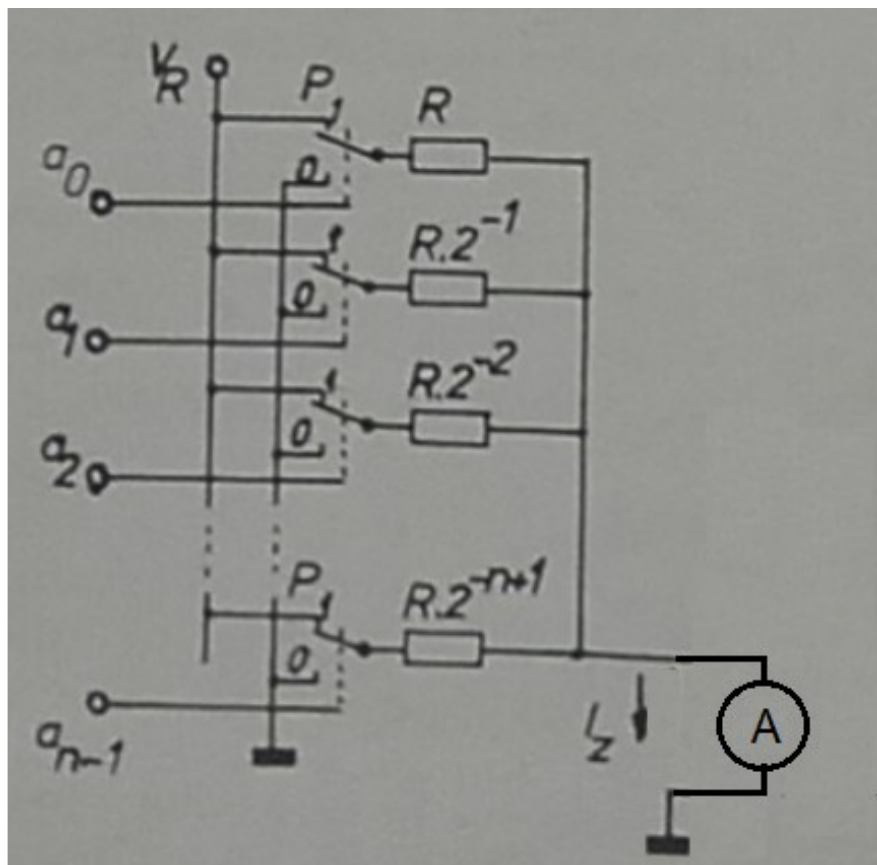


# Číslicově-analogové převodníky

- převádí číslicový signál (ve dvojkové soustavě) na analogový signál
- převodník tvořený spínači a sítí váhových rezistorů



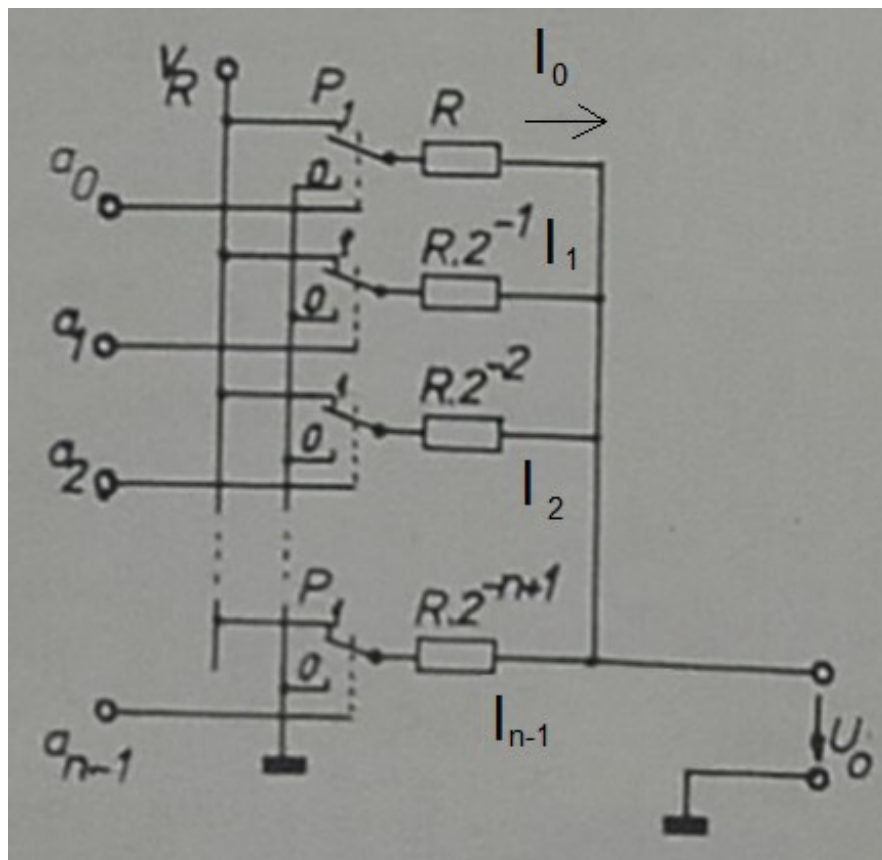
$a_0, a_1, a_2, \dots, a_{n-1}$  číslice dvojkového  
čísla  $Q$

$$Q = \sum_{i=0}^{n-1} a_i 2^i$$

$$I_z = \sum_{i=0}^{n-1} \frac{V_R \cdot a_i}{R/2^i} = \frac{V_R}{R} \sum_{i=0}^{n-1} a_i 2^i$$

-vztahy platí přesně pro zkratovaný  
výstup

# Číslicově-analogové převodníky



pro nezatížený výstup platí vztahy:

