

IEL — Operační zesilovače a převodníky A/D, D/A

Petr Peringer
peringer AT fit.vutbr.cz

Vysoké učení technické v Brně,
Fakulta informačních technologií,
Božetěchova 2,
61266 Brno

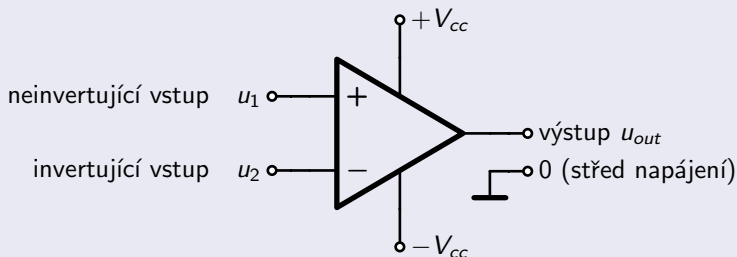
(Verze: 20. listopadu 2024)

Úvod

Agenda

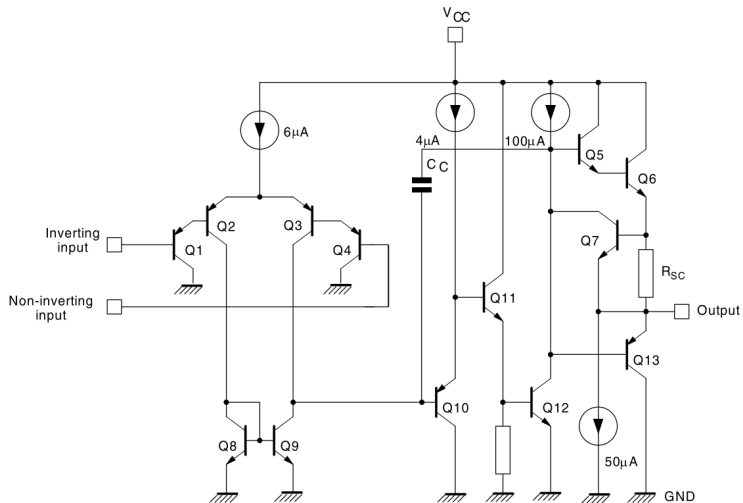
- Motivace
- *Operační zesilovač (OZ)*
Anglicky: *Operational Amplifier* (op-amp)
- Základní pojmy a princip
- Ideální operační zesilovač
- Základní vlastnosti reálných OZ
- *Komparátor*
- Příklady použití OZ:
 - zesilovač signálu (audio, video, ...)
 - sčítačka, integrátor, ...
 - převodníky: D/A, A/D, ...

Schematická značka OZ



- Zesiluje *rozdíl* vstupních napětí ($u_{out} = A_u(u_1 - u_2)$).
- Někdy používáme i nesymetrické napájení ($-V_{CC} = 0$).
- Napájení se obvykle nezakresluje (i s blokovacími kondenzátory).

Zjednodušené zapojení 1/4 LM324 (zdroj: ST, 2019)



Ideální OZ

Vlastnosti ideálního OZ

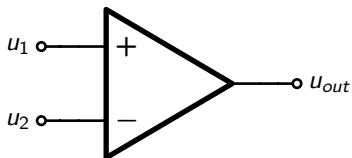
- nekonečné zesílení $A_u = \infty$
(na obou vstupech je stejné napětí = jednoduché výpočty)
- vstupní odpor nekonečný $R_{in} = \infty$ (= jednoduché výpočty)
- výstupní odpor nulový $R_{out} = 0$ (= jednoduché výpočty)
- teoreticky neomezený rozsah vstup/výstupních napětí
- neomezený frekvenční rozsah
- nulová nesymetrie vstupů
- žádný šum

Reálné OZ — typické vlastnosti

- konečné zesílení ($A_u = \text{cca } 40 \text{ až } 140\text{dB}$)
- vstupní odpor ($R_{in} = \text{řádově } 100\text{k}\Omega \text{ až } \text{T}\Omega$)
- výstupní odpor ($R_{out} = \text{řádově desítky až stovky } \Omega$)
- napájení: symetrické ($+15\text{V}, -15\text{V}$), nesymetrické (např. 5V), omezený rozsah vstupních a výstupních napětí (*Rail to rail*, ...)
- omezený frekvenční rozsah ($GBP = \text{řádově } 100\text{kHz} \text{ až } \text{GHz}$)
- nesymetrie vstupů: napěťová (*Offset Voltage*: řádově μV až mV), proudová (*Input Offset Current*: řádově fA až nA)
- omezená rychlost změny výstupního napětí (*Slew Rate* [$\text{V}/\mu\text{s}$])
- šum, nelinearita, (ne)stabilita, omezený ztrátový výkon, vliv teploty, vliv změn napájecího a vstupního (*CMRR*) napětí, ...

