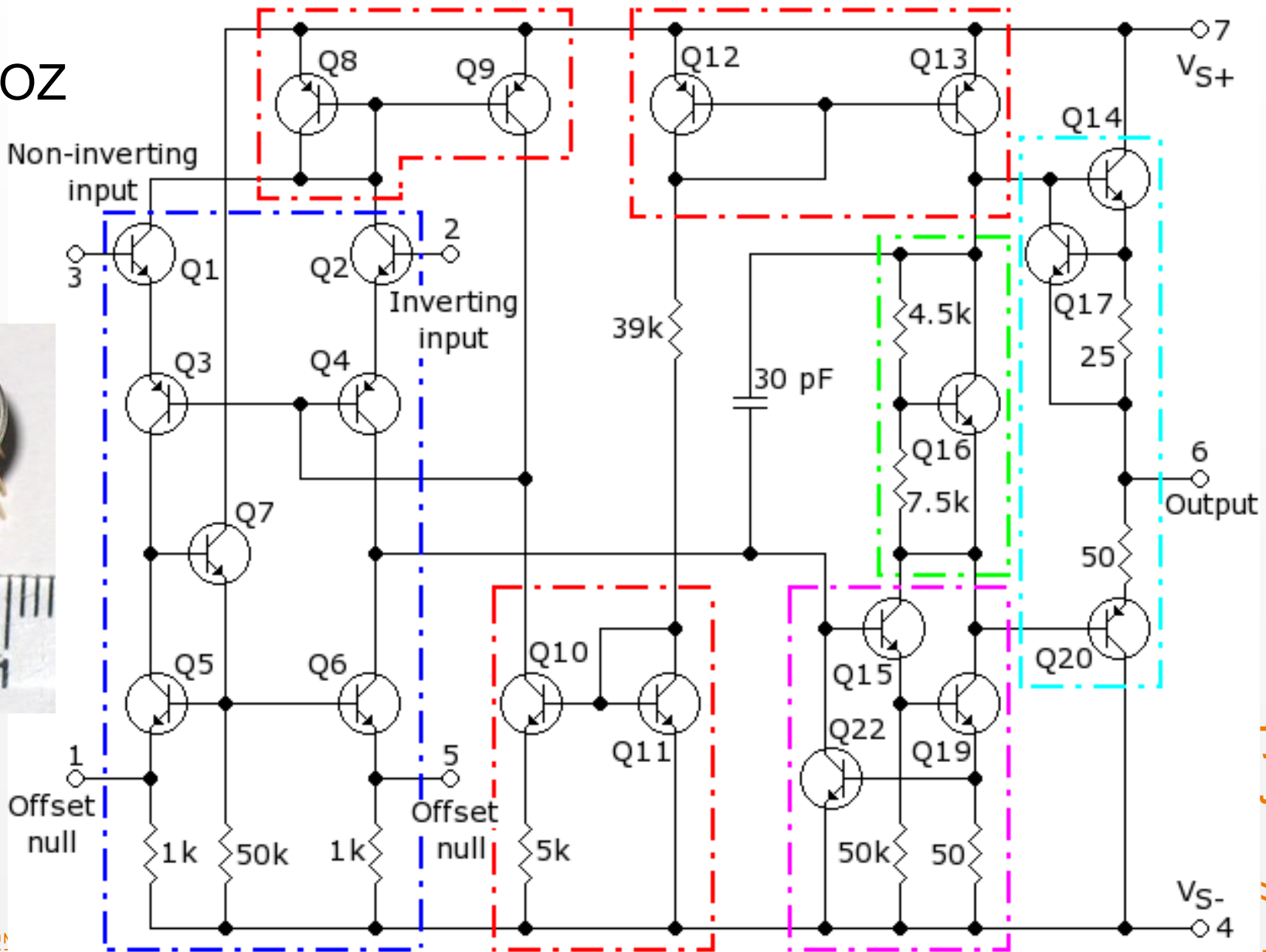
$$-U_N \leq U_I \leq +U_N$$

$$-U_{OM-} \rightarrow -U_N, \quad U_{OM+} \rightarrow +U_N$$

- **jedno** napájecí napětí $+5\text{ V}$ popř. $+3\text{ V}$

Operační zesilovače

Reálný OZ
typ 741



Operační zesilovač



Ideální operační zesilovač:

- napět'ové zesílení (otevřené smyčky) $A_{u0} \rightarrow \infty$
- vstupní odpor (Input) $R_i \rightarrow \infty$ resp. nulový vstupní proud I_i
- výstupní odpor (Output) $R_o \rightarrow 0$
- Často se uvádí okamžitá odezva výstupu na vstup nebo nulový fázový posun mezi vstupním a výstupním signálem, což lze též zapsat jako šířka pásma (Band Width) $BW \rightarrow \infty$ resp. horní mezní kmitočet $f_h, f_T \rightarrow \infty$

≡ okamžitá odezva výstupu na vstup

≡ nulový fázový posun mezi vstupním a výstupním signálem

Operační zesilovače



Reálný operační zesilovač:

- napěťové zesílení velké
- vstupní odpor velký (~10 nA u bipol. op-amps, nebo pA u CMOS)
- výstupní odpor malý
- frekv. char. směrem k nízkým kmitočtům neomezená
- frekv. char. směrem k vysokým kmitočtům omezená

Reálné operační zesilovače

– oproti ideálnímu OZ mají chyby

Statické chyby

aditivní chyby (chyba nuly, posun nuly, ofset)

vstupní napěťová nesymetrie

U_{I0}

= abs. hodnota napětí, které by bylo nutno přivést mezi vstupy, aby výstupní napětí bylo nulové

vstupní klidový proud

I_{IB}

- vyvolává chybu úbytkem napětí na odporech, pokud nejsou na obou vstupech shodné

činitel potlačení souhlasného signálu

CMR (Common Mode Rejection) [dB]

vliv potenciálu obou vstupu vůči zemi

$$\text{CMR} = 20 \log \frac{U_{\text{CM}}}{\Delta U_{I0}}$$

U_{CM} = souhlasný signál při vstupu ΔU_{I0}

multiplikativní chyba (chyba zisku, chyba rozsahu)

- odchylka od teoretického zesílení zesilovače vlivem konečného zesílení OZ

Operační zesilovače

Typické hodnoty:

$$\square U_o \approx 10 \text{ V}$$

$$\square A_{u0} \approx 10^5$$

Vstupní rozsah v lineárním režimu pro tyto hodnoty

$$\Delta U_i \approx 0,1 \text{ mV} \quad (\text{jinak SATURACE})$$

nelze tedy v tomto režimu OZ bez ZZV prakticky použít.

Bez ZV se hodí jako **komparátor** dvou napětí, jehož funkci můžeme vyjádřit :

$$U_o = U_{OM+} \quad \text{při} \quad U_{i+} > U_{i-}$$

$$U_o = U_{OM-} \quad \text{při} \quad U_{i+} < U_{i-}$$

Řazení funkčních bloků

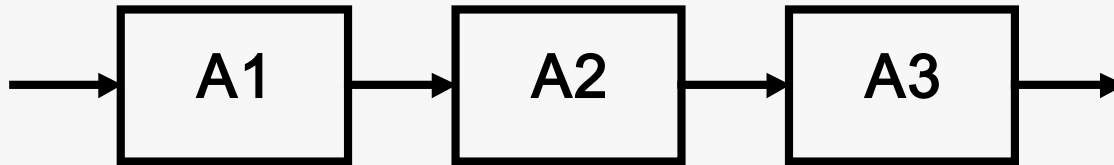
kaskádní zapojení

- přímý přenosový řetězec

- nelineární přenosovou funkci bloku je možno linearizovat dalším blokem

s *inverzní* funkcí

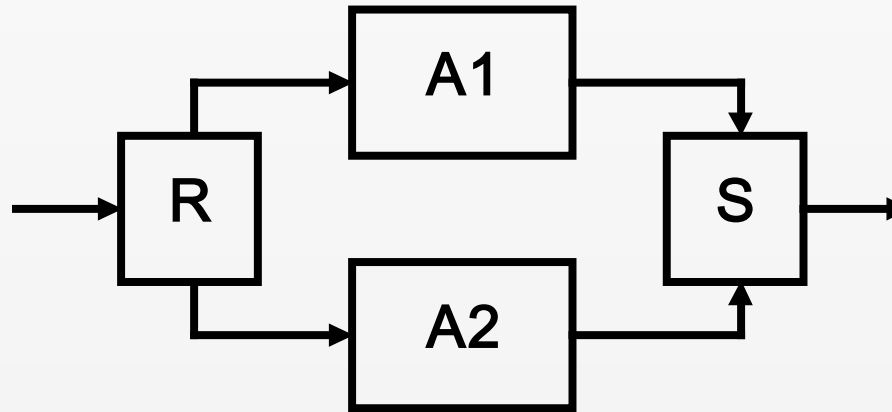
- pro lineární bloky:
$$A_u = \prod_{i=1}^n A_{ui}$$



Řazení funkčních bloků

paralelní zapojení

- rozdělovací (R) a slučovací (S) obvod (dvojbran) :
 - paralelní* – rozděluje resp. sčítá proudy
 - sériový* – rozděluje resp. sčítá napětí
- např. oddělené zpracování dílčích kmitočtových pásem
nebo kladné a záporné amplitudy signálu
(přesné usměrňovače, výkonové stupně push-pull)



Řazení funkčních bloků

zpětnovazební zapojení

= paralelní řazení cest

s přenesením části výstupního signálu do vstupního slučovacího obvodu

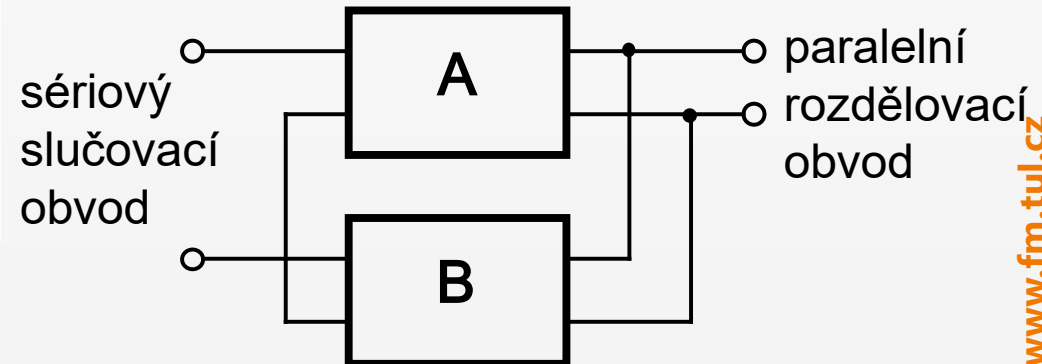
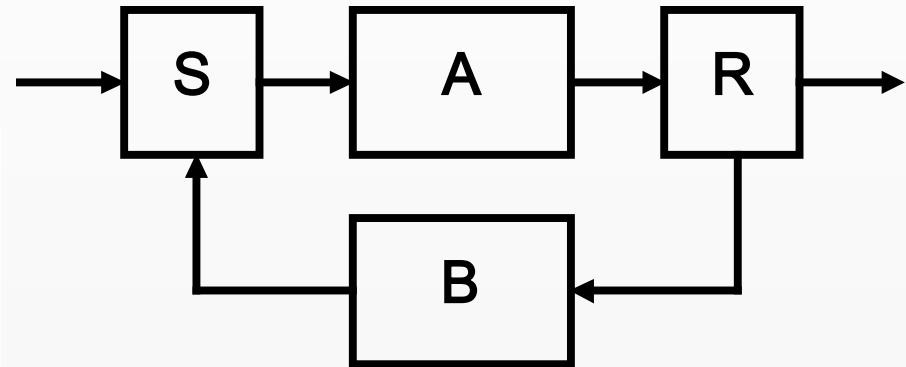
Obvyklé zapojení dvojbranů do zpětné vazby (ZV):