$$I_k = \frac{a_k V_R - U_0}{R/2^k}$$

$$I_1 = \sum_{i=0}^{n-1} \frac{a_i V_R - U_0}{R/2^i} = 0$$

$$U_0 = \frac{V_R}{2^n - 1} \sum_{i=0}^{n-1} a_i 2^i$$

# Číslicově-analogové převodníky

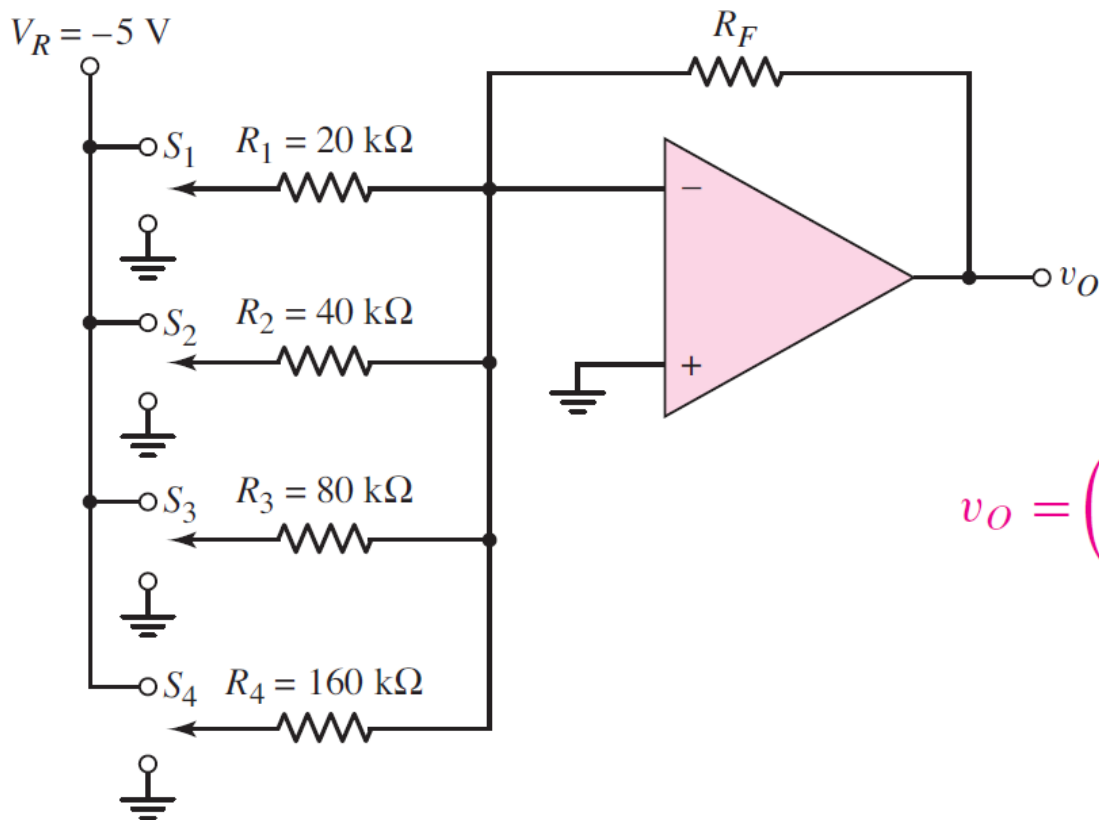
Vztah mezi analogovým signálem  $v_D$  číslicovým tvarem signálu:

$$v_D = \frac{b_1}{2^1} + \frac{b_2}{2^2} + \frac{b_3}{2^3} + \cdots + \frac{b_N}{2^N}$$

$b_i=1$  nebo  $0$  , vyjadřují binární číslo

$$v_D < 1 \quad R_F = 10 \text{ k}\Omega$$

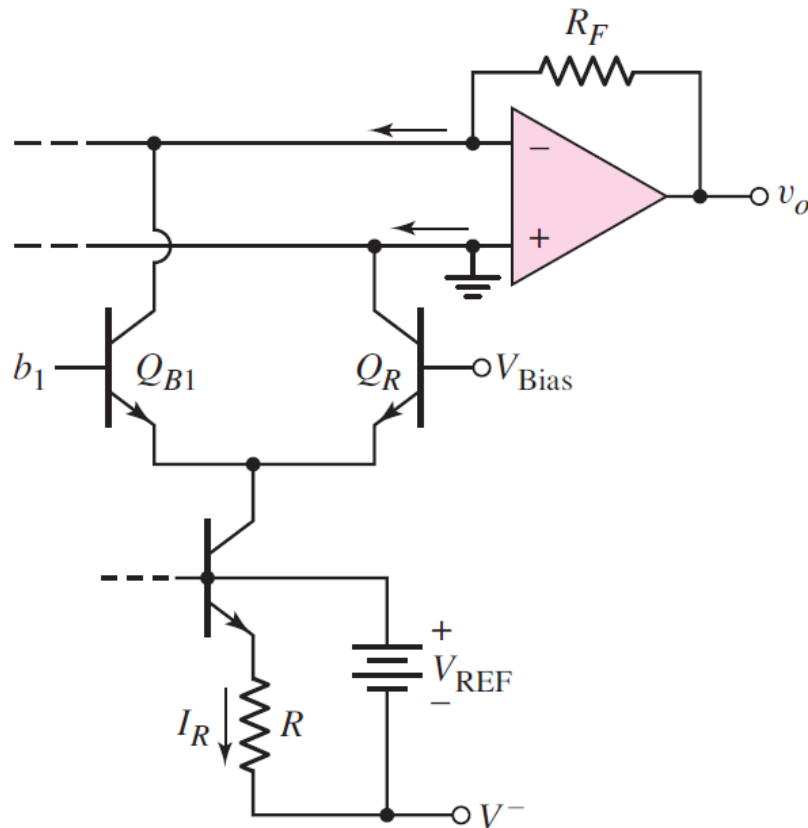
když  $b_i=1$  tak je  $R_i$  je připojeno k  $V_R = -5 \text{ V}$   
když  $b_i=0$  tak je  $R_i$  je připojeno zemnímu  
bodu



$$v_O = \left( \frac{b_1}{2} + \frac{b_2}{4} + \frac{b_3}{8} + \frac{b_4}{16} \right) (5) \text{ V}$$

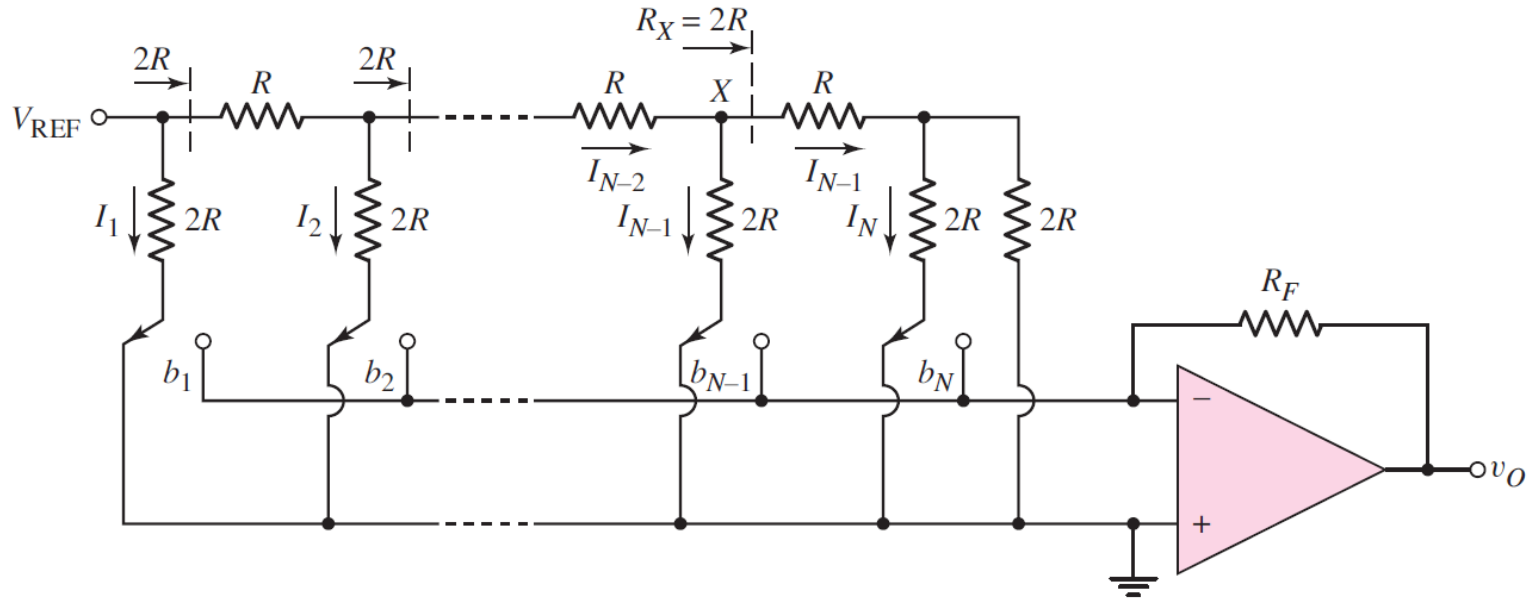
# Číslicově-analogové převodníky

- příklad proudového spínače v MSB pozici váhového odporu v D/A převodníku
- pro různé bity je třeba udržet stejné napětí  $V_{BE}$  u všech tranzistorů různou plochou PN přechodu, aby na něm byla stejná proudová hustota pro různé váhové rezistory