Příklady: $\mu\text{A}741$, LM324, LF411, TL071, OPA627, ...

Komparátor

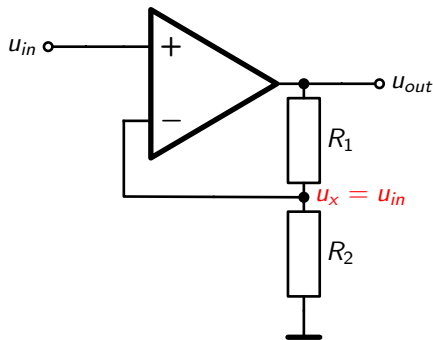


Na rozdíl od OZ:

- porovnává dvě vstupní napětí a má logický výstup:
 - vysoká úroveň H pro $u_1 > u_2$
 - nízká úroveň L pro $u_1 < u_2$
- je rychlejší než OZ použitý jako komparátor
- digitální výstup: TTL, s *otevřeným kolektorem*, LVDS, ...

Příklady: LM339, TLV3501, ...

Neinvertující zesilovač a záporná zpětná vazba



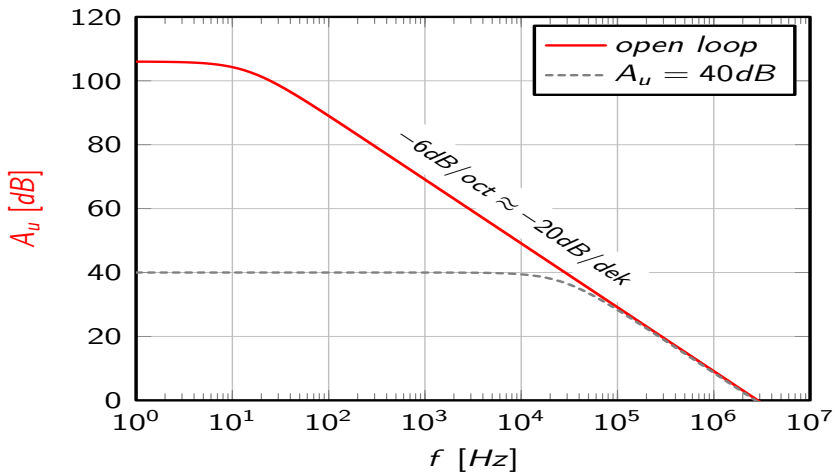
- Zesílení (pro ideální OZ je rozdíl vstupních napětí vždy nulový):

$$A_u = \frac{u_{out}}{u_{in}} = \frac{R_1 + R_2}{R_2}$$

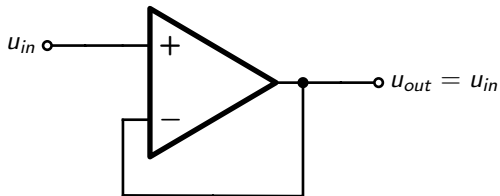
- Velký vstupní odpor ($R_{in} =$ vstupní odpor OZ).

Frekvenční charakteristika reálného OZ (příklad)

Typické zesílení TL071 ($GBP = 3\text{MHz}$)

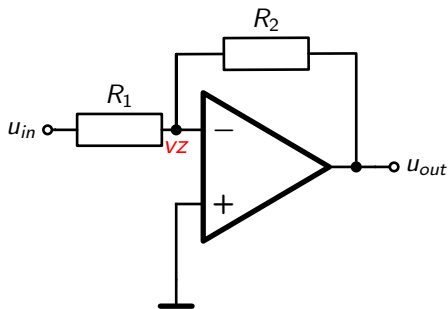


Sledovač signálu (*buffer*)