Blok **A**

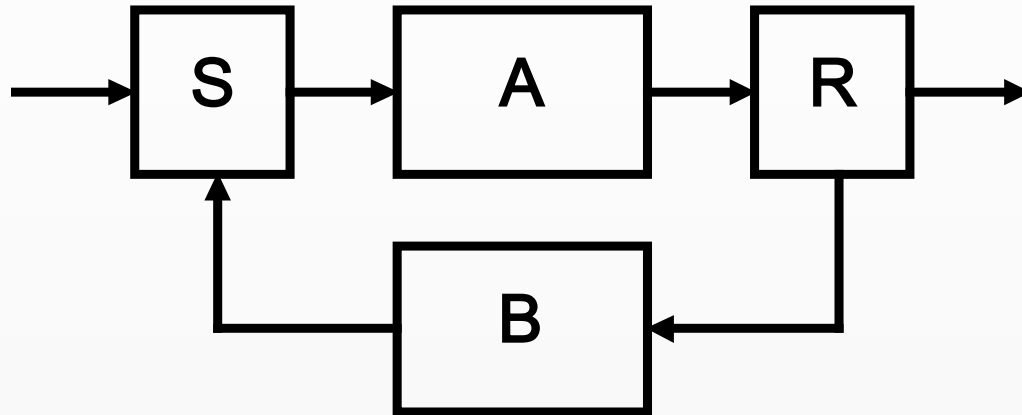
obv. unilaterální zesilovač (t.j. bez zpětného přenosu) se zesílením A_u

Blok **B**

obv. pasivní obvod (např. pouhý odporový dělič) s *činitelem zpětné vazby* (přenosem) β



Řazení funkčních bloků



β – činitel zpětné vazby

přenos otevřené
(rozpojené)
zpětnovazební smyčky

$$T = \beta A_u$$

Blackův vztah

$$A'_u = \frac{A_u}{1 - \beta A_u}$$

Vliv zpětné vazby (ZV)

Analýza Blackova vztahu při kmitočtově nezávislém β :

kladná zpětná vazba (KZV) při $T > 0$

$0 < T < 1$ – zesílení A' stoupá, ovšem na úkor zhoršení dalších param. (zkreslení aj.)

$T > 1$ – *nadkritická* KZV, obvod je nestabilní, probíhají tzv. regenerativní děje (kmity) vyžadující nelineární popis

OZ se ZZV



Záporná zpětná vazba (ZZV):

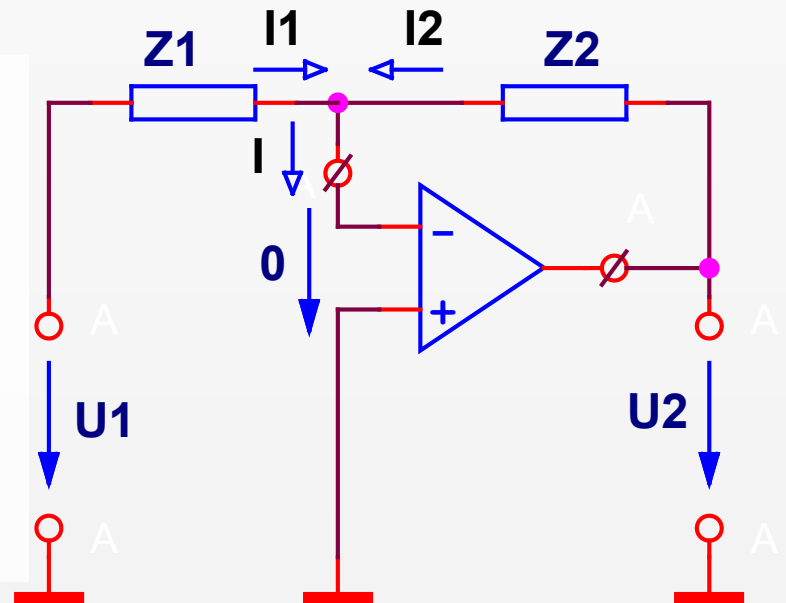
- Obrací fázi
- zmenšuje napěťové zesílení
- má vliv na vstupní a výstupní impedanci
- zmenšuje vliv změny parametrů součástek (stárnutí)
- zmenšuje nelineární zkreslení
- rozšiřuje kmitočtový rozsah zesilovače

Invertující zesilovače



- OZ je zapojen jako ***invertující operační zesilovač*** s jediným vstupem i výstupem.
- Impedance Z_1 a Z_2 jsou obecné (t.j. komplexní čísla), libovolně složité dvojpóly, složené z prvků R, L, C.
- Podle principu virtuální nuly – na invertujícím vstupu je nulové napětí; zároveň do něj neteče žádný proud ($R_1 \rightarrow \infty \Rightarrow I \rightarrow 0$), takže ani nevytéká z uzlu $Z1_Z2$. Podle Kirchhoffova zákona platí:

$$U_2 = - \frac{Z_2}{Z_1} U_1$$



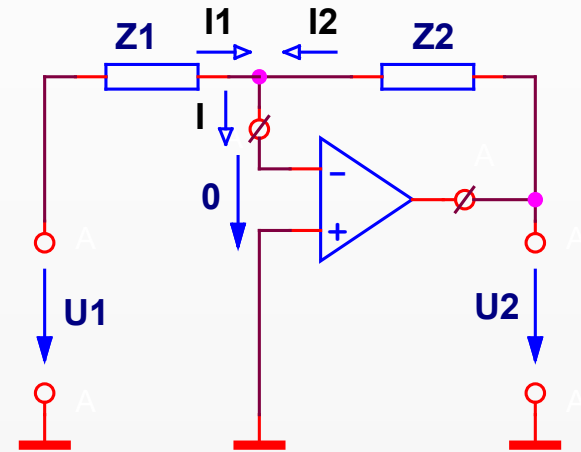
Invertující zesilovač



Představují-li impedance Z_i pouhé rezistory R_i , pak zesílení A_u tohoto invertujícího zesilovače

$$A_u = - \frac{R_2}{R_1}$$

(neplatí **po dosažení saturace**)



!!! nezávisí na parametru OZ A_{u0}

Zesiluje vstupní napětí a otáčí jeho fázi o 180° ($I_1 = -I_2$)

Speciální případ – invertor (pro $R_2 = R_1$ je $U_2 = -U_1$)

Jde vlastně o obvod s jediným vstupem

Neinvertující zesilovač

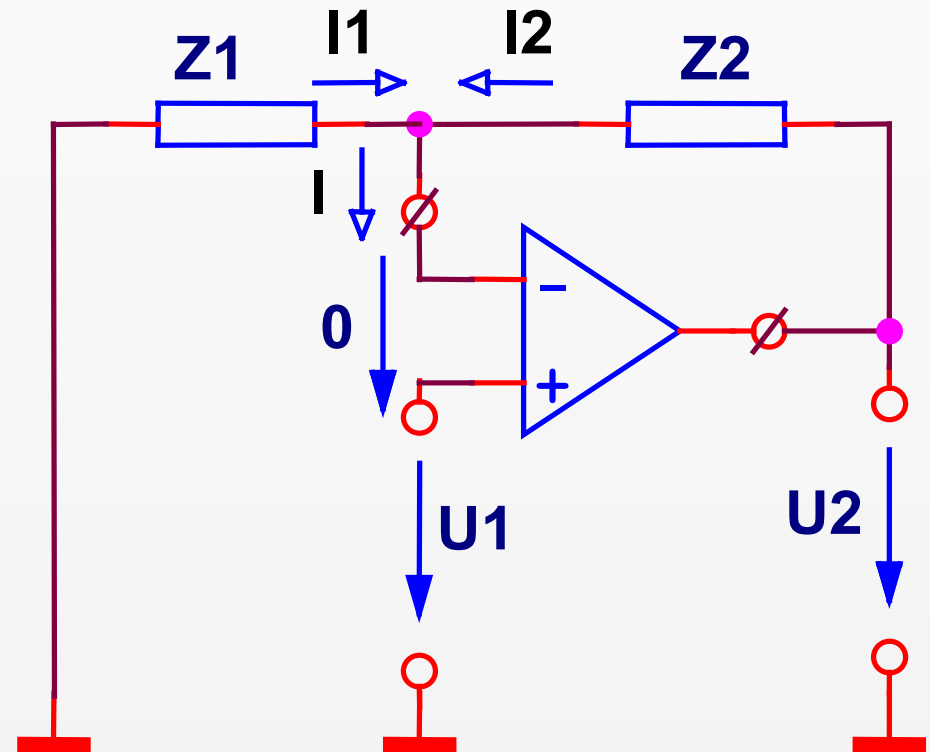


Druhým základním zapojením zesilovače s OZ je neinvertující zesilovač.