# Číslicově-analogové převodníky

-zapojení převodníku typu  $R$ - $2R$  žebříček  $\rightarrow$  pak stačí pouze dvě hodnoty rezistorů



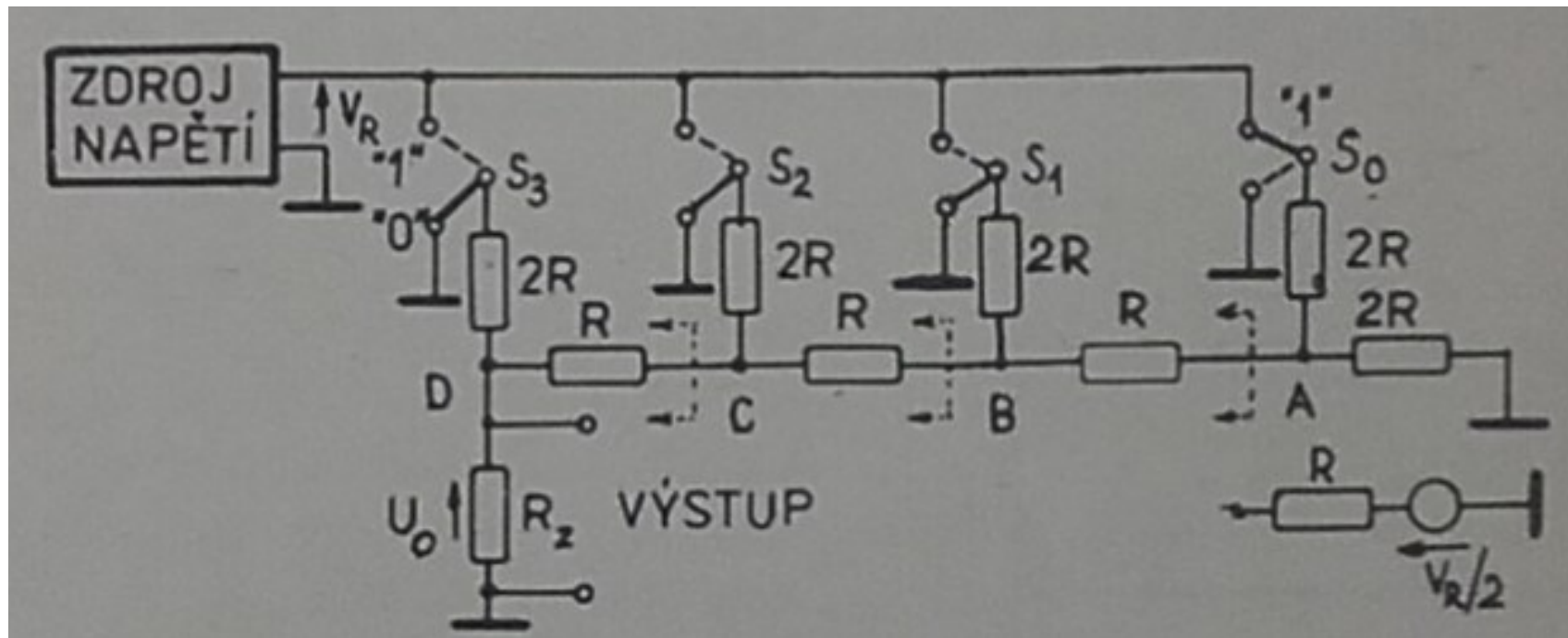
-v uzlu  $X$  je směrem doprava vstupní odpor pro oba stavy prepínače  $N$   $R_X = 2R$

-obdobná situace platí pro ostatní vyznačené uzly platí:

$$I_{N-1} = \frac{1}{2} I_{N-2} \quad I_1 = 2I_2 = 4I_3 = \dots = 2^{N-2} I_{N-1} = 2^{N-1} I_N$$

pro:  $R_F = R$  
$$v_O = (-V_{\text{REF}}) \left( \frac{b_1}{2} + \frac{b_2}{4} + \dots + \frac{b_N}{2^N} \right)$$

