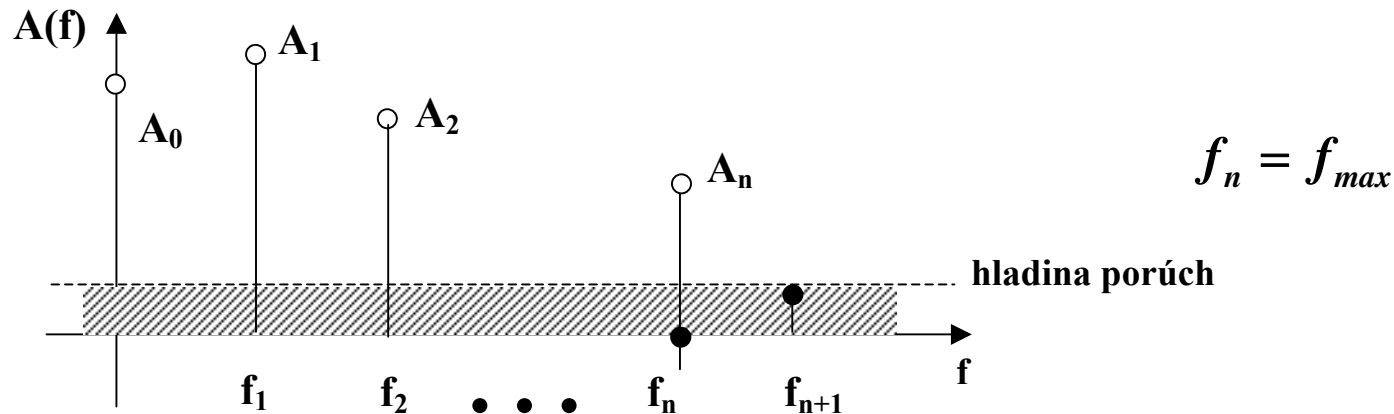


# Číslicové meranie

- **analógové meracie prístroje merajú analógové veličiny**
  - **zobrazujú ich výchylkou ukazovateľa**
  - **výchylka sa mení spojite s meranou veličinou**
- **číslkové meracie prístroje pracujú s diskretnou veličinou – meranú veličinu zobrazujú ako číslo**
- **analógovo-číslkový prevodník (AČP) je prevod medzi spojitými veličinami s nekonečne veľa možnými hodnotami a diskretnými veličinami s konečným počtom hodnôt**
- **AČP vyžaduje vykonať – vzorkovanie**
  - **kvantovanie**
  - **kódovanie**

# Vzorkovanie

- určiť najmenší počet bodov na časovej osi, kedy odčítame hodnoty meranej analógovej veličiny (vzorky)
- umožní to fakt, že frekvenčné spektrum reálneho signálu je ohraňované
- od určitej frekvencie je amplitúda harmonických v spektre menšia ako amplitúda porúch
- umožní to („idealizáciu“) ohraňovanie spektra zhora



## Vzorkovacia teória (1)

- frekvenčne ohraničený signál, ktorý neobsahuje žiadne frekvenčné zložky nad frekvenciou  $f_n = f_{max}$ , môže byť rekonštruovaný bez skreslenia, ak je navzorkovaný s frekvenciou  $f_s$  vyššou než dvojnásobok  $f_{max}$

$$f_s \geq 2 \cdot f_{max}$$

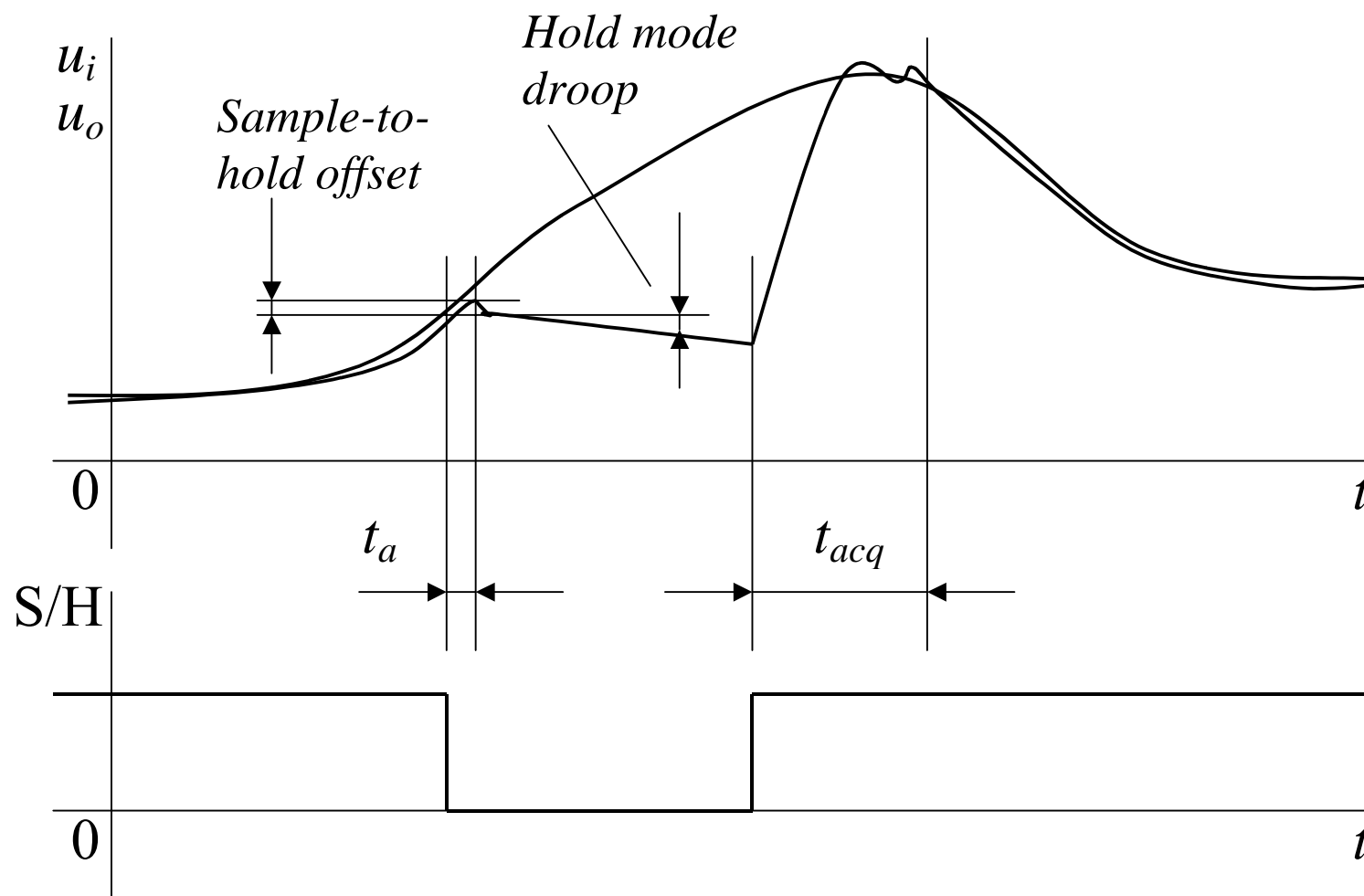
- vzorky odoberáme v časových intervaloch

$$\Delta t \leq \frac{1}{2f_{max}}$$

- meraný signál je nenulový v čase  $T = T_2 - T_1$ , počet vzoriek (bodov odčítania)  $M$