- Zesílení $A_u = 1$
- Velký vstupní odpor

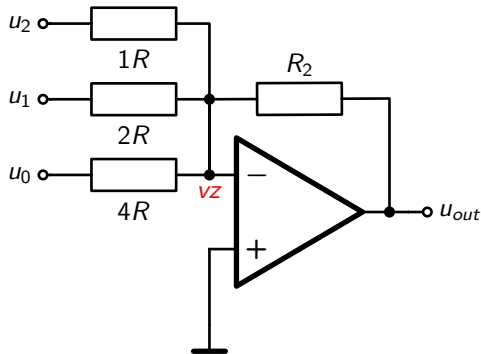
Invertující zesilovač



- Zesílení $A_u = -\frac{R_2}{R_1}$ (pro $A_u = -1$ nazýváme *invertor*)
- Relativně malý vstupní odpor ($R_{in} = R_1$)
- Pojem *virtuální zem* (viz schema: **vz**)

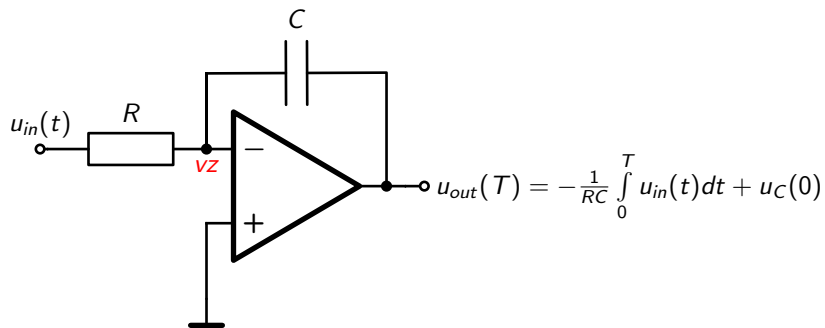
Sčítačka (invertující)

Vstupní rezistory určují váhy vstupů — např. pro 3bit D/A převod:



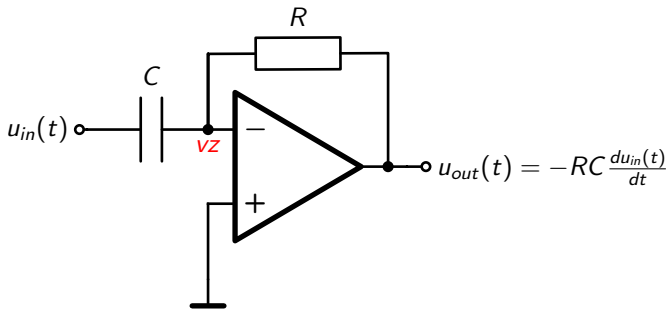
$$u_{out} = -R_2 \left(\frac{u_2}{R} + \frac{u_1}{2R} + \frac{u_0}{4R} \right) = -\frac{R_2}{4R} (4u_2 + 2u_1 + u_0) \quad \text{pro } u_x = 0|1V$$

Integrátor (invertující)



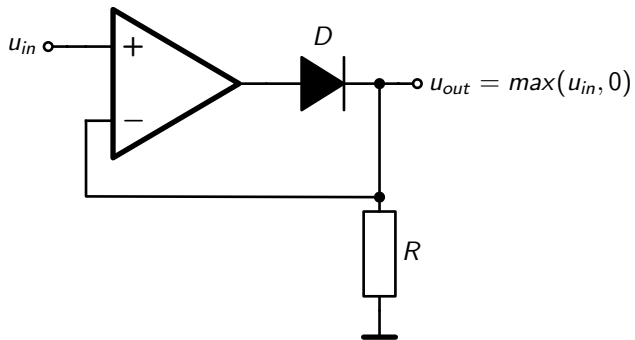
- Omezené výstupní napětí
- Počáteční napětí na kondenzátoru = $u_C(0)$
- Malý vstupní odpor (můžeme předřadit sledovač)
- Invertuje (za integrátor můžeme zapojit invertor)

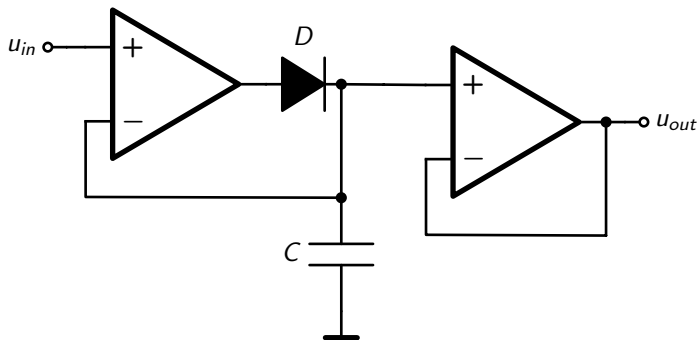
Derivační článek



- Problémy: šum na vstupu, skokové změny
- Omezené výstupní napětí
- Malá vstupní impedance
- Invertuje