## Číslicově-analogové převodníky

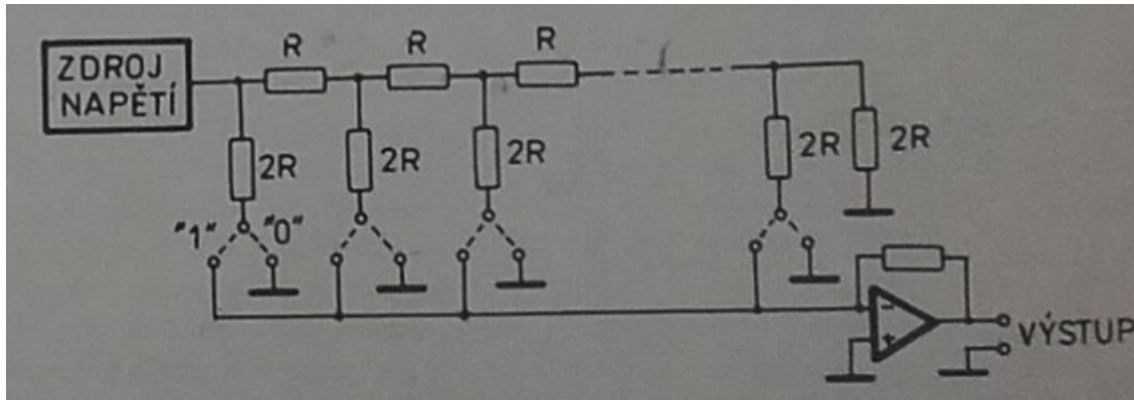


$$U_0 = \frac{V_r R_z}{R_z + R} \sum_{i=0}^n a_i 2^{-(i+n+1)}$$

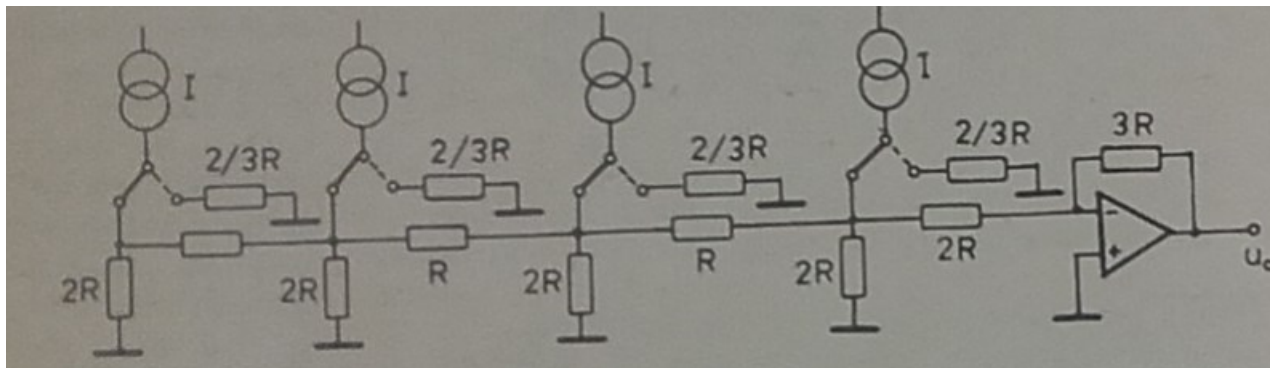
- pro  $R_z = 2R$  platí:

$$U_0 = \frac{V_r 2}{3} \sum_{i=0}^n a_i 2^{-(i+n+1)}$$

# Číslicově-analogové převodníky

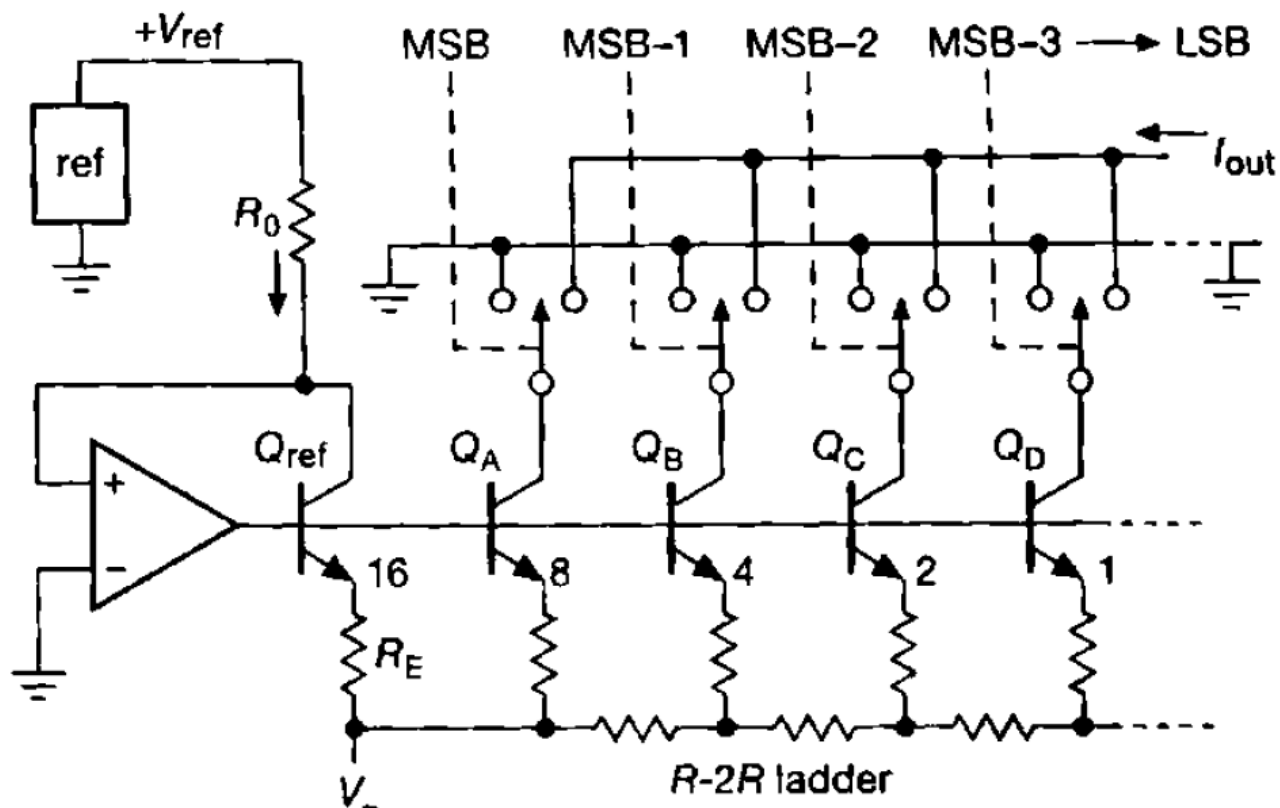


- lepší frekvenční odezva a menší zpoždění při sepnutí jednotlivého spínače
- vstupní/výstupní odpor z uzlu spínače je vždy  $3R$



- pro rychlost spínání je lepší použít proudové zdroje a přepínat do stejného odporu

# Číslicově-analogové převodníky



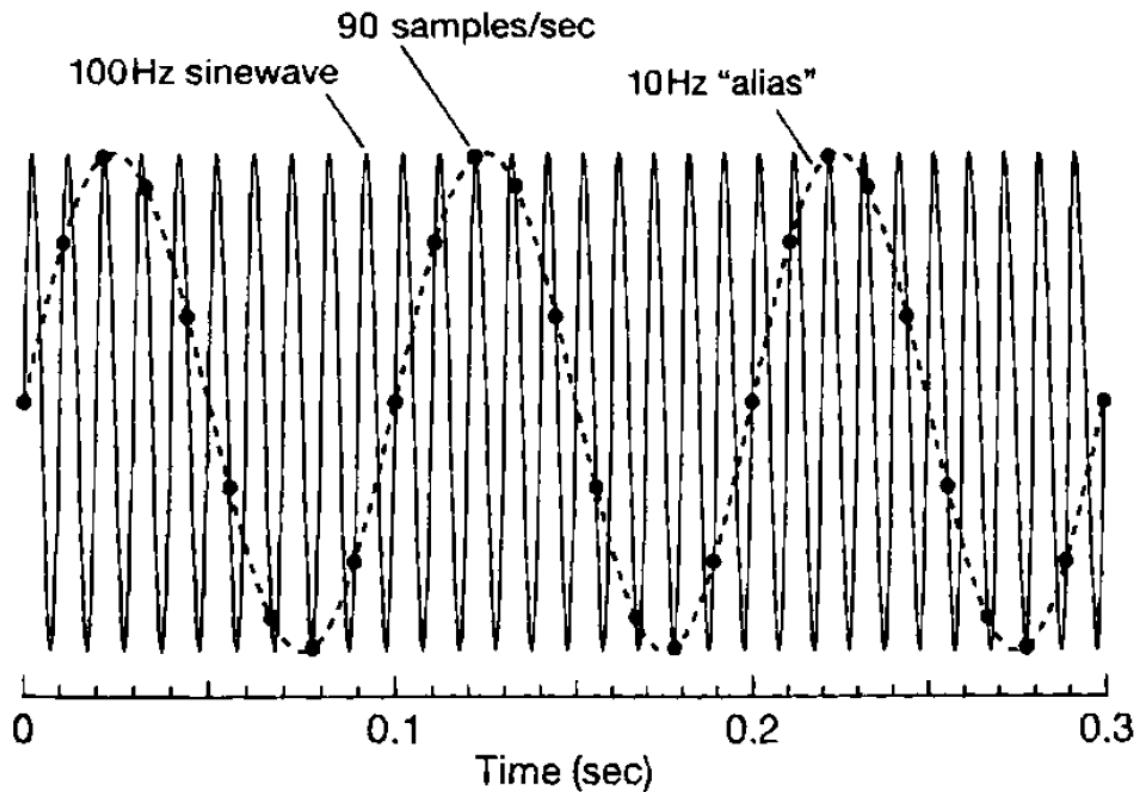
D/A převodník se spínáním proudů a zdrojem referenčního proudu