$$M = \frac{1}{\Delta t} + 1 = 2f_{max} \cdot T + 1 \doteq 2f_{max} \cdot T$$

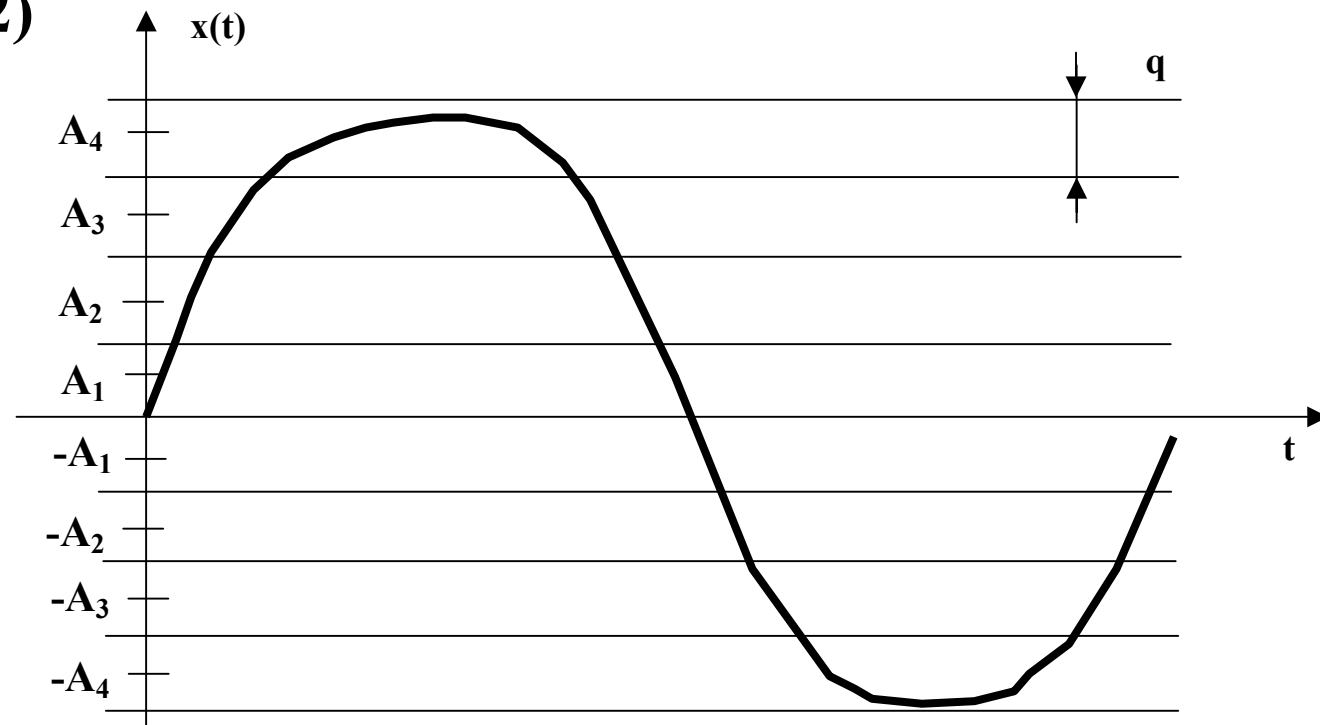
# Vzorkovací obvod – časový priebeh



# Kvantovanie (1)

- každá zo vzoriek (M) môže mať inú amplitúdu
- potom treba pre každé iné kódové slovo
- vplyvom – rôznych porúch
  - kolísania napätia zdrojov
  - konečnej rozlišovacej schopnosti a pod. sa blízke hodnoty ťažko rozlišujú
- meranie je vždy sprevádzané chybou
- každú hodnotu analógovej veličiny v bode odčítania zaokrúhlime na hodnotu zvolenej úrovne (kvantovanej úrovne)
- dopúšťame sa chyby (úmyselne)

## Kvantovanie (2)



- meraná veličina má amplitúdu z intervalu  $\langle 0; q \rangle$

priradíme jej hodnotu  $A_1$

skutočná hodnota je  $A_{1S}$

absolútna chyba (max. hodnota) je  $\Delta_m = A_1 - A_{1S} = \frac{q}{2}$

$q$  –krok kvantovania

## Kvantovanie (3)

- vstupný rozsah – Range, Full Scale (FS)
- rozlišovacia schopnosť – Resolution
  - počet bitov  $n$
  - počet hodnôt  $N = 2^n$
- krok kvantovania  $q = FS/2^n$
- chyba kvantovania  $\pm q/2$
- počet úrovní kvantovania

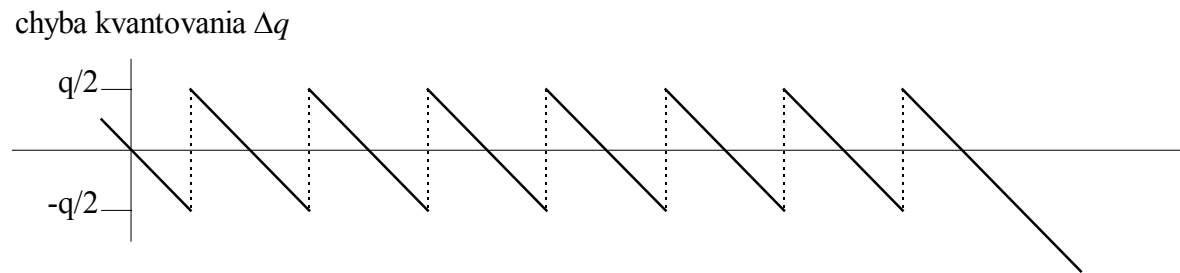
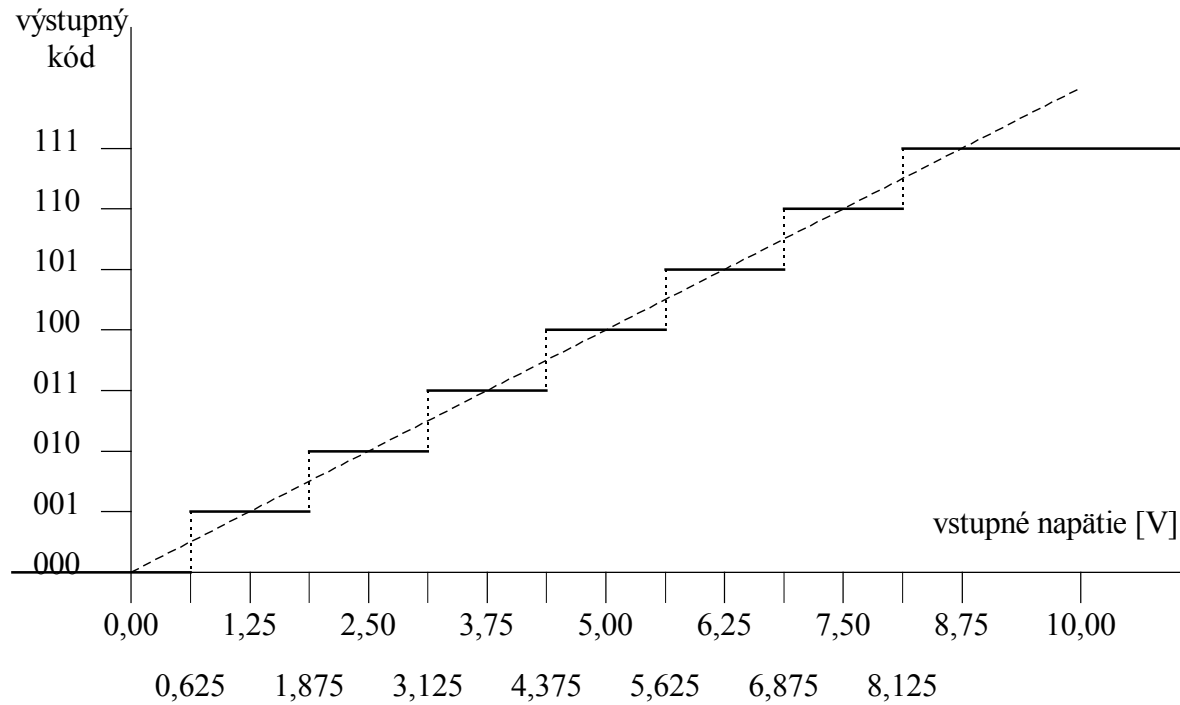
$$N = \frac{A_{max} + |A_{min}|}{q} + 1$$

$$N = \frac{2A_{max}}{q} + 1 \quad (A_{max} = |A_{min}|)$$

- vzorkovanie a kvantovanie je proces náhrady spojite sa meniacej veličiny diskretnými hodnotami

# Kvantovanie (4)

- každej kvantovanej úrovni je priradený vstupný kód (FS=10 V; n=3, N=8)





## Kódovanie (1)

- **kódovanie - priradenie množín symbolov množinám informácií**
  - napr. priradenie kódového slova hladine meranej veličiny
- **binárne (dvojkové) kódy - MSB – Most Significant Bit**
  - **LSB – Least Significant Bit**
- **priamy dvojkový kód –  $N = \sum_{i=0}^{n-1} a_i \cdot 2^i$ ; N je číslo v desiatkovej sústave,**
  - n – počet rádoov kódu,  $a_i$  – koeficient (0 alebo 1)**
  - **výhoda – jednoduchosť vyjadrenia hodnoty**
  - **nevýhoda – obtiažnosť vykonávania aritmetických operácií**
  - **znamienkový bit  $s$  ( $s = 0$  kladné číslo,  $s = 1$  záporné číslo)**
  - **vhodný pre unipolárne AČP**