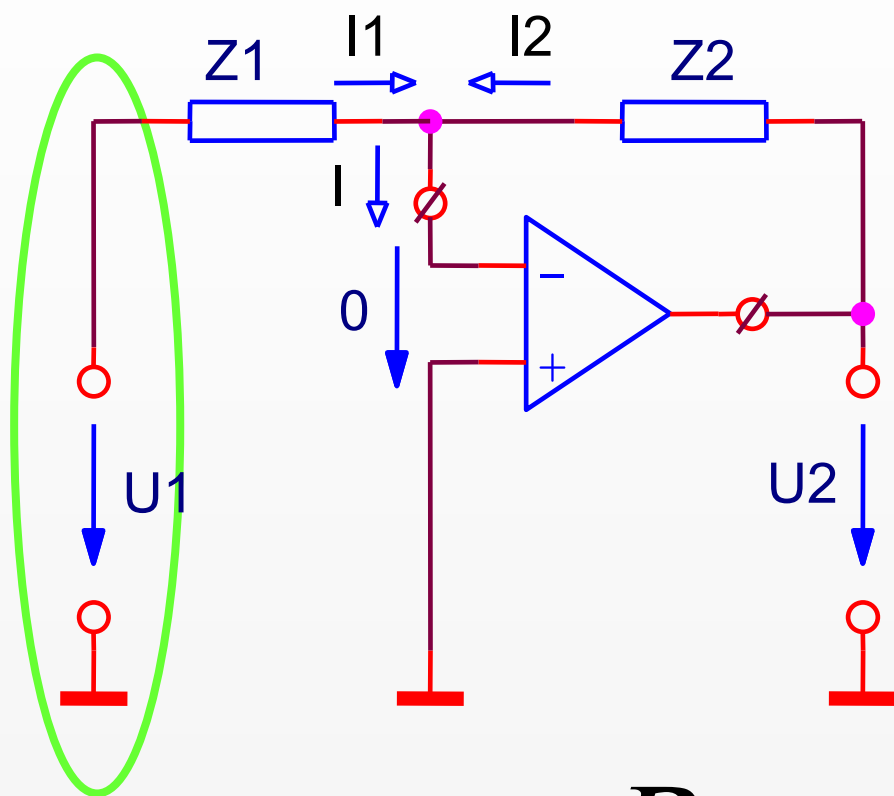
z rovnosti proudů $U_1/R_1 = (U_2 - U_1)/R_2$ vztah pro zesílení:

$$A_u = 1 + \frac{R_2}{R_1}$$

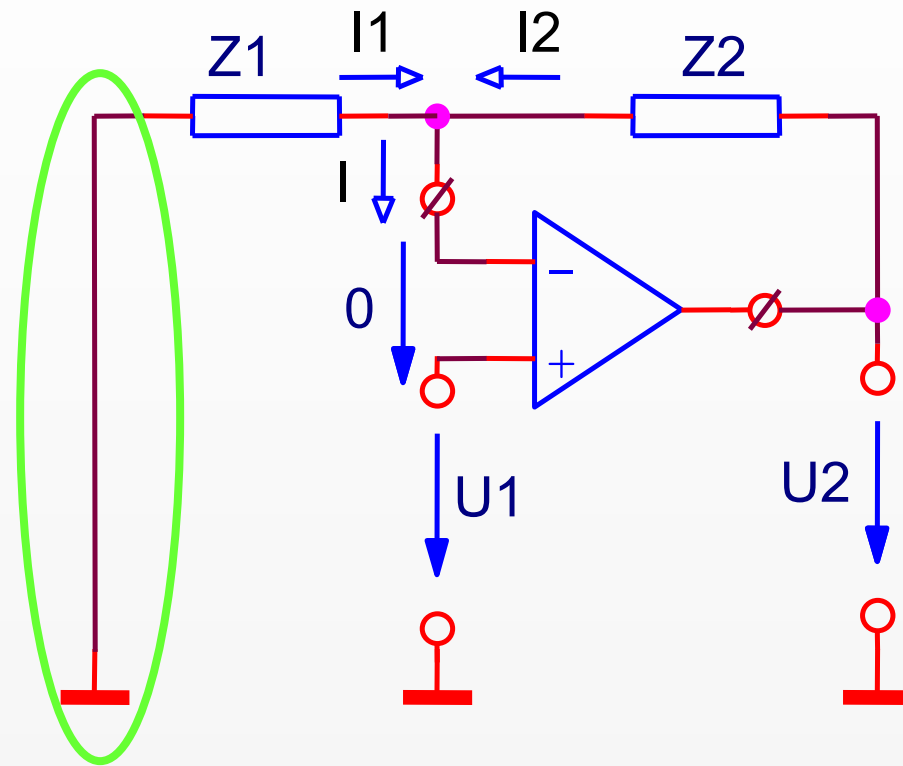
(opět: neplatí po dosažení saturace)



OZ se ZZV

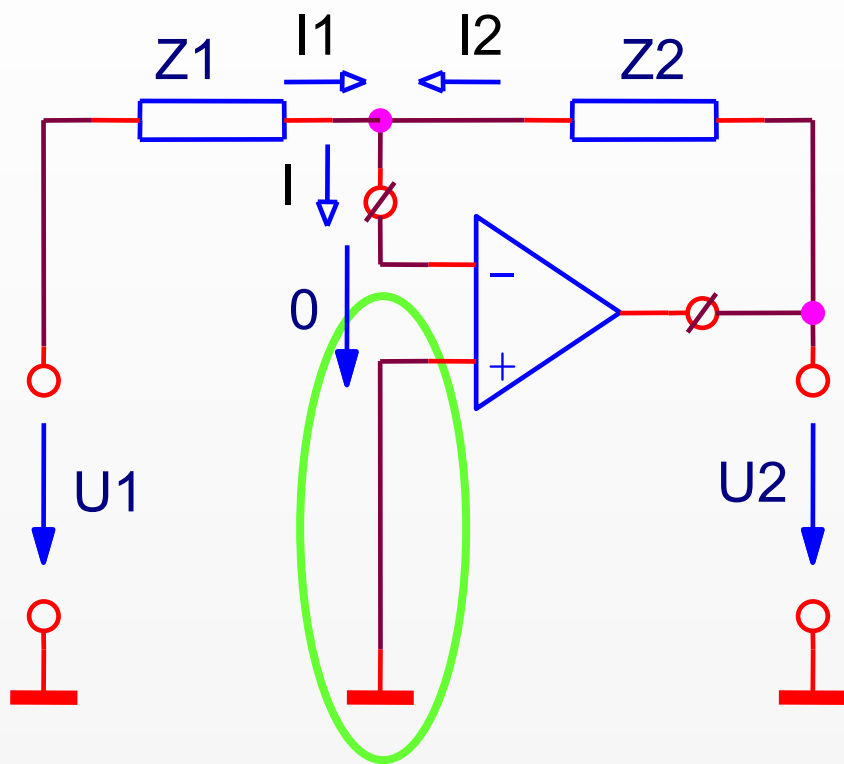


$$A_u = -\frac{R_2}{R_1}$$

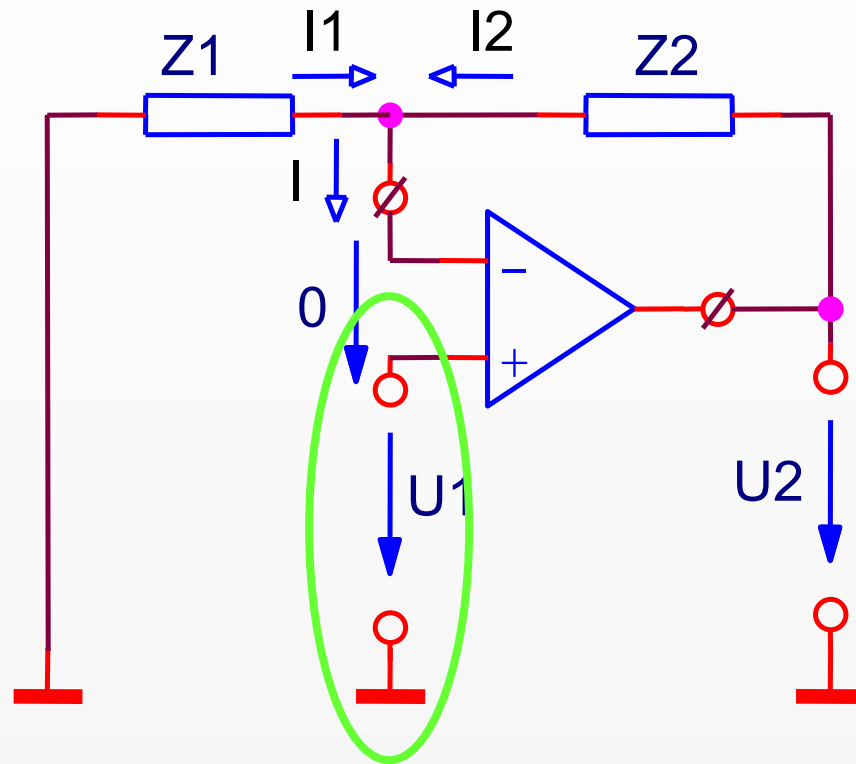


$$A_u = 1 + \frac{R_2}{R_1}$$

OZ se ZZV



$$A_u = -\frac{R_2}{R_1}$$



$$A_u = 1 + \frac{R_2}{R_1}$$

Zvláštní případy invert. zesilovače



převodník R/U

$$U_1 = U_{\text{REF}}, R_2 = R_x \text{ (prom.)}$$

$$U_2 = k R_x$$

$$U_2 = -\frac{R_2}{R_1} U_1$$

invertor

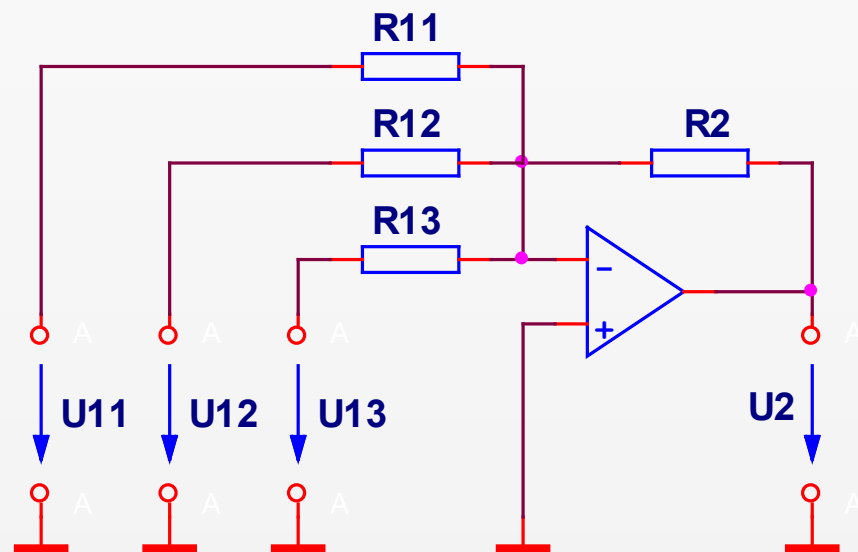
$$R_2 = R_1$$

$$U_2 = -U_1$$

sumační zesilovač

$$U_2 = -R_2 \sum_{i=1}^n \frac{U_{1i}}{R_{1i}}$$

(princip lineární superpozice)