## Analogově-číslicové převodníky

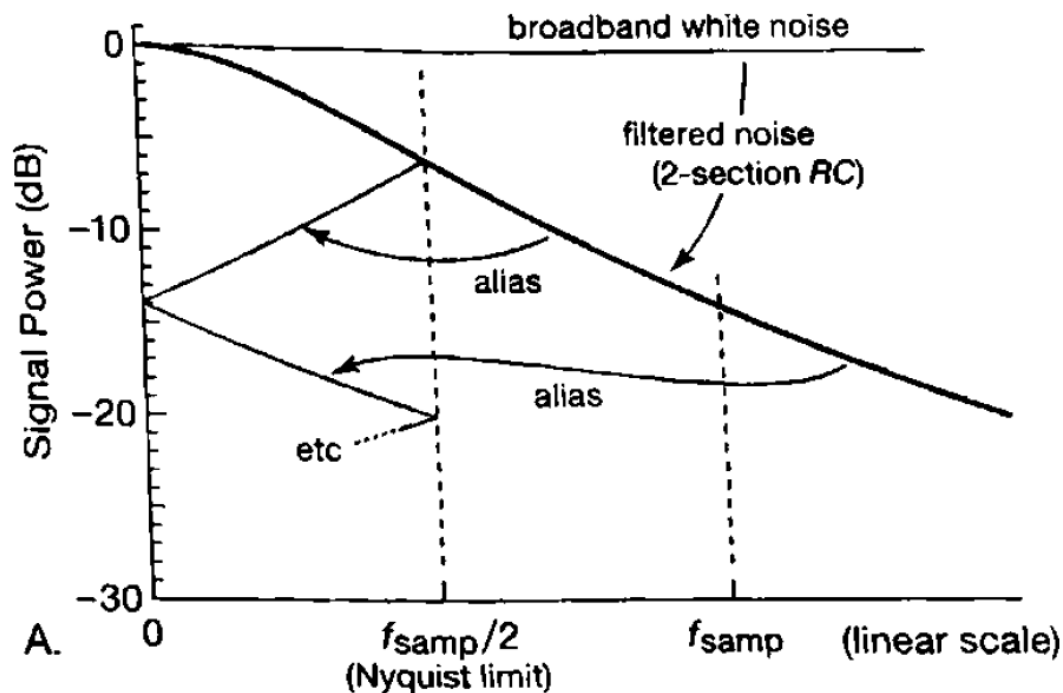
Nyquistův vzorkovací teorém: signál musí být vzorkován minimální frekvencí, která je dvojnásobkem nejvyšší frekvenční složky signálu.

$$f_{\text{sample}} > 2 \cdot f_{\text{max}}$$

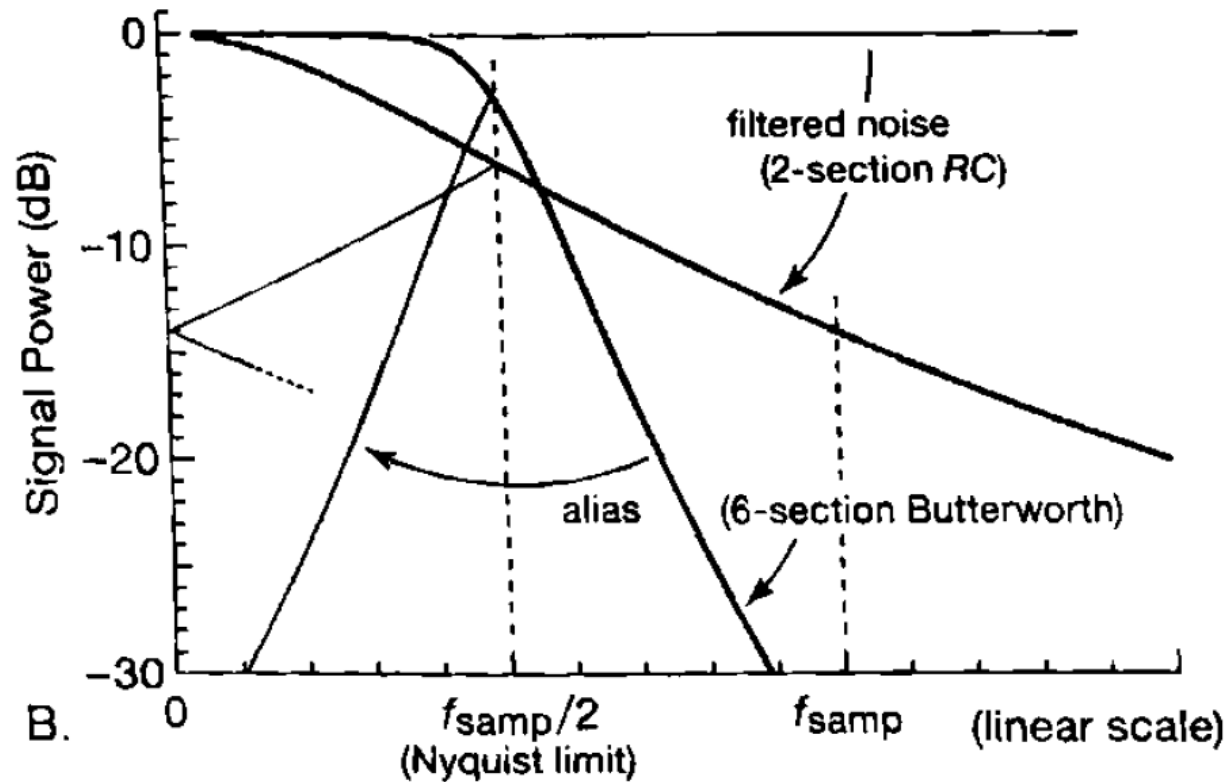


případ vzorkování pod Nyquistovou frekvencí  $f_{\text{sample}} = 90 \text{ Sample/s} < f_{\text{signálu}} = 100 \text{ Hz}$   
(vznikne “nepravdivý” signál s frekvencí  $f_{\text{alias}} = 10 \text{ Hz}$ )