## Kódovanie (2)

- **dvojkovodesiatkový kód (BCD)**
- **každá dekadická číslica zobrazená štvoricou bitov v priamom dvojkovom kóde**
- **ľahko sa interpretuje (prevádza do 10-kovej sústavy a naopak)**
- **výhodne sa realizujú aritmetické operácie v mikropočítačoch s BCD aritmetikou**
- **dobro sa zobrazuje na displeji ČMP**
- **vhodný pre unipolárne AČP**
- **nevýhoda – potreba väčšieho počtu bitov**

## Kódovanie (3)

- dvojково komplementárny kód (doplňkový)
- najvyšší bit znamienkový (0 – kladné čísla, 1 – záporné čísla)
- kladné čísla sa určia ako pre priamy binárny kód
- záporné čísla ako hodnota doplnku každého slova do  $2^n$  (pri n-bitovom prevodníku)
- $$N = 2^n - \sum_{i=0}^{n-1} a_i 2^i \quad (s = 1)$$
- vhodný na vykonávanie aritmetických operácií v PC
- používa sa pre bipolárne AČP
- čísla v intervaloch  $\langle -2^{n-1}; 2^{n-1} - 1 \rangle$

## Kódovanie (4)

- dvojkový kód s posunutím (Offset Binary Code)
- $$N = \sum_{i=0}^{n-1} a_i 2^i - 2^{n-1}$$
- najnižšie zobraziteľné číslo ( $-2^{n-1}$ ) – kódové slovo 0000
- nule zodpovedá kódové slovo 1000
- najvyššie zobraziteľné číslo  $2^{n-1} - 1$
- kód sa používa u ČA a AČ bipolárnych prevodníkov – v tomto kóde sa ľahko realizujú (netreba ďalší bit na vyjadrenie polarít)
- kód zodpovedá posuvu bipolárneho signálu  $\langle -2^{n-1}; 2^{n-1} - 1 \rangle$  pripočítaním hodnoty  $2^{n-1}$
- nevýhody: nula je nenulové kódové slovo; problém s aritmetickými operáciami

## **Kódovanie (5)**

- **Greyov (reflexný, cyklický) kód**
- **od priameho dvojkového sa líši – pri prechode kódu na susedné číslo v desiatkovej sústave sa mení len jeden element kódu**
- **výhodné napr. pri premene výchylky na kód**
- **pri aritmetickom spracovaní sa urobí prevod do doplnkového kódu**

## Kódovanie (6)

- **inverzný kód**
- **najvyšší bit je znamienkový (0 – kladné číslo, 1 – záporné číslo)**
- **kladné čísla ako pre priamy binárny kód**
- **záporné čísla – inverzné slovo, negácia všetkých rádo**
  
- **nevýhoda – dve kódové slová pre nulovú hodnotu → problém s aritmetickými operáciami**

## Kódovanie (7) – unipolárne AČP

<b>Analógové napätie</b>	<b>Priamy dvojkový kód</b>	<b>BCD kód</b>	<b>Greyov kód</b>
<b>0</b>	<b>0000</b>	<b>0000 0000</b>	<b>0000</b>
<b>1</b>	<b>0001</b>	<b>0000 0001</b>	<b>0001</b>
<b>2</b>	<b>0010</b>	<b>0000 0010</b>	<b>0011</b>
<b>3</b>	<b>0011</b>	<b>0000 0011</b>	<b>0010</b>
<b>4</b>	<b>0100</b>	<b>0000 0100</b>	<b>0110</b>
<b>5</b>	<b>0101</b>	<b>0000 0101</b>	<b>0111</b>
<b>⋮</b>	<b>⋮</b>	<b>⋮</b>	<b>⋮</b>
<b>10</b>	<b>1010</b>	<b>0001 0000</b>	<b>1111</b>
<b>11</b>	<b>1011</b>	<b>0001 0001</b>	<b>1110</b>

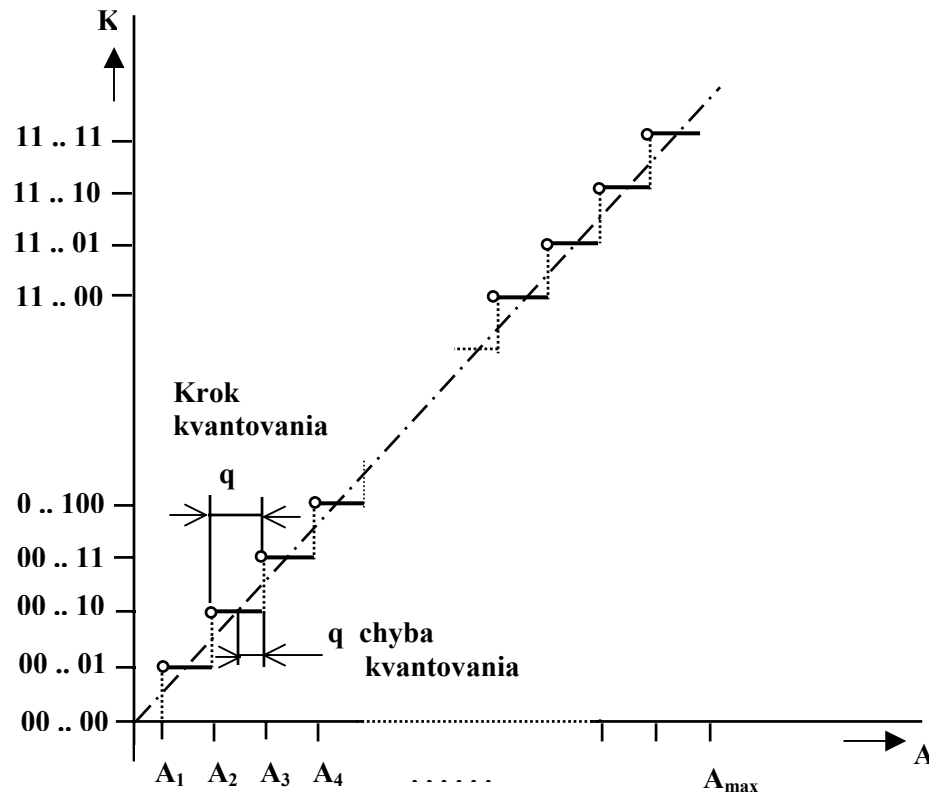
## Kódovanie (8) – bipolárne AČP

<b>analógové napätie</b>	<b>znamienko + priamy dvojkový kód</b>	<b>dvojkovo doplnkový kód</b>	<b>dvojkový kód s posunutím</b>	<b>inverzný kód dvojkový</b>
<b>+4</b>	<b>0100</b>	<b>0100</b>	<b>1100</b>	<b>0100</b>
<b>+3</b>	<b>0011</b>	<b>0011</b>	<b>1011</b>	<b>0011</b>
<b>+2</b>	<b>0010</b>	<b>0010</b>	<b>1010</b>	<b>0010</b>
<b>+1</b>	<b>0001</b>	<b>0001</b>	<b>1001</b>	<b>0001</b>
<b>0+</b>	<b>0000</b>	<b>0000</b>	<b>1000</b>	<b>0000</b>
<b>0 -</b>	<b>1000</b>	<b>0000</b>	<b>1000</b>	<b>1111</b>
<b>-1</b>	<b>1001</b>	<b>1111</b>	<b>0111</b>	<b>1110</b>
<b>-2</b>	<b>1010</b>	<b>1110</b>	<b>0110</b>	<b>1101</b>
<b>-3</b>	<b>1011</b>	<b>1101</b>	<b>0101</b>	<b>1100</b>
<b>-4</b>	<b>1100</b>	<b>1100</b>	<b>0100</b>	<b>1011</b>



# AČP – analógovo-číslicové prevodníky (1)

- základ číslicových meracích systémov
- prevod z analógovej formy do číslicovej



## AČP (2) – Základné vlastnosti

### \* Rozlišovacia schopnosť (RS)

- počet rozlíšiteľných úrovní analógového signálu
- n-bitový binárny prevodník  $2^n$ , m-miestny dekadický prevodník  $10^m$
- vzhľadom na chyby prevodníka, je to len ideálny stav, reálne  $RS < 2^n$ , resp.  $< 10^m$

### \* Rozsah (R, resp. FS, FSR)

- je daný maximálnou a minimálnou hodnotou spracováanej analógovej veličiny
- obvykle 0 až 10 V; 0 až 1 V;  $\pm 5$  V a pod.

### \* Krok kvantovania (q)

- niekedy označovaný citlivosť prevodníka, alebo aj LSB
- $q = FS/RS$

## **AČP (3) – Základné vlastnosti**

### **\* Rýchlosť prevodníka**

- počet prevodov za jednotku času, alebo čas potrebný na 1 prevod

### **\* Kód prevodníka**

- kód, v akom prevodník pracuje – boli prebrané pri kódovaní
- osobitná skupina: nelineárne AČP (logaritmické, exponenciálne)

### **\* Použitá logika**

- s akými typmi logických obvodov môže spolupracovať (TTL, DTL, CMOS a pod.)