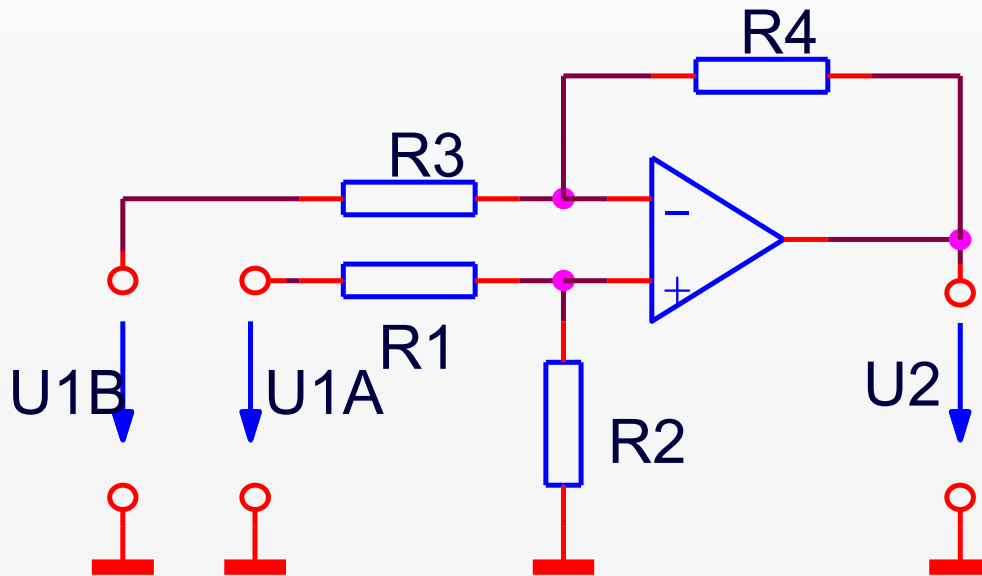


Diferenční zesilovač

$$R_{vst} = R_1 + R_2 = R_3 + R_4$$

Zesilovač se symetrickým vstupem
(nezesiluje souhlasné napětí)

$$U_2 = A_u (U_{1A} - U_{1B})$$



Obvykle
se volí:

$$R_1 = R_3$$

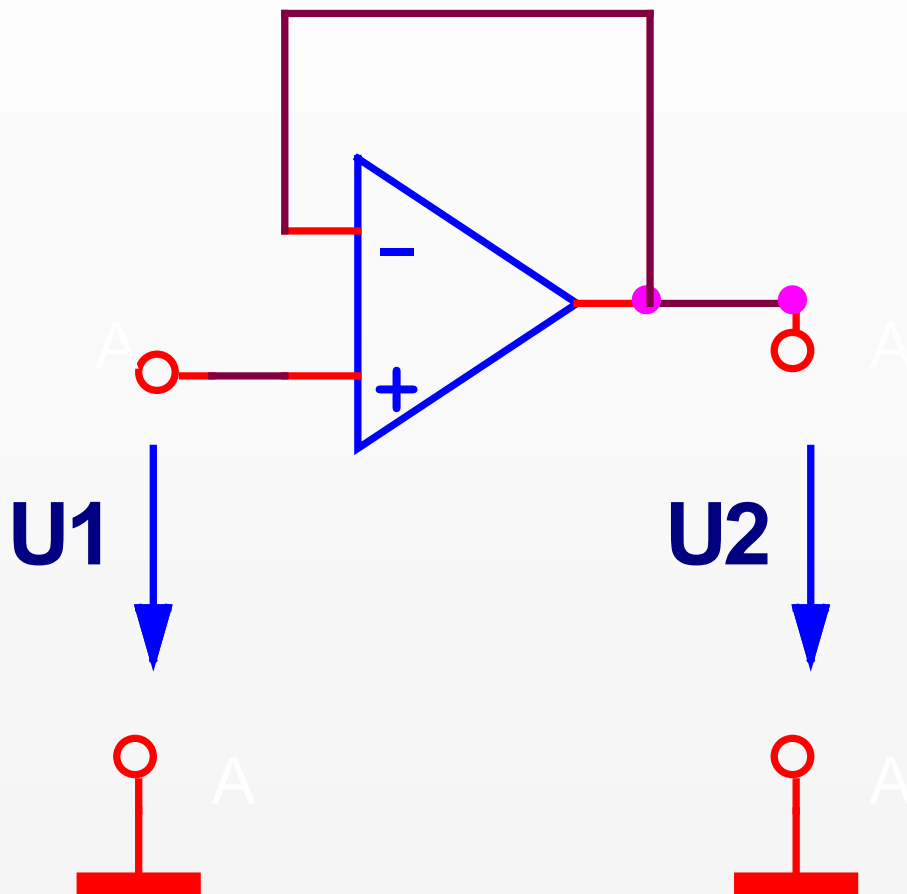
a

$$R_2 = R_4$$

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

Pro měřicí účely se používá dokonalejší zapojení - **přístrojový zesilovač**

Napět'ový sledovač



100 % ZZV: $U_2 = U_1$
impedanční oddělení

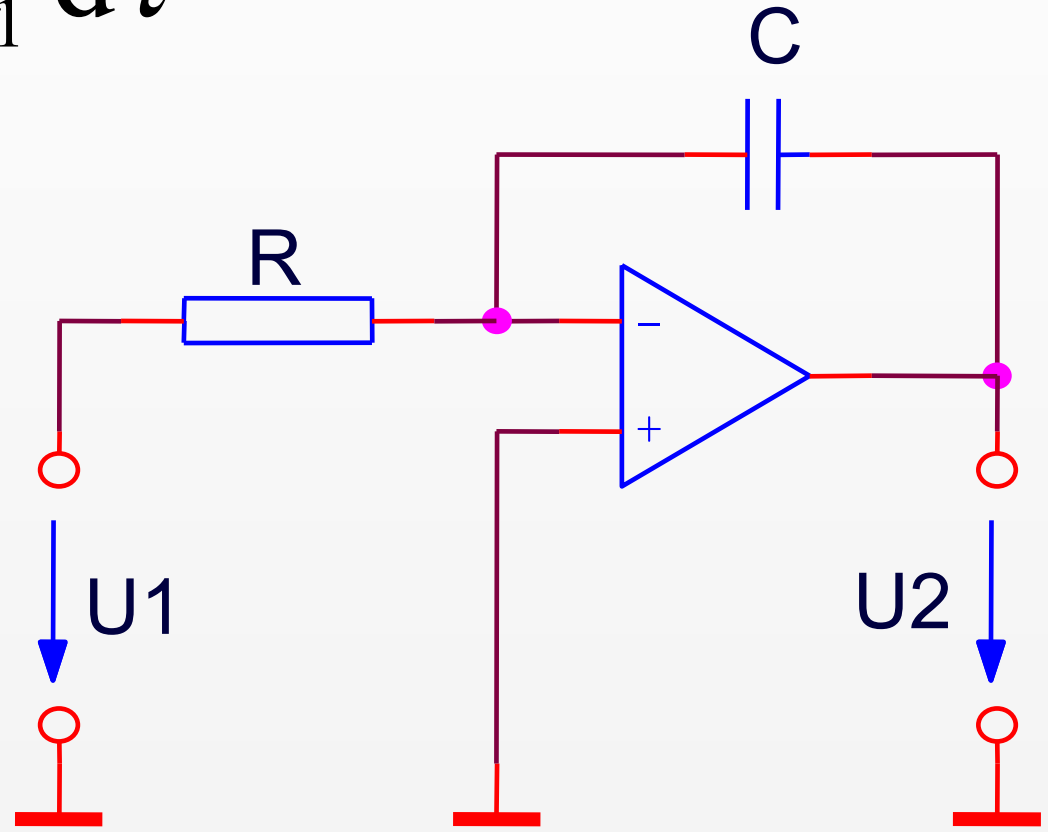
Integrátor



$$u_2 = -\frac{1}{RC} \int_0^t u_1 d\tau$$

$$u_2 = -\frac{t}{\tau} U_1$$

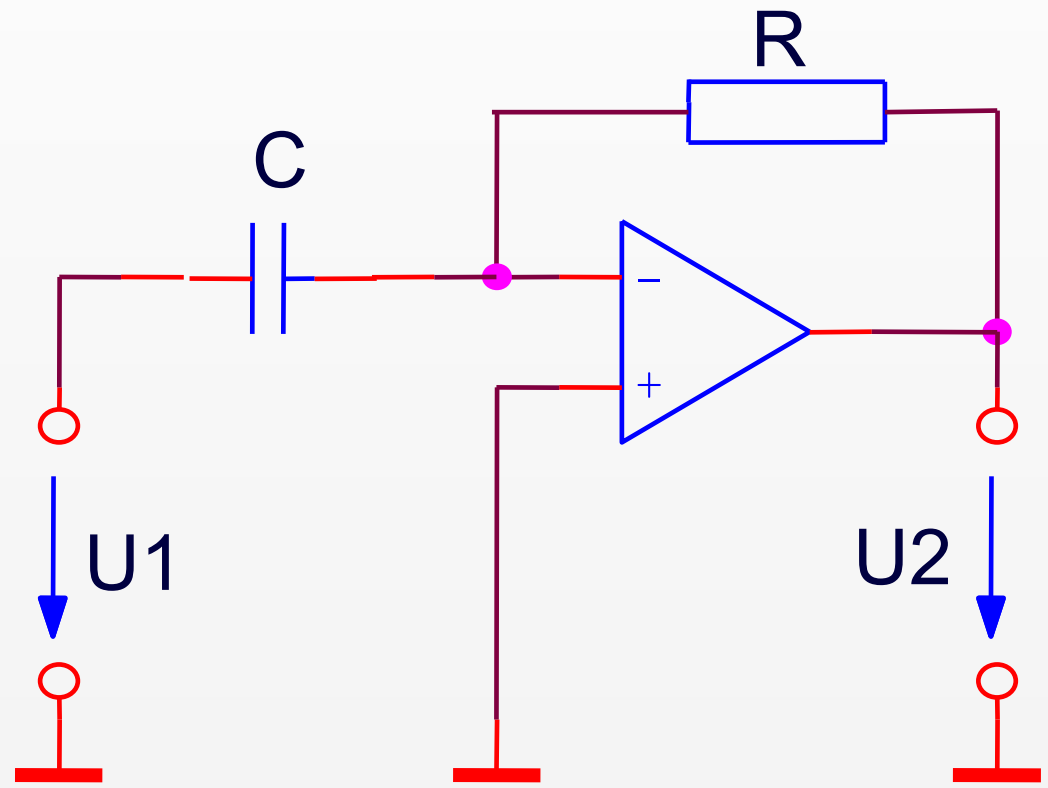
$$(\tau = RC)$$



Viz příklad ve skriptech

Derivátor

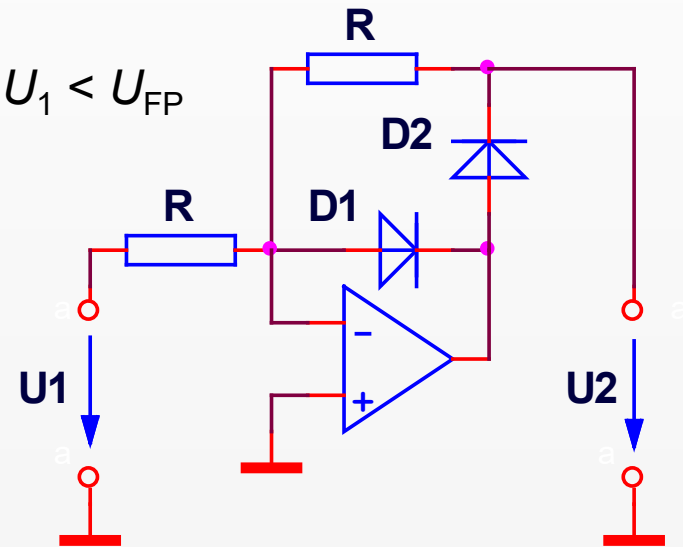
Nepoužívá se – příliš zesiluje šum a rušení ve vstupním signálu



Nelineární obvody s OZ

(přesný) jednocestný usměrňovač

- Nemá necitnosti U_p u diodového usměrňovače
- obvod s nelineárním prvkem
- ZZV linearizuje V-A char. diod \Rightarrow může být $U_1 < U_{FP}$
- na výstupu *střední hodnota* signálu
- v měřicích obvodech



Špičkový detektor zapamatuje na kondenzátoru *amplitudu (maximum)* signálu – příp. je pomocným signálem nulován.