Usměrňovač střídavého napětí



Detekce maximální hodnoty napětí $u_{out} = \max(u_{in}(t))$ 

Poznámka: počáteční napětí $u_C = 0$, reset spínačem

Další aplikace OZ

- zesilovače (audio, video, ...)
- převodníky A/D, D/A
- vzorkovací obvod (*Sample and hold*)
- stabilizované zdroje napětí a proudu
- frekvenční filtry s OZ
- generátory signálu
- přístrojový zesilovač (*instrumentation amplifier*)
- ...

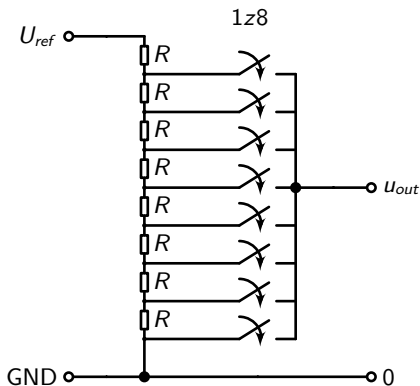
Poznámka: v každém mobilním telefonu je několik OZ

D/A převodník (DAC, *Digital-to-Analog Converter*)

Číslicově – analogový převodník

- Vstup: číslo v binárním kódu (např. 00011010)
- Výstup: napětí (nebo proud)
- Varianty:
 - váhový
 - R-2R
 - PWM
 - ...
- Vyžaduje zdroj *referenčního napětí* U_{ref}
- Vlastnosti převodníků (počet vzorků za sekundu, linearita, ...)
- Použití: zvukové a video karty v PC, řízení, ...

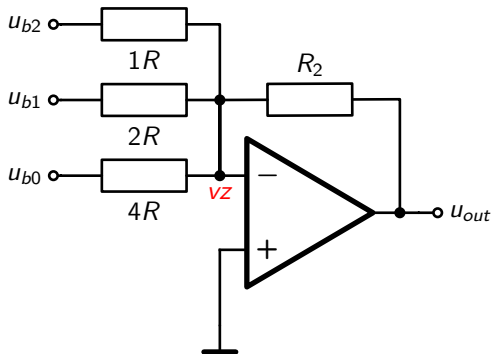
D/A převodník — příklad pro 3 bitové číslo



$$U_{out} = \frac{U_{ref}}{8} * \text{číslo}$$

D/A převodník — váhové rezistory (příklad pro 3 bity)

Vstupní rezistory určují váhy vstupů $R_{bi} = 2^i R$, $i = 0, 1, \dots, N - 1$:

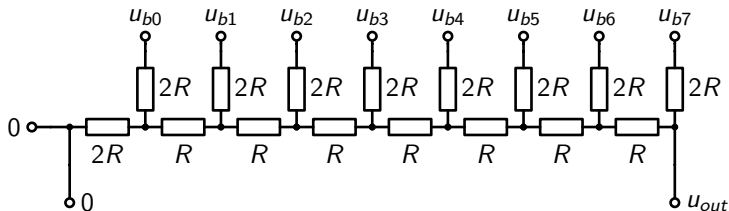


$$u_{out} = -\frac{R_2}{4R}(4u_{b2} + 2u_{b1} + u_{b0}) \quad \text{pro } u_{bi} = 0|1V$$

D/A převodník typu R-2R (příklad pro 8 bitů)

Vstupem je číslo: $[b_7, b_6, \dots, b_0]$, kde b_0 je bit s nejmenší vahou.

$$u_{b_i} = 0V \text{ pro } b_i = 0, \quad u_{b_i} = U_{ref} \text{ pro } b_i = 1$$



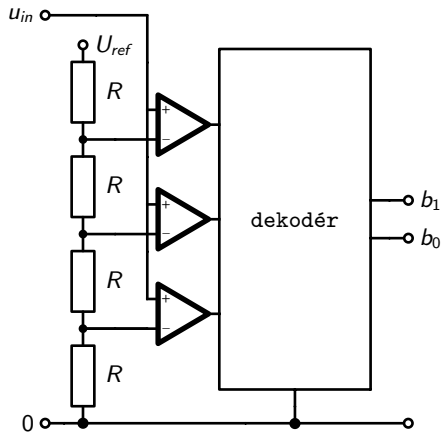
$$u_{out} = U_{ref} \frac{\text{číslo}}{256}$$

Poznámky: Vliv tolerance rezistorů a kvality spínačů, u_{out} buffer, ...