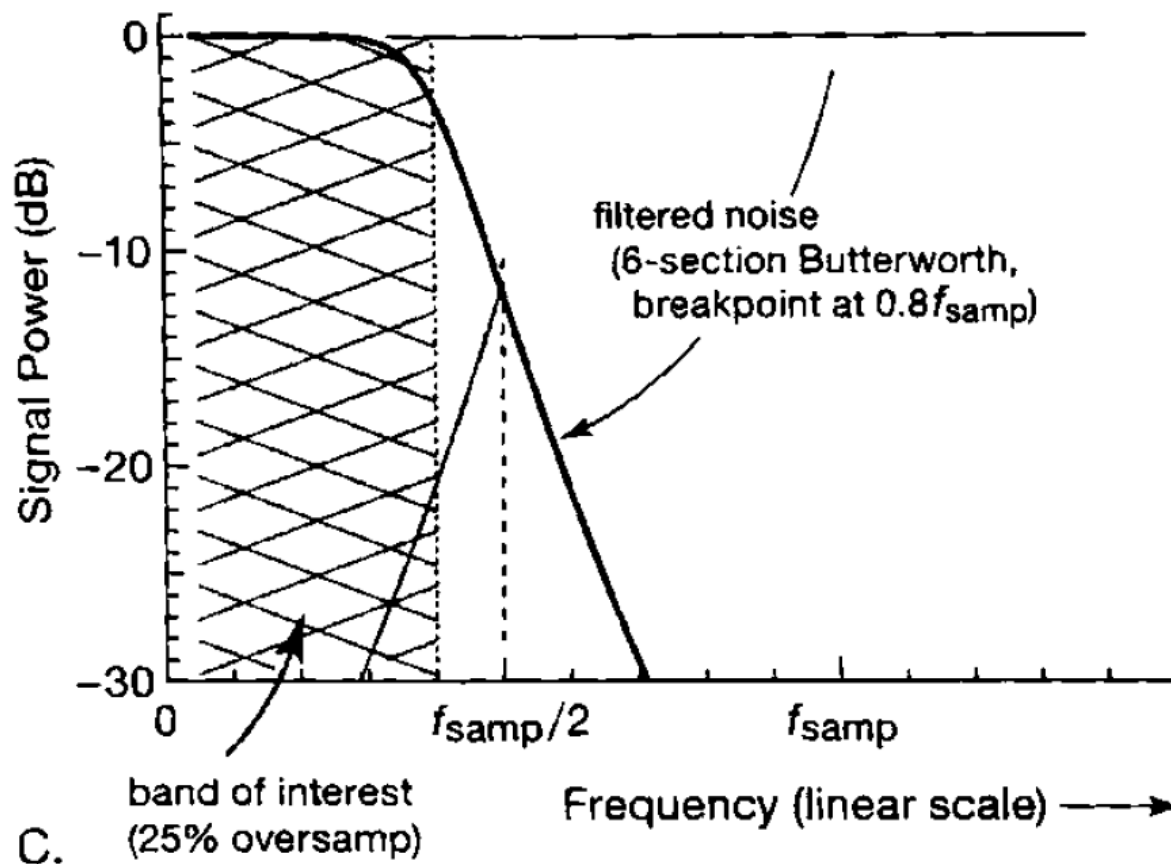
- před převodem analogového signálu na digitální je nutné použít anti-aliasing filtr, kdy při dané vzorkovací frekvenci  $f_{sample}$  filtr (dolnofrekvenční propust) smí propustit maximální frekvenci  $\frac{f_{sample}}{2}$ .
- lepší je v praxi vzorkovat na vyšší frekvenci než je Nyquistova frekvence



Širokopásmový signál filtrovaný RC článkem kdy Nyquistův limit leží v poklesu spektra o 3 dB. Je vidět znatelný alias signál v digitalizovaném signálu, který nejde odfiltrovat po digitalizaci.



Širokopásmový signál filtrovaný strmým filtrem (Butterworth), kdy Nyquistův limit leží v poklesu spektra o 3 dB. Je vidět znatelný alias signál v digitalizovaném signálu, který nejde odfiltrovat po digitalizaci.

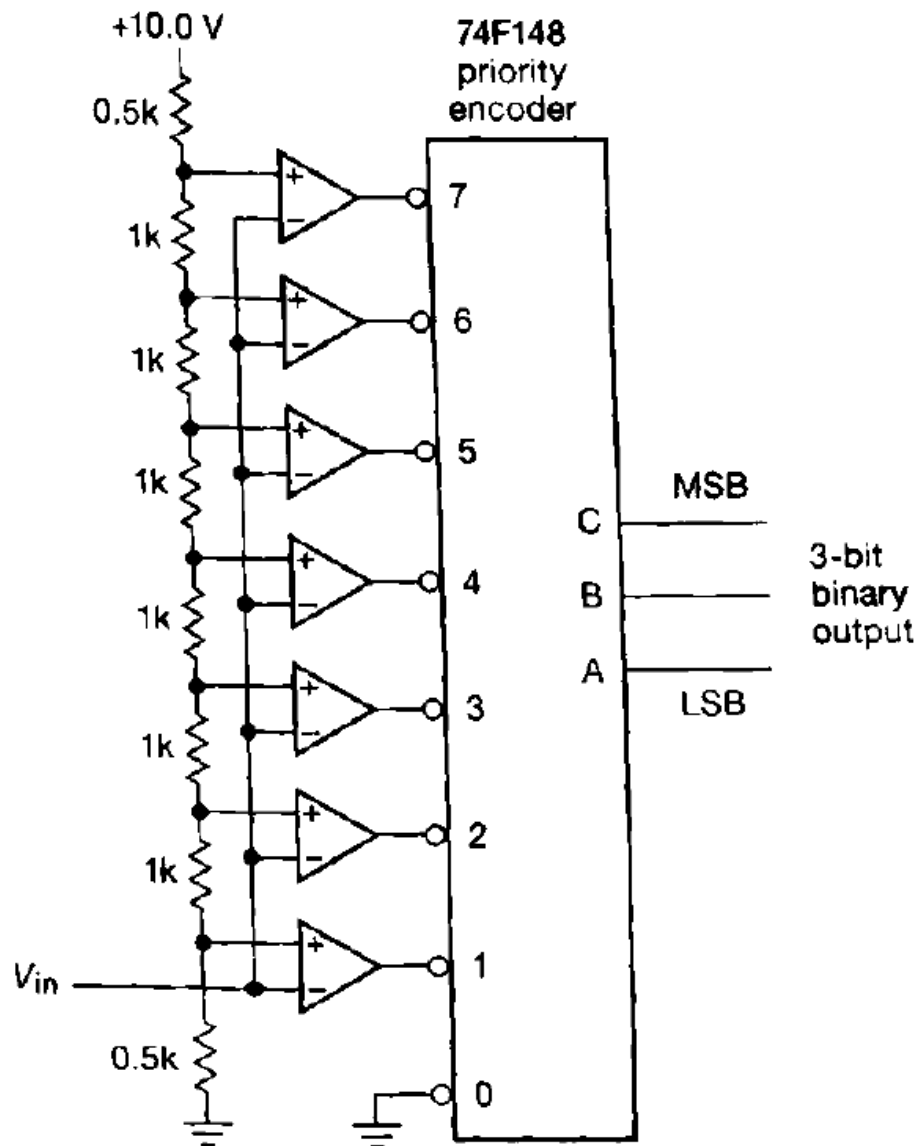


Širokopásmový signál filtrovaný strmým filtrem (Butterworth), kdy Nyquistův limit leží na frekvenci o 25% vyšší než je v pokles spektra o 3 dB díky filtraci. Alias signál je v digitalizovaném signálu značně potlačen.