Dvojcestné usměrňovače vyžadují 2 OZ.

Nelineární obvody s OZ

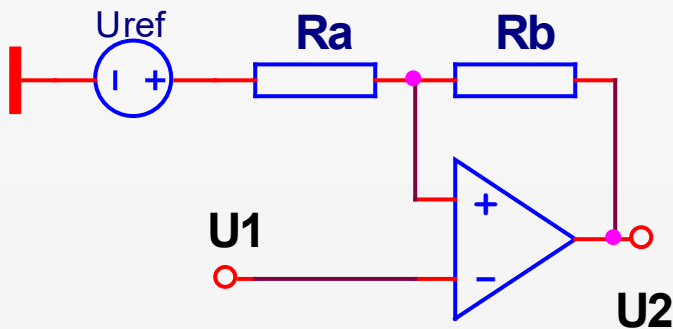
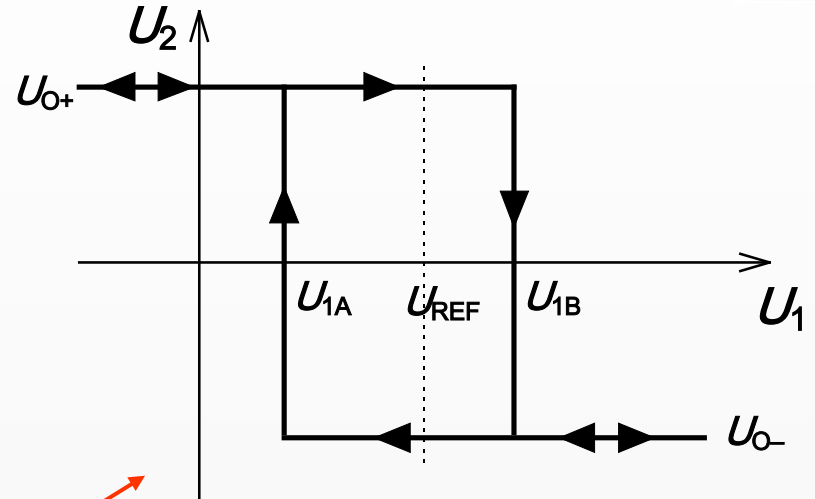


Schmittův (klopný) obvod

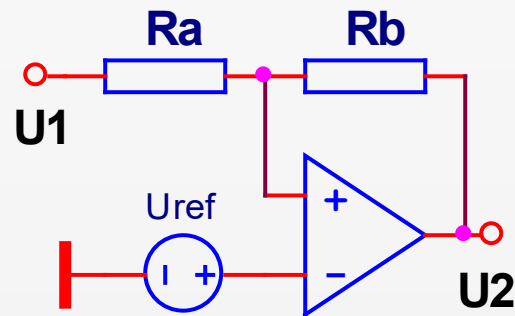
- obvod s **hysterezí**, vytvořenou kladnou zpětnou vazbou

komparátor s hysterezí

- regulátory např. teploty
- převod analogového nebo pomalu se měnícího logického signálu na **logický signál se strmými hranami**



a) invertující, $R_{vst} \uparrow$



b) neinvertující, $R_{vst} \downarrow$

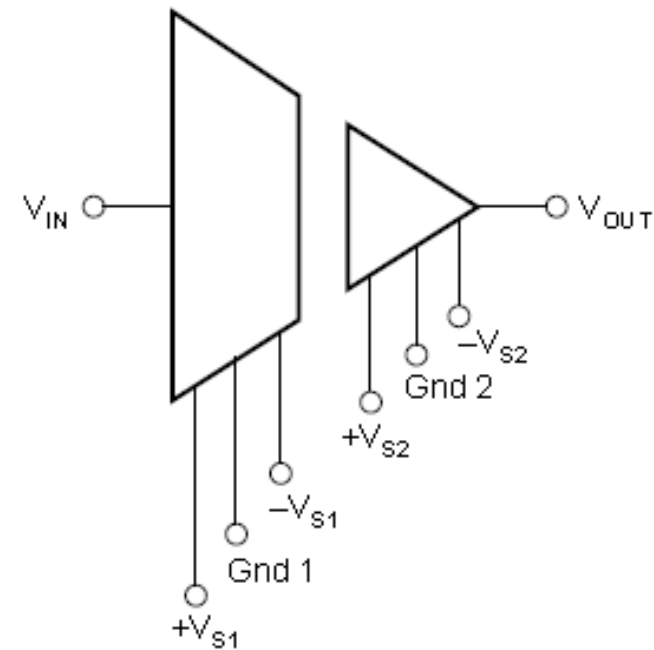
OZ v medicíně

- Základní blok každého elektronického přístroje zpracovávajícím biosignály
 - Požadavky:
 - Zvýšení úrovně snímaného signálu
 - Impedanční přizpůsobení čidla obvodům přístroje
 - Odfiltrování rušení (diferenční zapojení)
- ➔ Biologické/lékařské izolační zesilovače

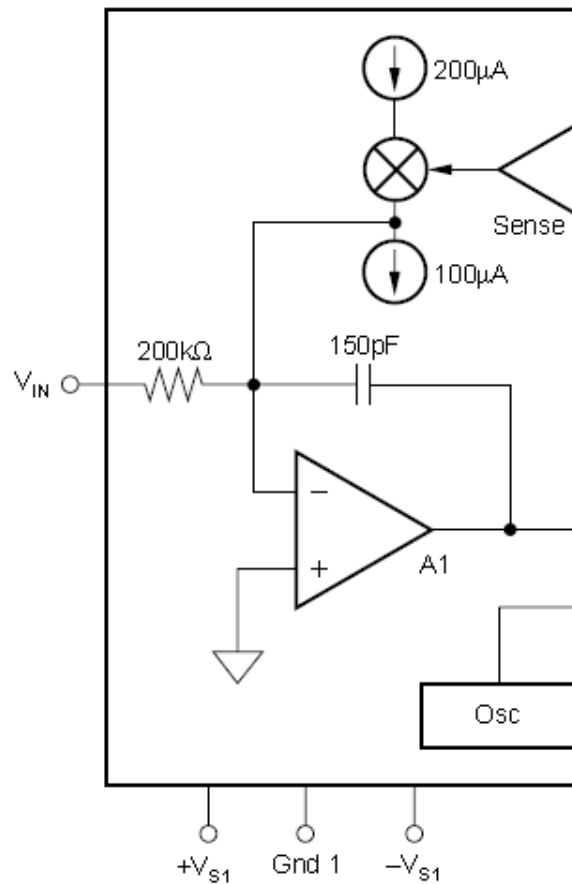
Izolační zesilovače

- Vstupní odpor cca $10^6..10^{10}\Omega$
- Minimální svodový ss proud (uniká tělem)
– podle IEC $<10\mu\text{A}$, v praxi $0,5..7\text{nA}$
- Vstupní drift $0,1..1\ \mu\text{V}/^\circ\text{C}$
- Bandwidth $0..30\ (120)\ \text{k}$