### **\* Stabilita prevodníka**

- vyjadruje stálosť vlastností prevodníka pri pôsobení rušivých vplyvov (teplota, čas, vlhkosť a pod.)
- určuje sa ako zmena relatívnej hodnoty celkovej chyby prevodníka na jednotkovú zmenu rušivej veličiny ( $\pm 0,001\%$  / $^{\circ}\text{C}$ ;  $\pm 10^{-4}$  / 1000 hod a pod.)

## **AČP (4) – Základné vlastnosti**

### **\* Chyba (presnosť) prevodníka**

- **rozdiel medzi teoretickou hodnotou analógovej veličiny zodpovedajúcej danému kódu a skutočnou vstupnou hodnotou veličiny AČP**
- **dve zložky: aditívna a multiplikatívna**
- **Aditívna zložka -  $\Delta_a$  (absolútna hodnota)**
  - **nezávislá od hodnoty analógového signálu**
  - **určuje posun reálnej prevodovej charakteristiky voči ideálnej**
  - **zapríčiňuje ju spravidla chyba nuly, chyba kvantovania, diferenciálna nelinearita**
  - **udáva sa:  $\pm 1$  LSB,  $\pm 40$  mV,  $\pm 0,1$  % FS**

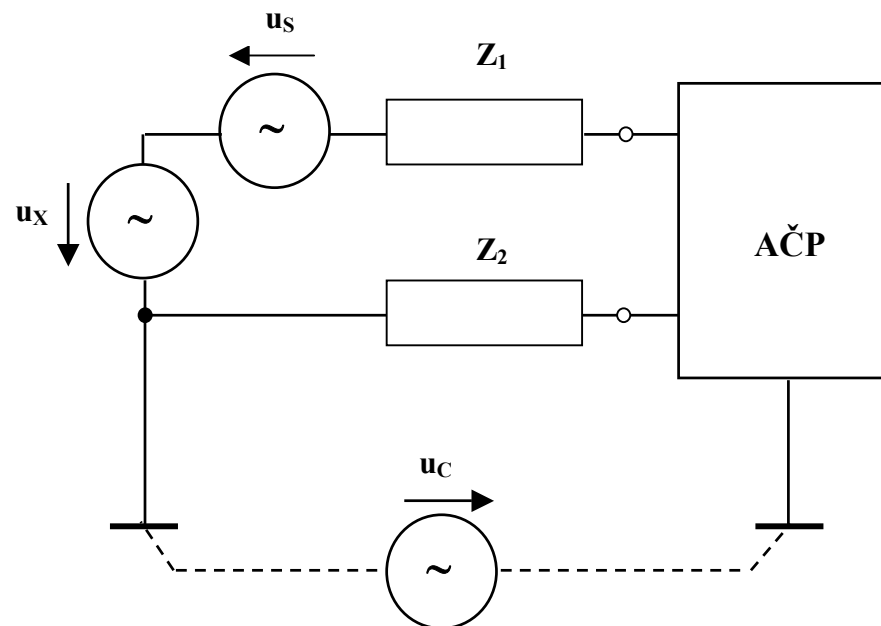
## **AČP (5) – Základné vlastnosti**

- **Multiplikatívna zložka -  $\Delta_m$  (absolútna hodnota)**
  - závisí od hodnoty analógového signálu
  - určuje zmenu sklonu reálnej prevodovej charakteristiky voči ideálnej
  - zapríčinená je chybou zosilnenia analógových častí a nelinearitou prevodníka
  - udáva sa v percentách hodnoty analógovej veličiny
- **Celkovú chybu prevodníka môžeme vyjadriť (abs. hodnotu)**
$$\Delta_p = \Delta_a + \Delta_m = \Delta_a + \delta_m \cdot A$$

**A – hodnota meranej veličiny**
- **Spektrum používaných AČP je široké; odlišujú sa rozlišovacou schopnosťou, spôsobom prevodu, rýchlosťou, presnosťou, technológiou výroby a pod.**

## AČP (6) – Rušivé signály

- rušivé signály ovplyvňujú výsledok merania
- dva druhy rušenia - sériové rušivé signály ( $u_s$ )  
- súhlasné rušivé signály ( $u_c$ )
- na potlačenie rušivých signálov sa používajú rôzne konštrukcie prístrojov, špeciálne metódy prevodu a pod. Miesta vzniku rušivých signálov sú na obrázku



$Z_1, Z_2$  – impedancie prírodných vodičov,  $u_x$  - merané napätie

## AČP (7) – Rušivé signály

- **sériové rušivé napätie**
  - **pripočítava sa k meranému napätiu**
  - **vzniká indukovaním napätia v prívodných vodičoch, prietokom prúdu impedanciami prívodných vodičov a pod.**
  - **pôsobí súčasne na obidve vstupné svorky s rovnakou amplitúdou, ale opačnou fázou**
  - **aby sme ho mohli potlačiť, musí sa nejako odlišovať od meraného signálu (frekvenciou, tvarom a pod.)**
- **Potlačenie sériových rušivých signálov vyjadrujeme parametrom SMR**

**(Serial Mode Rejection)**       $SMR = 20 \cdot \log \frac{U_{Smax}}{\Delta_S} \quad [dB]$

$\Delta_S$  – **maximálna hodnota chyby spôsobená rušivým signálom**

$U_{Smax}$  – **maximálna hodnota rušivého napätia**

## AČP (8) – Rušivé signály

- **súhlasné rušivé napätie**
  - označuje sa aj ako **súčtové rušivé napätie**
  - vzniká ako rozdiel potenciálov zemniacich svoriek zdroja meraného signálu a AČP
  - pôsobí súčasne na obidve svorky zdroja meraného napätia proti zemi s rovnakou amplitúdou a fázou.
- **Potlačenie súhlasných rušivých signálov vyjadrujeme parametrom**  
**CMR – (Common Mode Rejection)**

$$CMR = 20 \log \frac{U_{C \max}}{\Delta_C} \quad [dB]$$

$U_{C \max}$  – maximálna hodnota súhlasného rušivého napätia

$\Delta_C$  – maximálna hodnota chyby spôsobená rušivým signálom



## Zdroje referenčných napätí (ZRN)

- pre AČP sú potrebné ZRN
- vyžaduje sa - presnosť nastavenej hodnoty napätia
  - časová a teplotná stabilita ( $10^{-4}$  / rok,  $10^{-6}$  / °C)
  - prúdová zaťažiteľnosť (1 až 10 mA)
- používajú sa referenčné zdroje 2,5; 5; 10 V (jedna alebo obidve polarity)
- obvyklá konštrukcia ZRN – presný referenčný prvok v spojení s presným operačným zosilňovačom (OZ)
- OZ zabezpečí prúdovú zaťažiteľnosť a zníži vstupný odpor ZRN