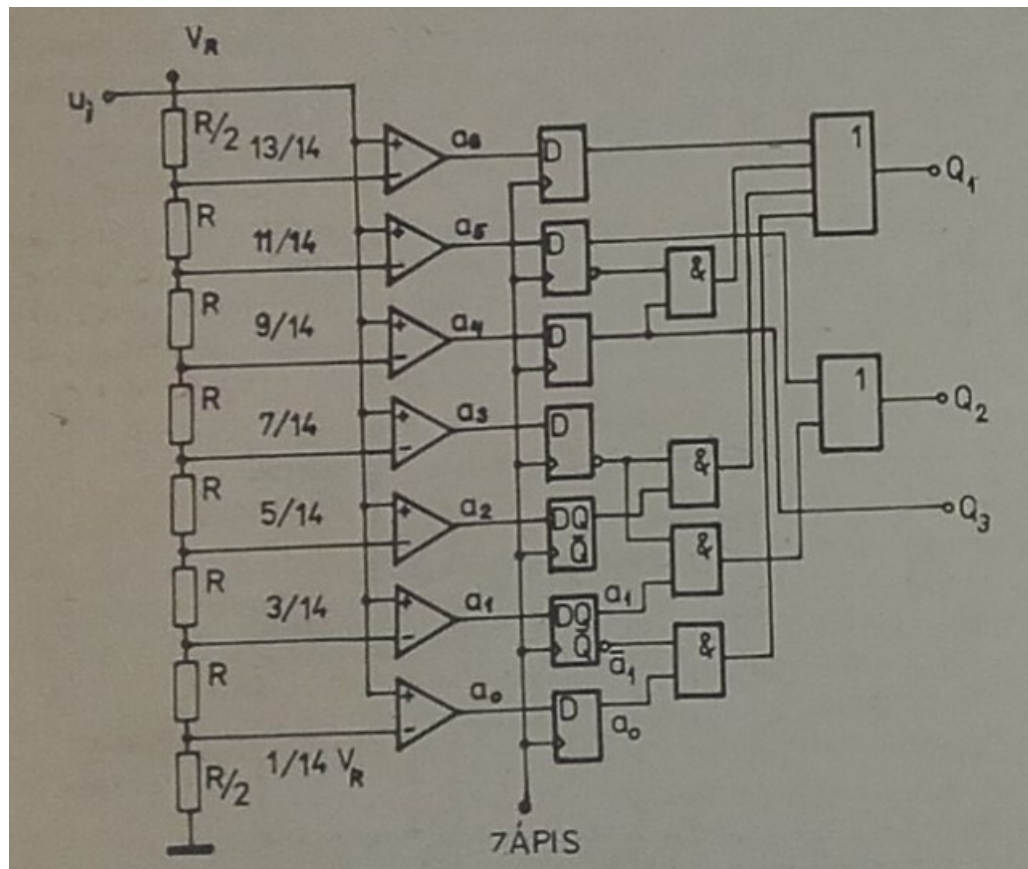
## Typy A/D převodníků

### paralelní převodník “flash”

- je nejrychlejší a jednoduchý
- Jsou vytvořeny na děliči všechny kvantované úrovně signálu  $n$  bitů  $\rightarrow 2^n$  úrovní
- je použito  $(2^n - 1)$  -komparátorů

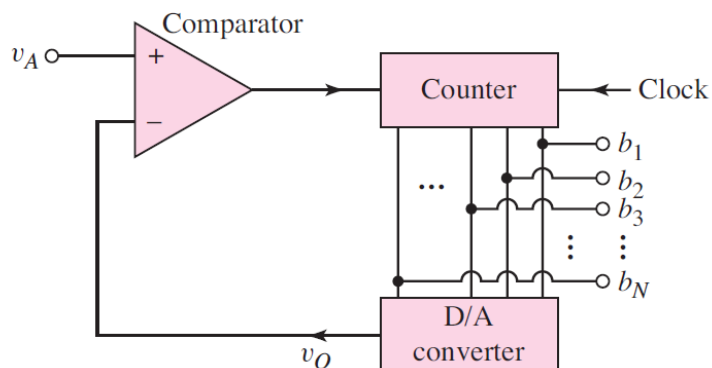


## paralelní převodník “flash”



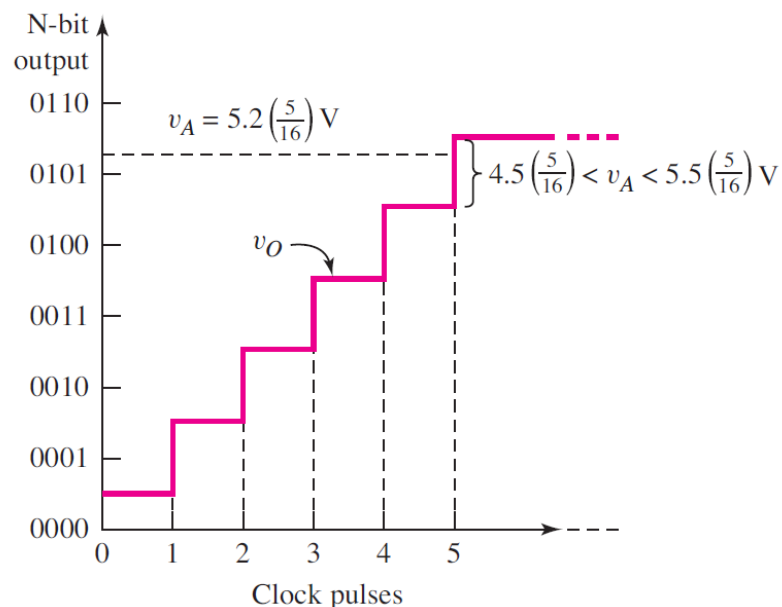
# Převodník s postupnou aproximací

-obsahuje čítač, D/A převodník, komparátor



(a)

a) čtyřbitový převodník A/D

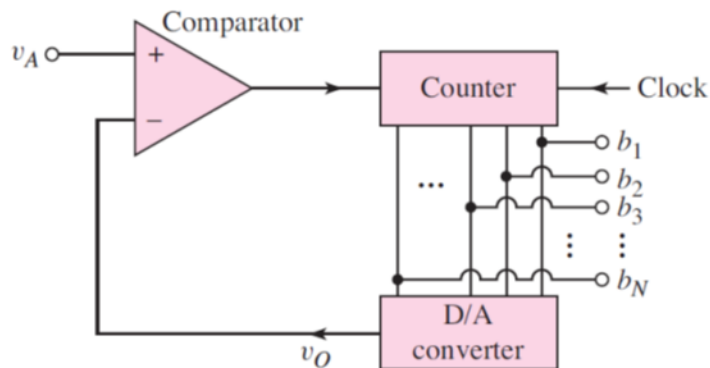


(b)