A/D převodník (ADC, *Analog-to-Digital Converter*)

Analogově–číslicový převodník

- Vstup: napětí
- Výstup: číslo v binárním kódu
- Varianty:
 - komparační
 - aproximační
 - $\Sigma\Delta$ (*Sigma-delta ADC*)
 - integrační (*Dual-Slope*) — použití: multimetry
 - ...
- Vyžaduje zdroj *referenčního napětí* U_{ref}
- Vlastnosti převodníků (počet vzorků za sekundu, linearita, ...)
- Vzorkování (obvod *Sample and hold*)

A/D převodník — komparační (příklad pro 2 bity, $N = 2^2$)

Komparátory porovnávají $u_{in} > k \frac{U_{ref}}{N}$ (pro $k \in \{1, \dots, N - 1\}$) a dekodér provádí převod na binární reprezentaci (číslo).

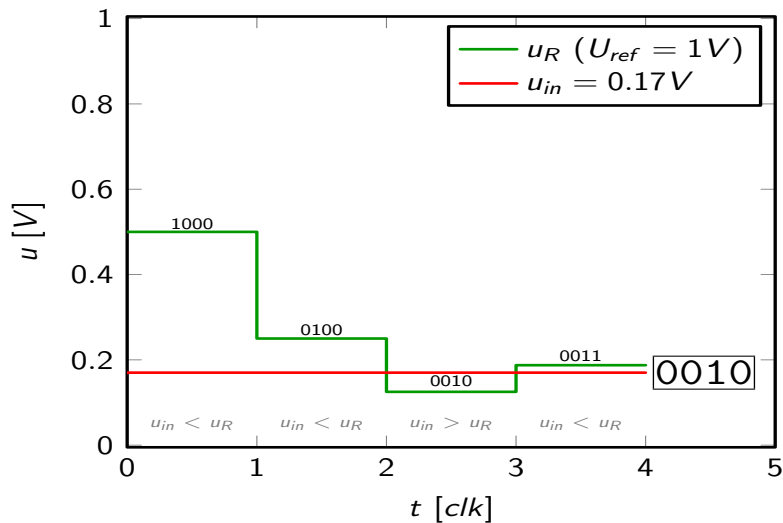
Aproximační A/D převodník — princip

Řídicí logika provádí aproximaci půlením intervalu:

- 1 Registr R obsahuje N-bitové číslo s aktuální hodnotou napětí u_R
Počáteční nastavení: $u_R = U_{ref}/2$, například R=1000 pro 4 bity
- 2 D/A převodníkem převede hodnotu registru R na u_R
- 3 Komparátor porovná napětí u_R se vstupním napětím u_{in} a logika nastaví další bit registru R=X100, kde X je výstup komparátoru:
 - pokud je napětí u_{in} vyšší zvyšujeme u_R (X=1, R=1100)
 - jinak snižujeme u_R (X=0, R=0100 — příklad pro první bit výsledku)
- 4 Pokud nejsou nastaveny všechny bity registru R jdeme na bod 2
- 5 Převod skončil, výsledek je číslo v registru R

Poznámka: u_{in} se nesmí při převodu měnit (to zajistí speciální obvod)

Aproximační A/D převodník — princip převodu — příklad



A/D převodníky — závěr

Použití:

- Multimédia: digitalizace signálu (audio, video)
- Měření: multimetry, digitální osciloskopy
- Digitální senzory (teplota, tlak, ...)
- Digitální váhy (24 bitů $\Sigma\Delta$ A/D)
- SDR přijímače (viz např. RTL-SDR)
- ...

Poznámka: Běžné mikrokontroléry (MCU) obvykle obsahují ADC a DAC (Například ATmega328P v Arduinu má 10 bitový A/D převodník.)