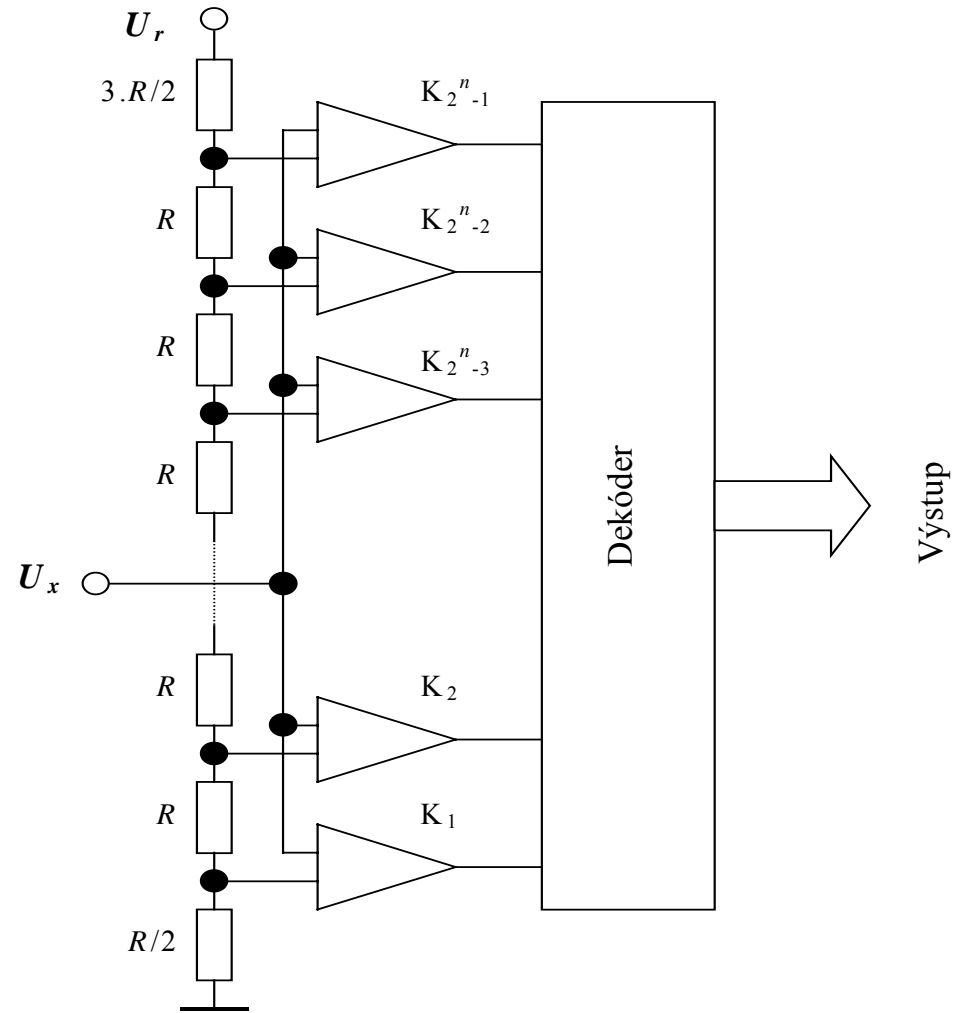
# Princíp činnosti AČP

- komparačné metódy AČ prevodu - najrýchlejšie
- kompenzačné metódy AČ prevodu - najbežnejšie
- integračné metódy AČ prevodu - najpresnejšie
- kombinované - naj- naj...
- sigma-delta – najmodernejšie
- stochastické metódy AČ prevodu - špeciálne
- vo všeobecnosti slúžia na prevod rôznych druhov analógových veličín (napätia, prúdu, času, frekvencie, fázy a pod.) na kód
- zaoberáme sa prevodom DC napätia (prúdu) na kód

## Komparačná metóda AČ prevodu (1)

- **n-bitový AČP obsahuje  $(2^n-1)$  komparátorov**
- **komparátor porovnáva merané napätie  $U_x$  s referenčnými napätiami  $U_{ri}$**
- **hodnoty  $U_{ri}$  tvoria aritmetický rad, rozdiel medzi dvoma susednými hodnotami –  $q$  (krok kvantovania)**
- **výstup komparátora je logický signál L alebo H (v závislosti či  $U_x < U_{ri}$  alebo  $U_x > U_{ri}$ )**
- **dekóder – prevod signálov na kód**
- **rýchla ( $10^7$ - $10^{10}$  prevodov/s), málo presná metóda (6-8 bitov), nereálny malý krok  $q$**
- **spracovanie obrazu, v číslicových osciloskopoch, spracovanie radarových signálov,...**

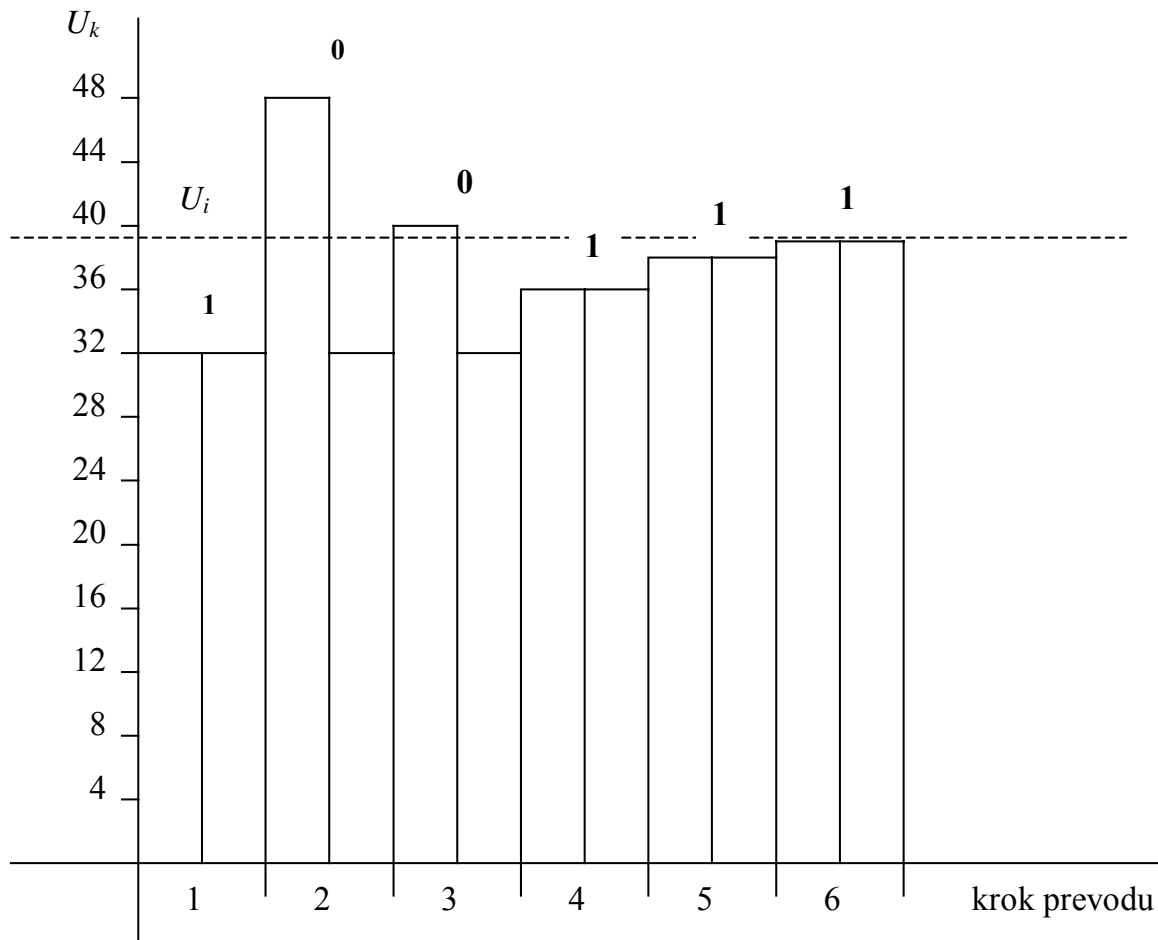
# Komparačná metóda AČ prevodu (2)



## Kompenzačná metóda AČ prevodu (1) (postupná aproximácia, váženie)

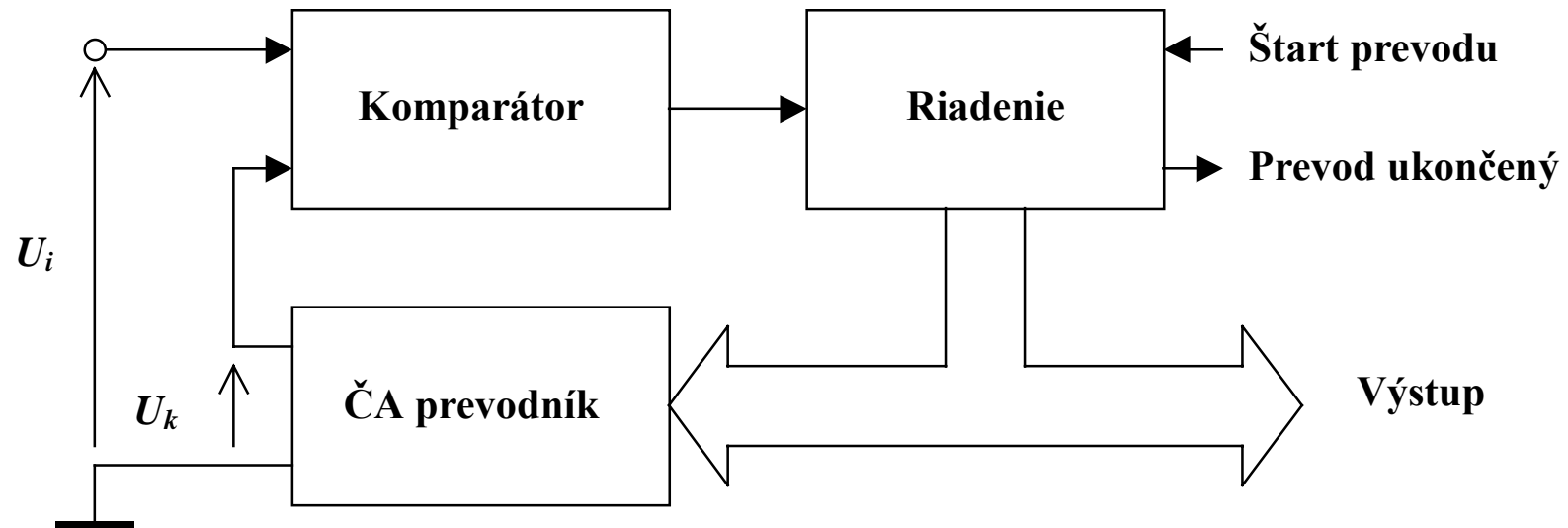
- kompenzácia meraného napätia  $U_x$  známym kompenzačným  $U_k$
- nastavenie  $U_k$  prebieha po krokoch od najvyššieho rádu po najnižší
- v každom kroku sa  $U_k$  zväčší o hodnotu zodpovedajúcu binárnemu alebo BCD kódu a porovná sa s  $U_x$
- $U_k \leq U_x$  – nasleduje ďalší krok
- $U_k \geq U_x$  – najskôr sa odčíta posledný prírastok, potom ďalší krok
- logický signál na výstupe komparátora je v sériovom tvare
- udáva binárne alebo BCD kódovanú hodnotu  $U_x$
- rýchla (0,001 s), presná (0,01 %) metóda
- nepotláča vplyv sériového rušivého napätia