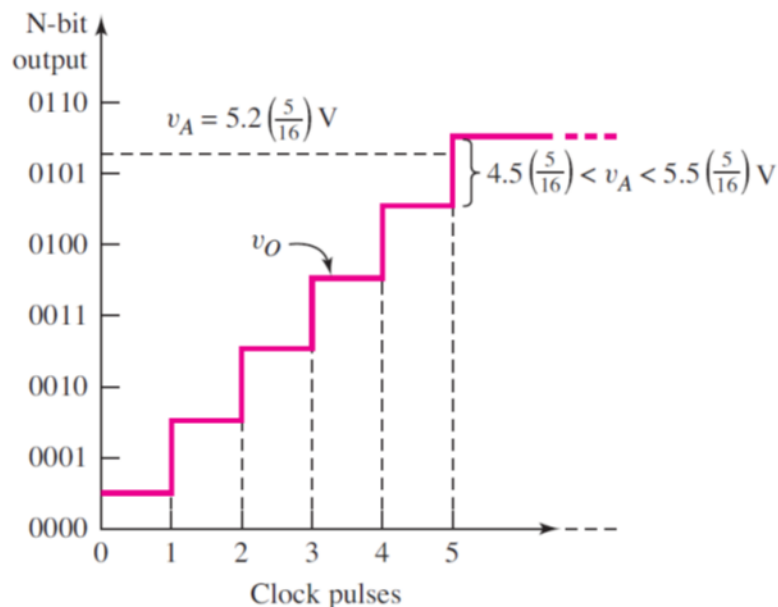
b) časovací diagram převodu

- 1) čítač je vynulován a výstup DA převodníku je nastaven na hodnotu  $v_o = \frac{1}{2} \text{ LSB}$
- 2) převáděná úroveň napětí  $v_A$  je přivedena na vstup komparátoru a na výstupu komparátoru je úroveň "high" (pokud není  $v_A < \frac{1}{2} \text{ LSB}$ ) a čítač počítá směrem nahoru a jeho výstup je převáděn D/A převodníkem na hodnotu  $v_o$
- 3) po dosažení  $v_o > v_A$  se komparátor překlopí do úrovně "LOW" a čítač se zastaví,
- 4) hodnota na výstupu čítače se převede na výstup převodníku

## Příklad převodu



(a)



(b)

Předpokládáme rozsah signálu na vstupu  $0 \leq v_A \leq 5 \text{ V}$

1 LSB pak koresponduje  $\frac{5}{16} \text{ V}$ .

-předpokládejme vstupní úroveň signálu  $v_A = 5.2 \left( \frac{5}{16} \right) \text{ V}$

- počáteční hodnota D/A převodníku je  $\frac{1}{2} \text{ LSB} = \frac{5}{32} \text{ V}$

- Po pátem počítacím pulsu bude na výstupu D/A převodníku:

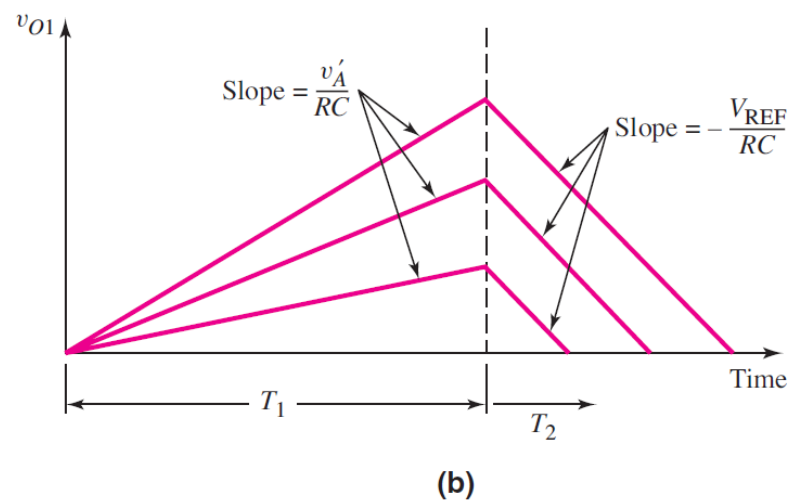
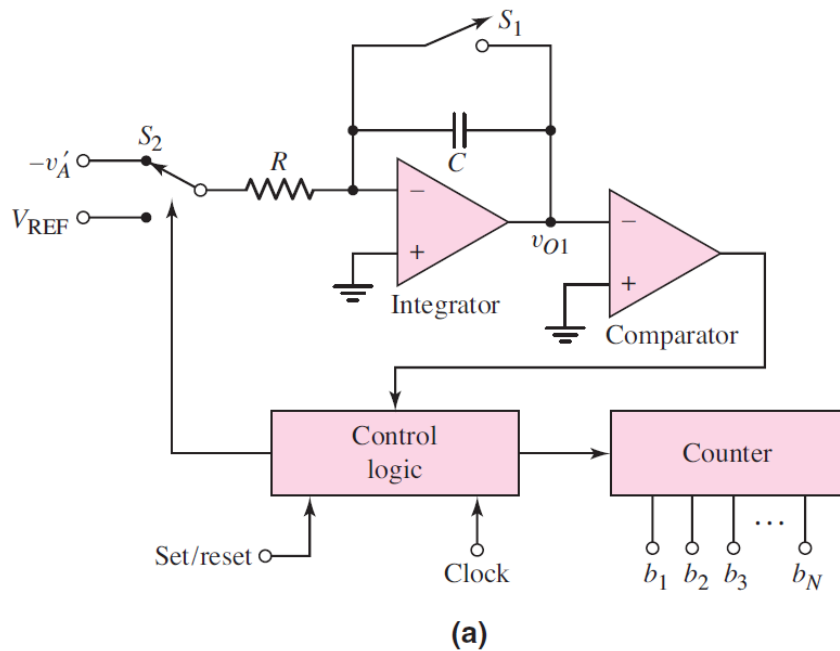
$$v_O = \frac{1}{2} \left( \frac{5}{16} \right) + 5 \left( \frac{5}{16} \right) = 5.5 \left( \frac{5}{16} \right) \text{ V} > v_A \quad \text{a komparátor se překlápí do úrovně "LOW"}$$

chyba převodu je v rozsahu  $\frac{1}{2} \text{ LSB}$



# Integrační převodník

-může být až 20 bit



$S_2$  přepne vstup integrátoru na převáděné napětí  $-v'_A$  a integruje se konstantní dobu  $T_1$  do přetečení čítače, pak se přepne  $S_2$  na  $V_{REF}$  integrator integruje dobu  $T_2$  dokud nebude Výstup integrátoru 0 V, pak se přepne komparátor a čítač přestane čítat. Výstupní číslo Čítače je digitální (dvojková) hodnota převáděného čísla:

$$T_2 = T_1 \left( \frac{v'_A}{V_{REF}} \right) \quad \text{stav čítače po době } T_2 \text{ je: } n = 2^N \left( \frac{v'_A}{V_{REF}} \right)$$

## **Literatura:**

M. Antošová, V. Davídek, Číslicová technika, 2013 Kopp

Richard C. Jaeger, Travis N. Blalock, Microelectronic circuit design,  
2011 by The McGraw-Hill Companies, Inc.

P. Horowitz, W. Hill, The art of Electronics, Third edition, Cambridge University Press,  
1980, 1989, 2015.

Donald A. Neamen, Microelectronics Circuit Analysis and Design, Published by  
McGraw-Hill (2010).