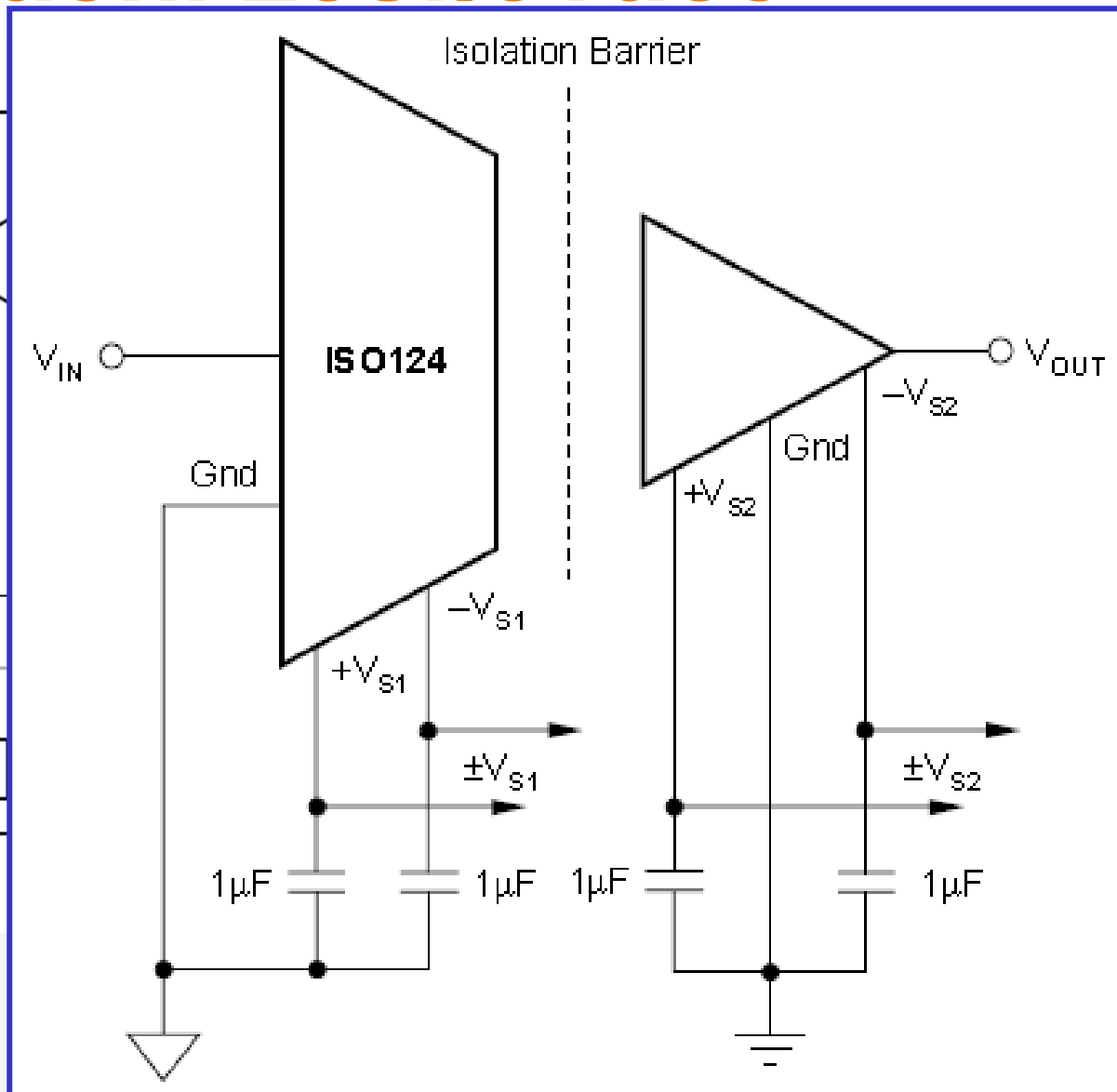
TI: ISO124



Izolační zesilovače



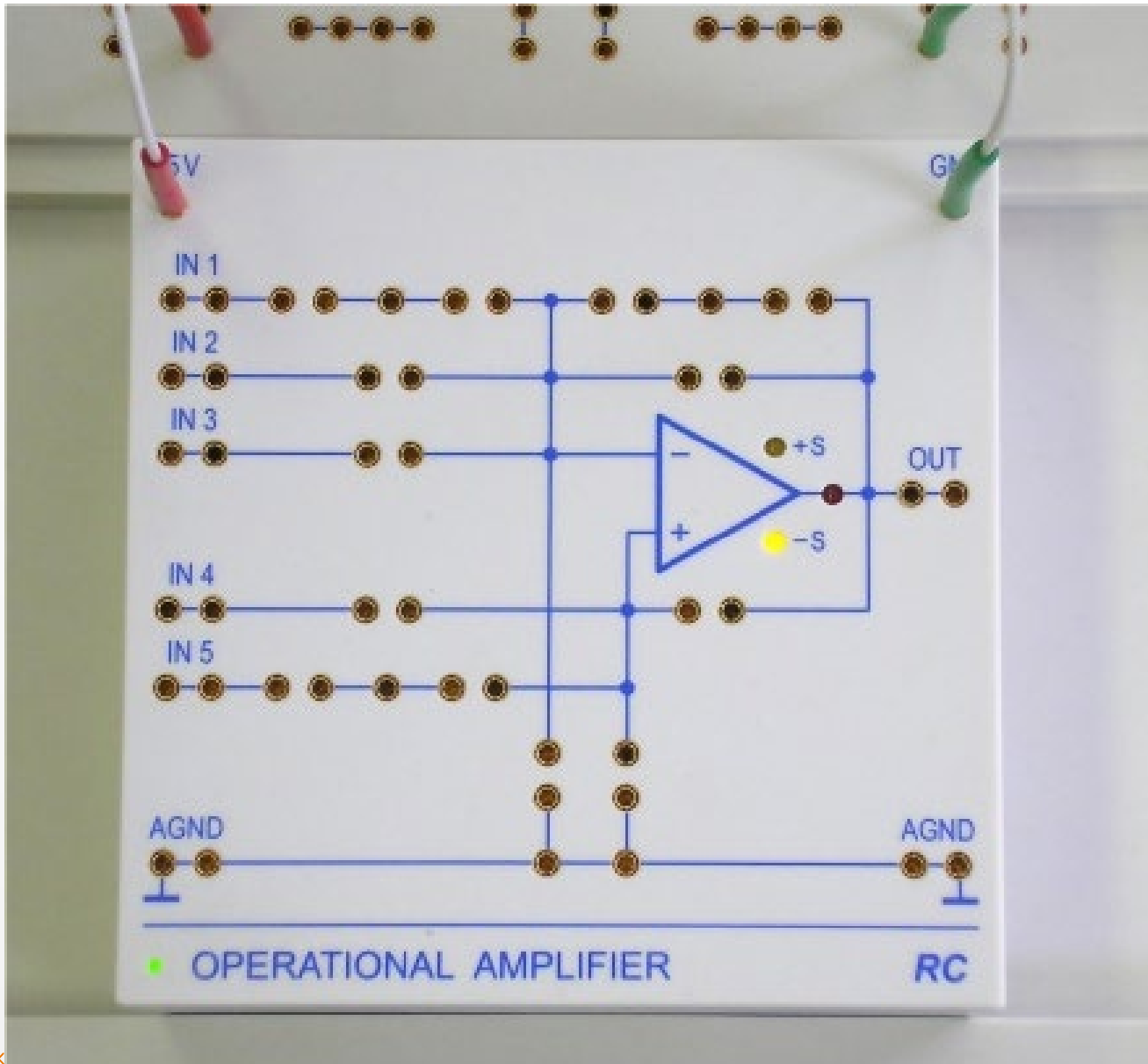
TI: ISO124



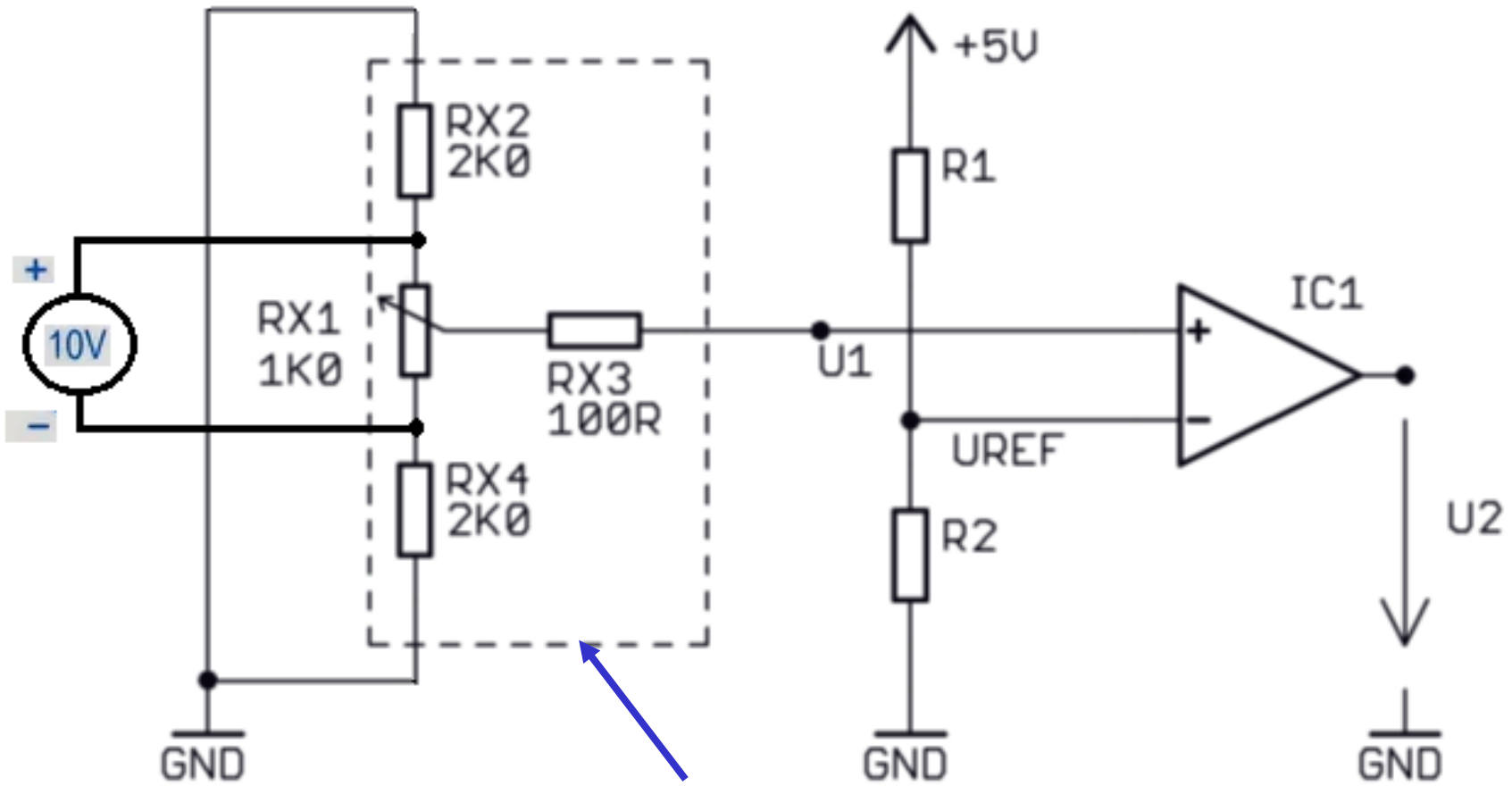
Ke cvičením...