## Kompenzačná metóda (2)



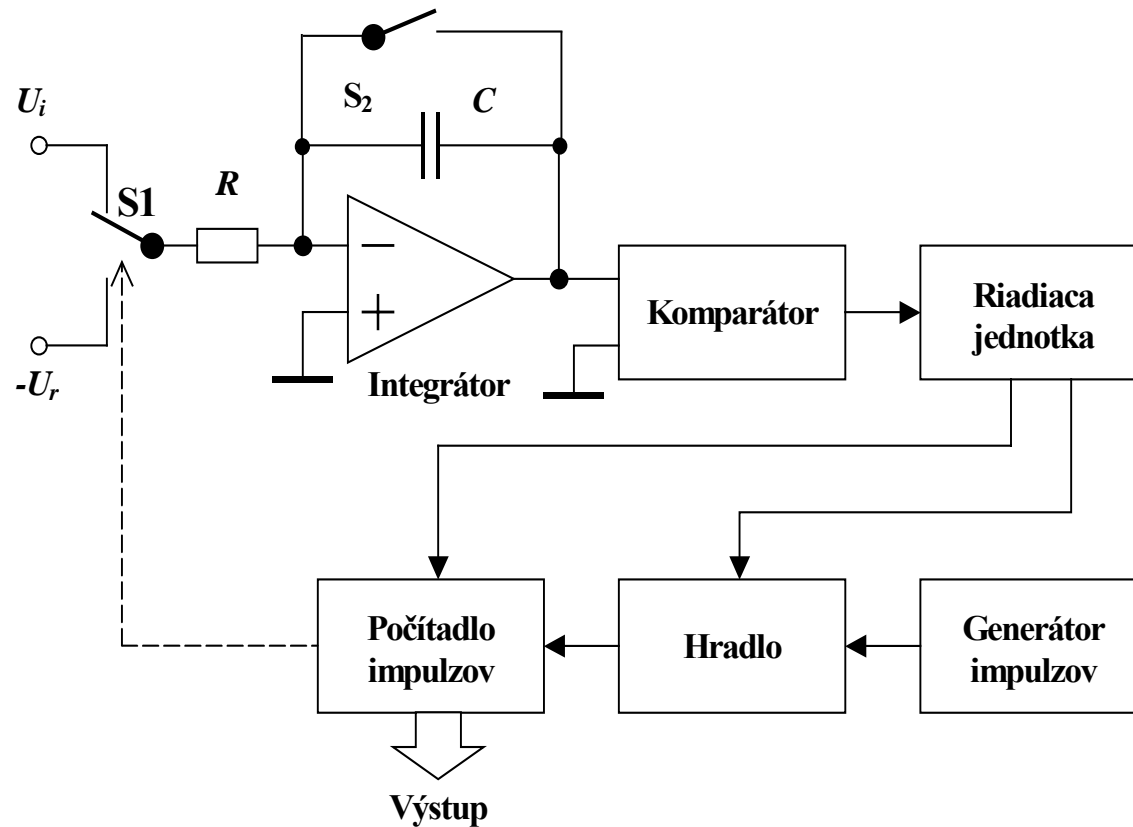
pre  $q = 1 \text{ V} \Rightarrow U_x = 1 \cdot 32 + 0 \cdot 16 + 0 \cdot 8 + 1 \cdot 4 + 1 \cdot 2 + 1 \cdot 1 = 39 \text{ V}$