ad cvičení



ad cvičení



Resistor board

OPERATIONAL AMPLIFIER

RC

ad cvičení



U_{IN}

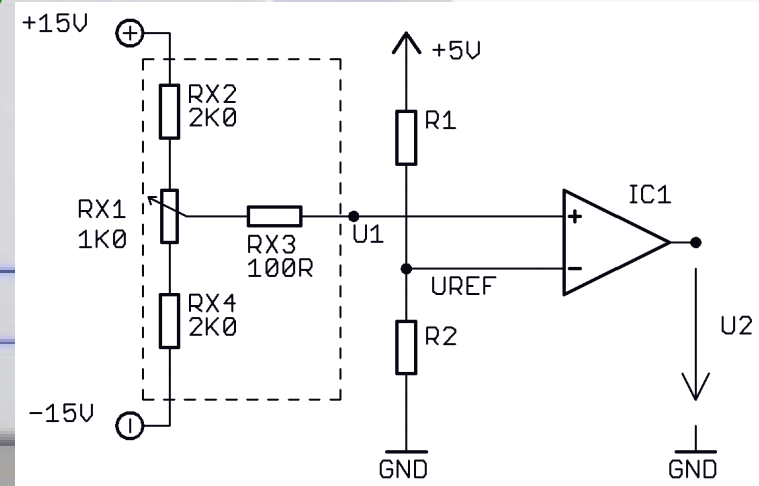
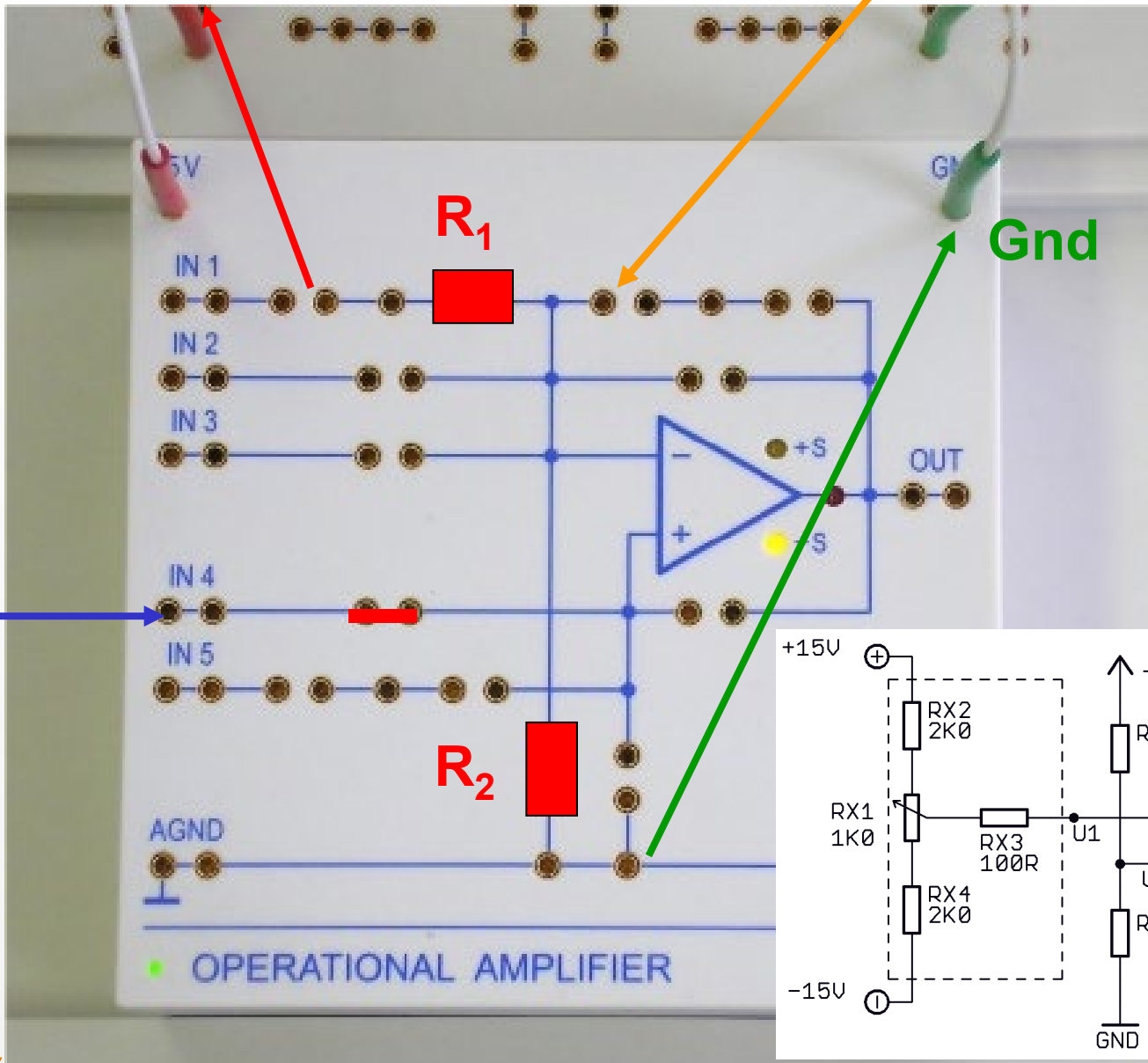
V_{CC}

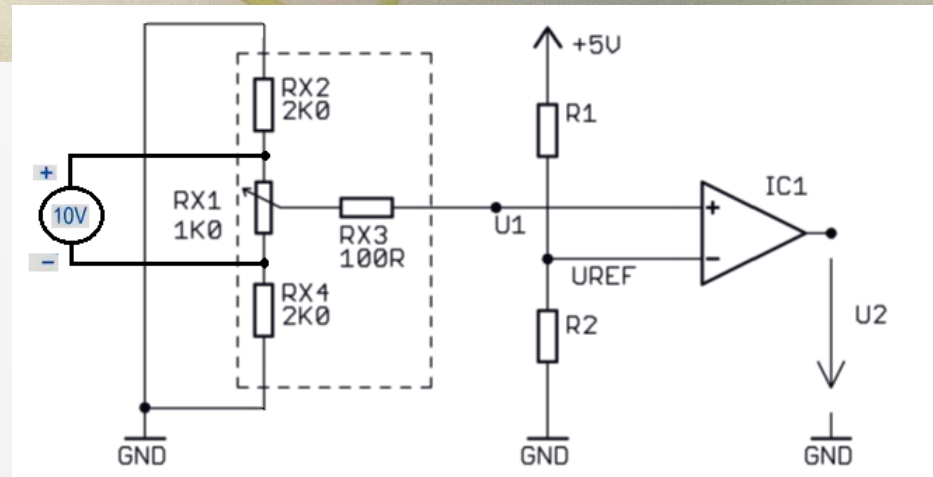
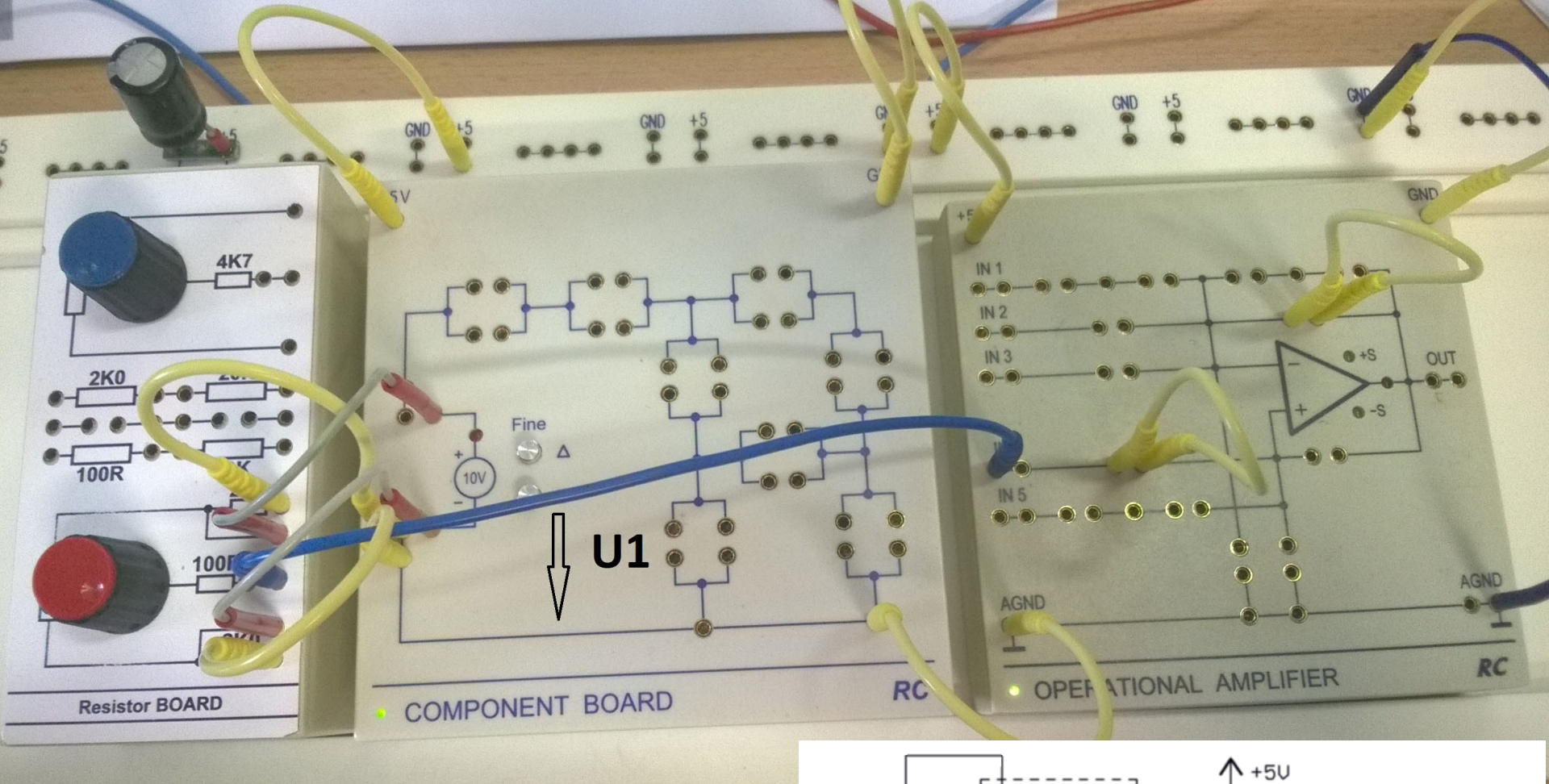
U_{REF}

Gnd

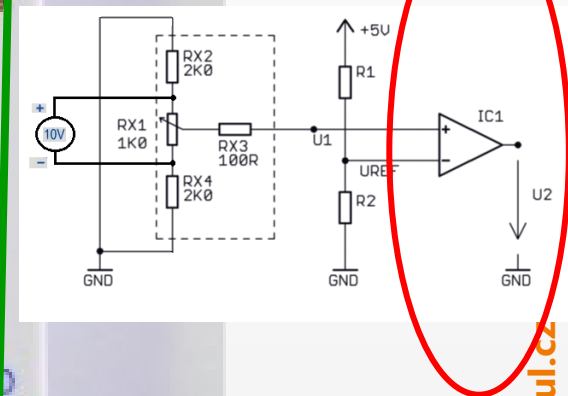
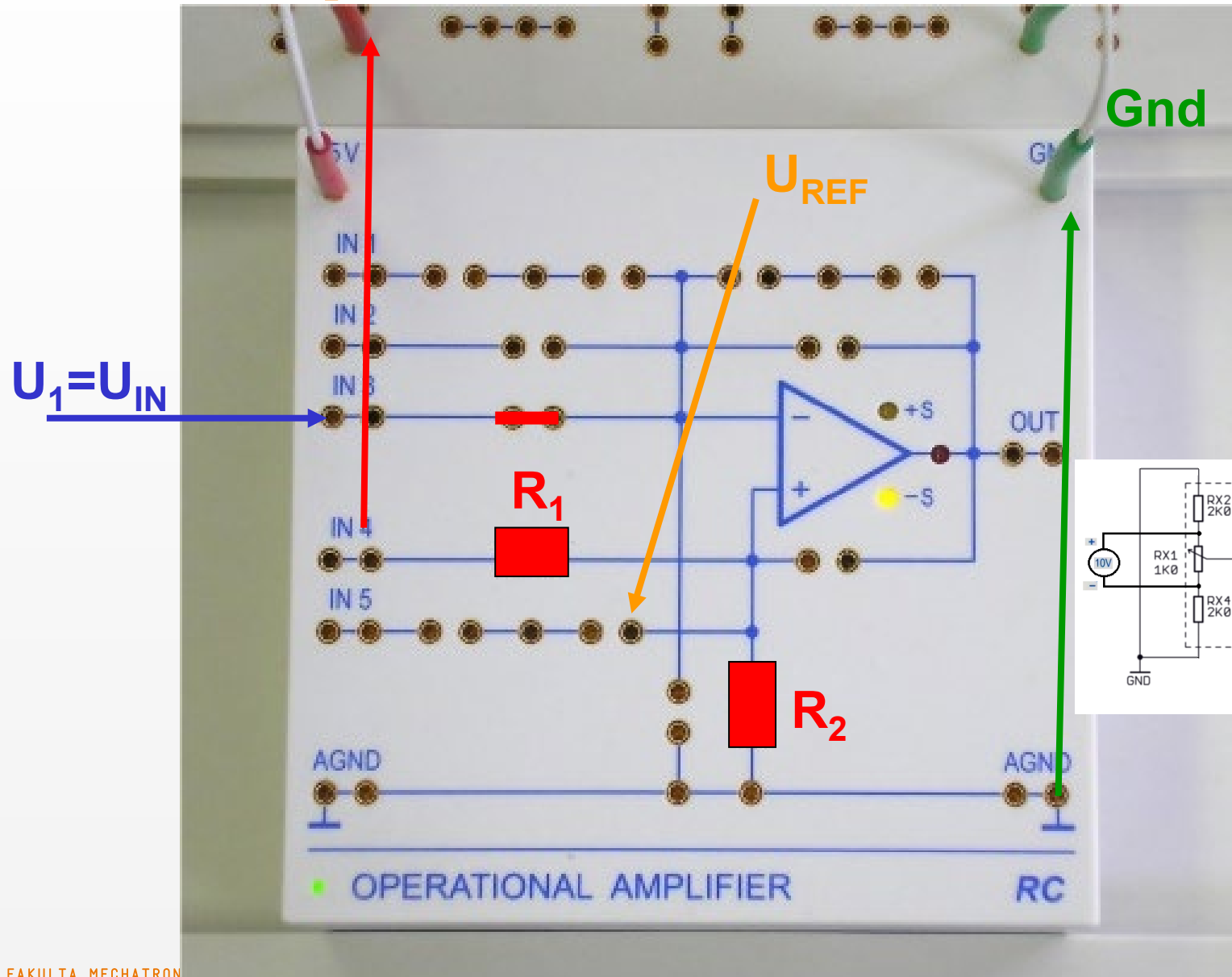
R_1