## Kompenzačná metóda (3)



# Integračná metóda – metóda dvojitej integrácie (1)

- princíp – postupná integrácia meraného a referenčného napätia

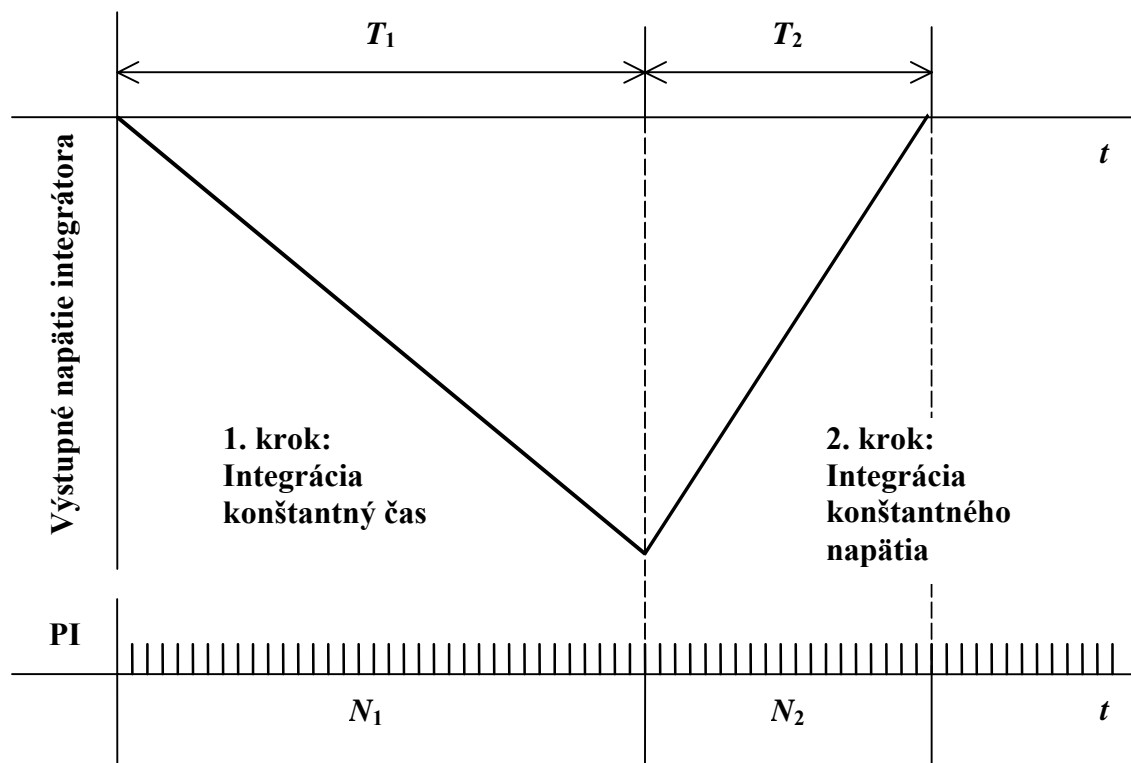




## Metóda dvojitej integrácie (2)

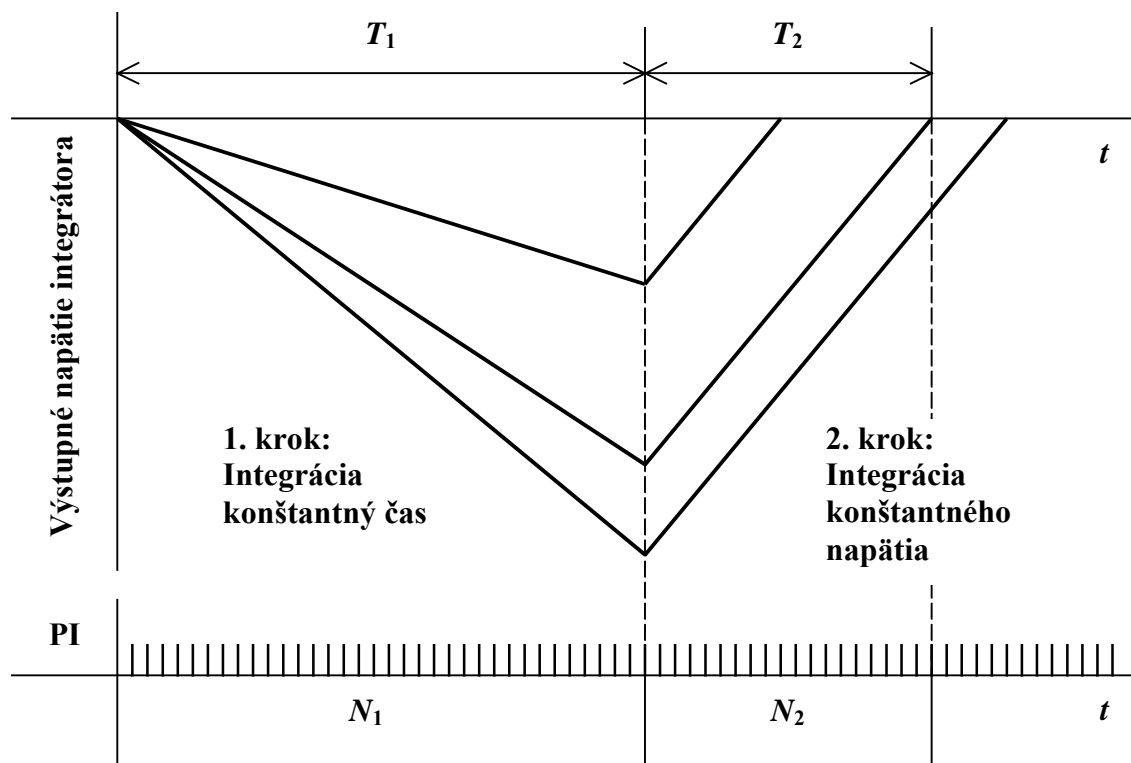
- začiatok merania  $S_2$  zapnuté (nulovanie integrátora) a nulovanie počítadla impulzov (PI)
- 1. takt – vstup integrátora ( $I$ ) merané napätie  $U_X \geq 0$
- rast výstupného napätia integrátora  $U_I$  so strmost'ou  $U_X$
- po čase  $T_1$  (daný naplnením PI) je na výstupe I (časová konštanta  $\tau$ ) napätie  $U_I = (T_1/\tau) \cdot U_X$ ; koniec 1. taktu merania
- 2. takt – vstup  $I$  je záporné referenčné napätie  $U_r$
- výstup  $I$  sa mení so smernicou danou  $U_r$  opačným smerom
- $U_I$  dosiahne nulu, vtedy  $U_I = (T_2/\tau) \cdot U_r$
- $\frac{T_2}{\tau} \cdot U_R = \frac{T_1}{\tau} \cdot U_X \Rightarrow U_X = \frac{T_2}{T_1} \cdot U_R \Rightarrow U_X = K \cdot T_2$

# Metóda dvojitej integrácie (3)



$$T_2 = T_1 \cdot \frac{U_x}{U_r}$$

# Metóda dvojitej integrácie (4)



$$T_2 = T_1 \cdot \frac{U_x}{U_r}$$

## **Integračné metódy**

- **najpresnejšie, merajú strednú hodnotu**
- **potlačenie sériových rušivých napätí (hlavne ak je ich perióda celočíselný násobok integrácie vstupného signálu)**
- **pomalé (čas prevodu 0,01 až 0,1 s)**
- **časová konštanta  $\tau$  nevplyva**
- **nevplyvajú ani pomalé zmeny  $f$  generátora impulzov**
- **najčastejšie použitie v multimetoch**
  - **3 ½ až 8 ½ miestne**
  - **približne 3 merania/sek.**
- **metódy 3-násobnej, 4-násobnej integrácie ...**

## **Sigma – delta AČP ( $\Sigma - \Delta$ AČP)**

- **najmodernejšia, najvyššia linearita, potreba autokalibrácie**
- **presné a pomalé: 24 bitov,  $10^1 - 10^2$  prevodov/s**
- **použitie – na spracovanie signálov v pásme  $10^1 - 10^4$  Hz (audio)**
- **použitie aj v presných číslicových voltmetroch**
- **používa sa niekoľko algoritmov číslicového spracovania signálu – presahuje rámec predmetu**
- **základ  $\Sigma - \Delta$  modulátor a číslicový filter**
- **dochádza k prevzorkovaniu K-krát ( $K \gg 1$ ) oproti vzorkovacej teoréme**
- **sú alternatívou pre integračné prevodníky**
- **nevhodné pri prepínaní signálov cez multiplexor – zahltenie vstupu**

## Stochastické metódy AČ prevodu

- porovnávanie veľkosti meraného  $U_X$  so stochastickým (náhodným) referenčným signálom
- náhodný signál – definované vlastnosti (rozdelenie hustoty pravdepodobnosti)
- pri prevode zistujeme čas, za ktorý je merané  $U_X$  väčšie ako náhodný signál
- uvedený čas je úmerný meranému  $U_X$
- použitie v špeciálnych prípadoch

## Kombinované metódy AČ prevodu

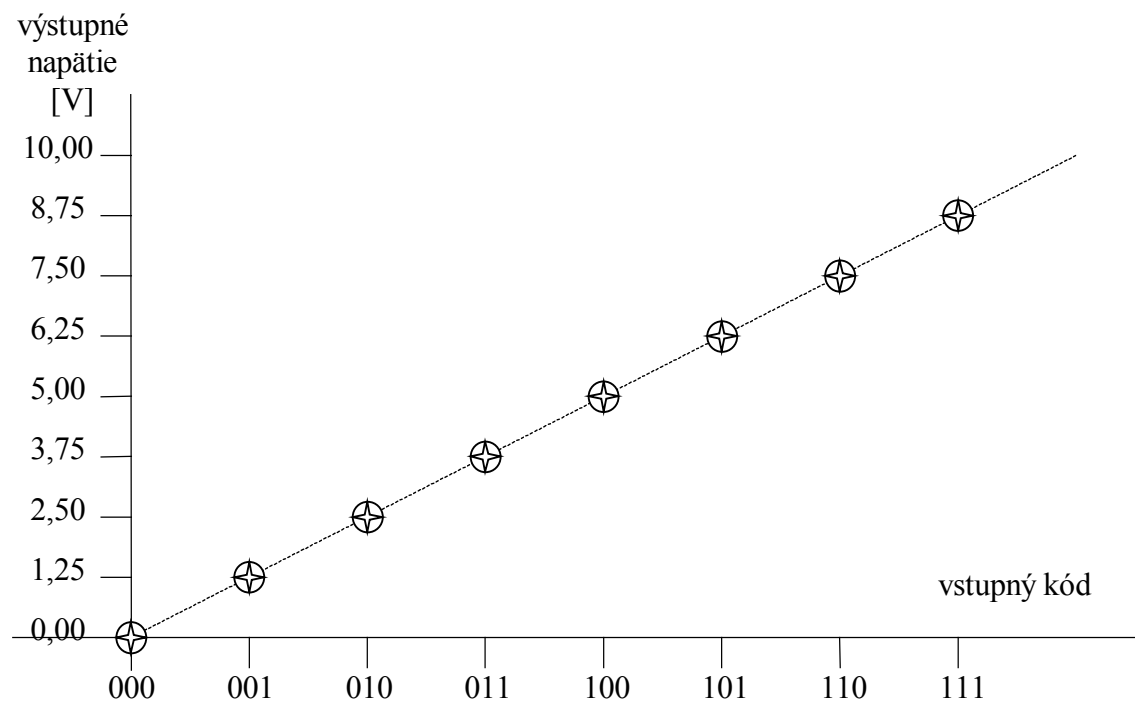
- spájajú výhody základných metód
- vyhovujú špeciálnym požiadavkám

## Číslicovo-analógové prevodníky (ČAP) (1)

- **nie je tak veľa metód ČA prevodu ako u AČP; paralelné ČAP – najrozšírenejšie, sériové ČAP, ČAP s pomocným prevodom**
- **priamy spôsob prevodu kódového slova na analógovú veličinu**
- **výstup je určený váženým súčtom odstupňovaných referenčných hodnôt výstupnej veličiny**
- **veľkosť hodnôt odpovedá váham bitov kódového slova**
- **váhové koeficienty odpovedajú hodnotám príslušných bitov**
- **referenčné hodnoty sú odstupňované veľkosti DC prúdov a sčítavajú sa v uzle – celkový prúd je výstup ČAP (priamy paralelný prevod)**
- **ak sa sčítavajú postupne v čase, ide o priamy sériový prevod**