R_2

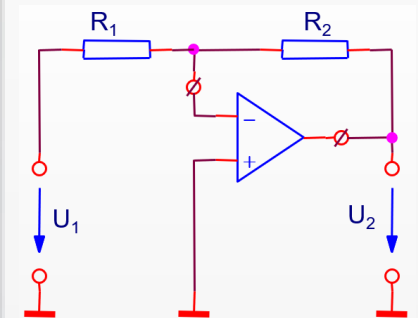
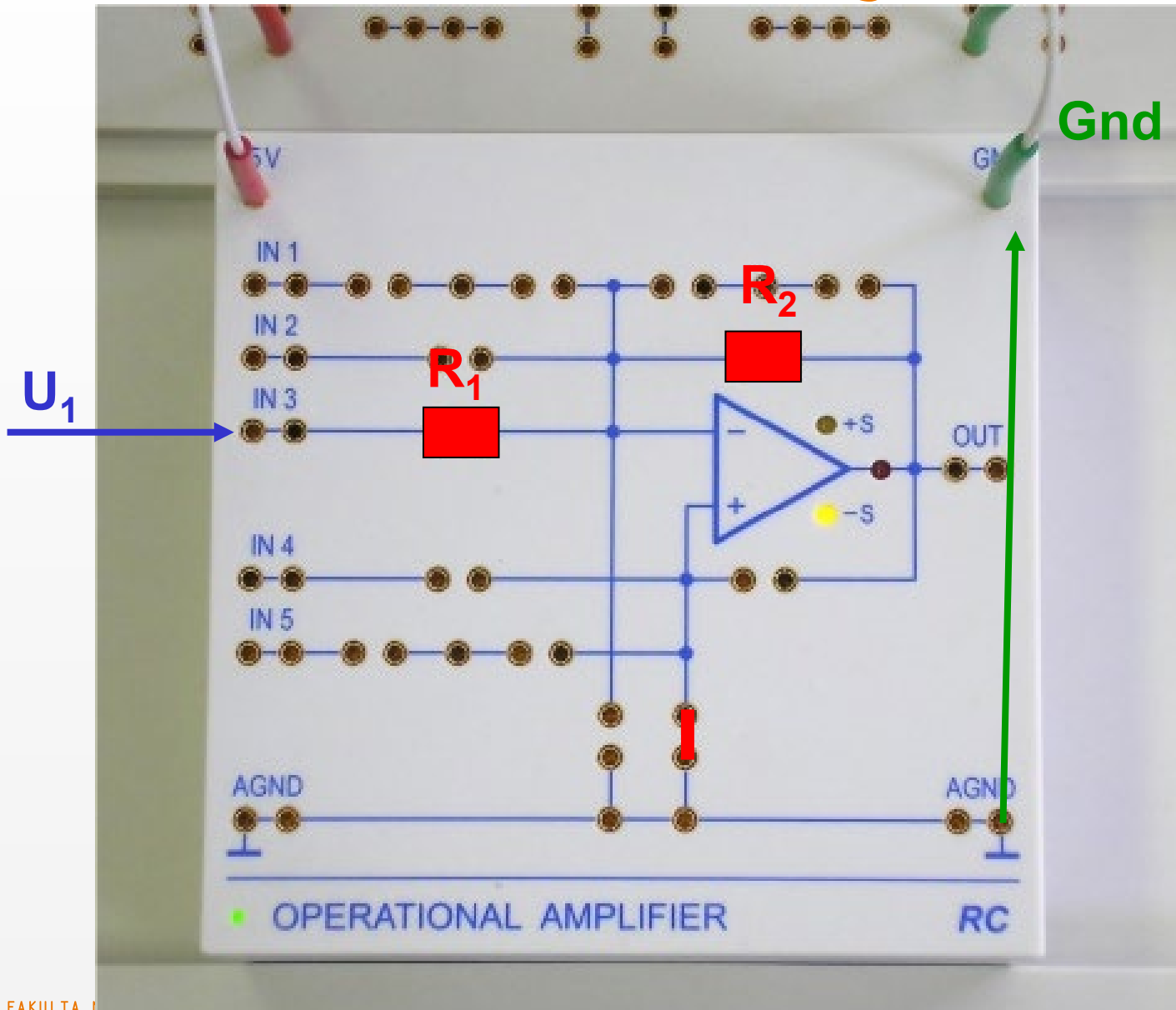




Komparátor (záměna vstupů OpAmp)

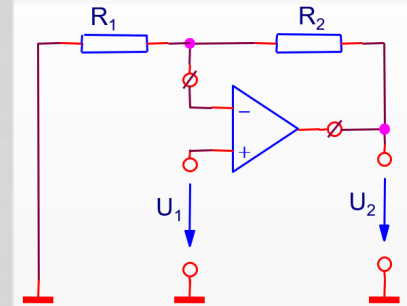
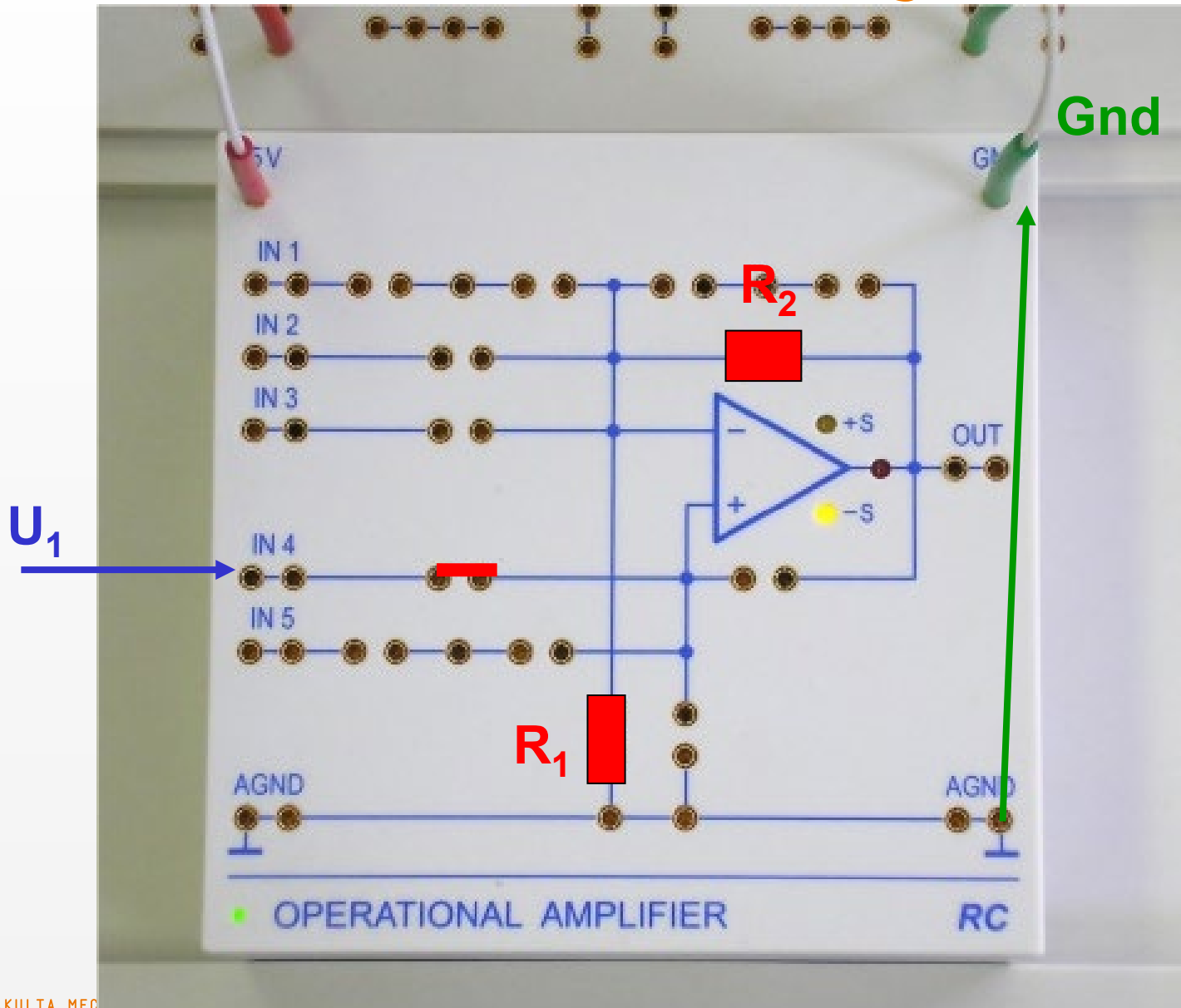


Invertující



$$A_u = -\frac{R_2}{R_1}$$

Neinvertující



$$A_u = 1 + \frac{R_2}{R_1}$$



Děkuji za pozornost...

Zdeněk Plíva
zdenek.pliva@tul.cz
Tel.: 3536