## ČAP (2) – prevodová charakteristika

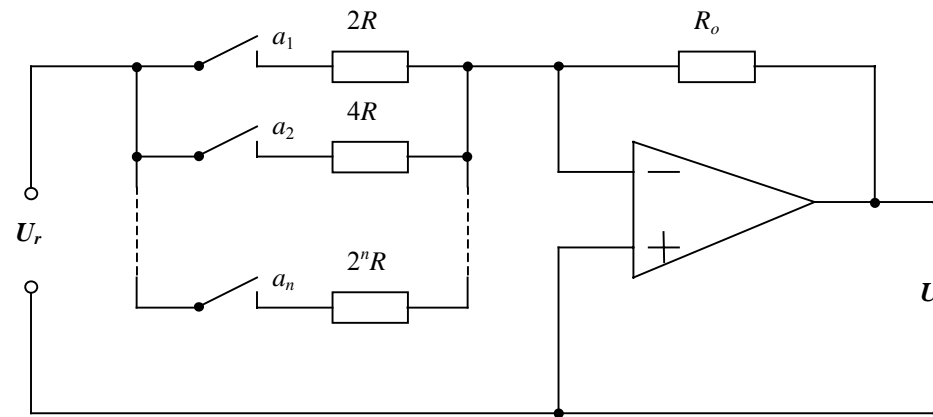
- ČAP – rozsah 10 V, 3 bitový prevodník,  $2^3$  bodov
- ideálny ČAP





## ČAP (3) – paralelný prevod

- vyznačuje sa tým, že koeficienty  $a_1 - a_n$  číslcového slova sú k dispozícii súčasne
- poloha prepínačov zodpovedá hodnotám (0; 1) koeficientov  $a_i$
- vysoká rýchlosť prevodu ( $10^{-8}$  až  $10^{-9}$  s)
- príklad: ČAP s metódou sčítavania (váhových) prúdov

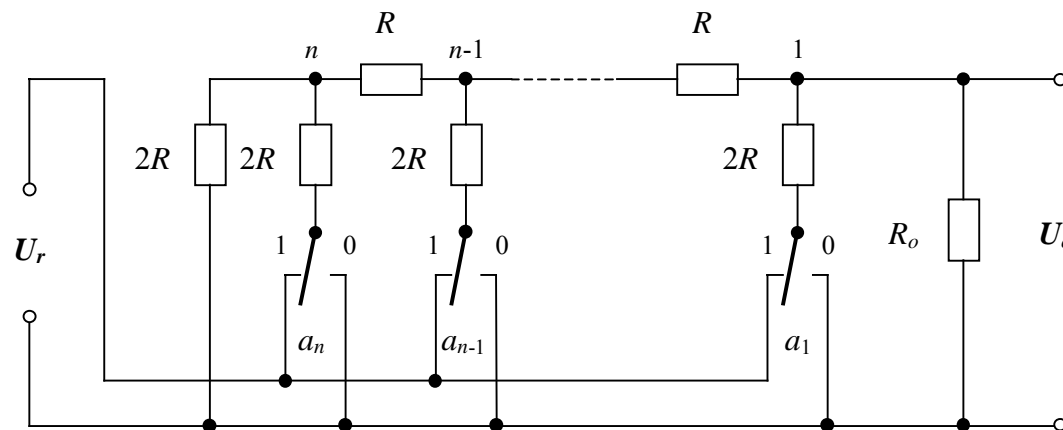


$$U_0 = U_r \cdot R_0 \cdot \sum_{i=1}^n \frac{a_i}{2^i R}; \quad R_0 = R \quad U_0 = U_r \sum_{i=1}^n \frac{a_i}{2^i}$$

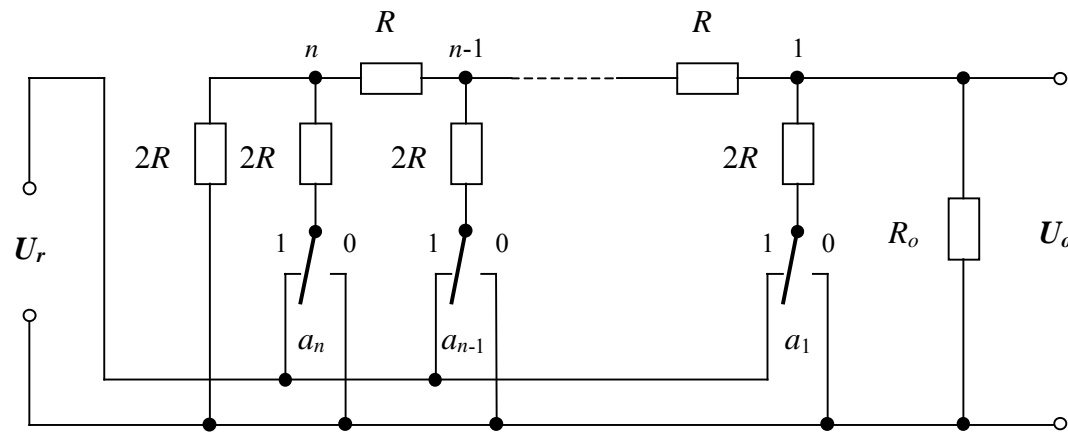
- nedostatok – veľký rozsah hodnôt odporov  $\Rightarrow$  problémy s realizáciou, teplotná a časová stabilita  $\Rightarrow$  nižšia presnosť ČAP

## ČAP (4) – paralelný prevod

- nedostatok odstraňujú paralelné ČAP s odporovou sieťou  $R - 2R$  (teda len 2 hodnoty odporov) s napät'ovým spínaním
- ľahšia realizácia ako integrovaný obvod
- váha jednotlivých bitov je daná polohou prepínačov, nie hodnotou odporov
- presnosť ČAP ovplyvňujú len pomery medzi hodnotami odporov, nie absolútna hodnota  $\Rightarrow$  výborná teplotná a časová stabilita



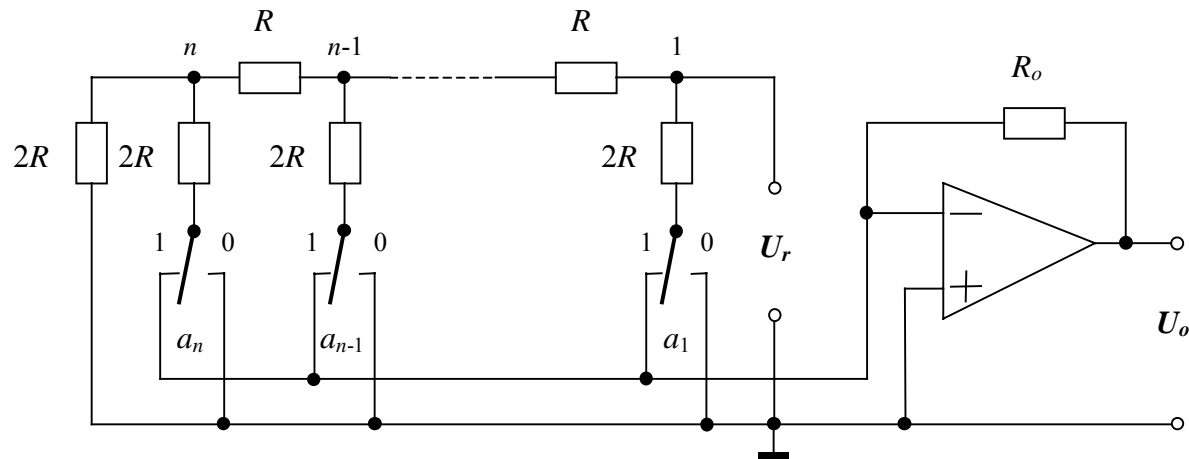
## ČAP (5) – paralelný prevod



- Pravá strana spínačov  $2R$  na napätí  $U_r$ , tečie prúd do uzlov odporovej siete
- čím je uzol bližšie k výstupu prevodníka, tým viac príslušný prúd prispieva k  $U_0$
- prepínač vpravo (na zem) – príspevok k  $U_0$  je nulový
- $$U_0 = U_r \frac{R_0}{R_0 + R} \cdot \sum_{i=1}^n \frac{a_i}{2^i}$$
- nevýhoda – prúd buď tečie cez  $2R$ , alebo je nulový  $\Rightarrow$  reaktančné zložky neideálnych prvkov zhoršujú dynamické vlastnosti

## ČAP (6) – paralelný prevod

- zapojenie – prúdy v odporovej sieti sa nemenia (ČAP so sieťou R – 2R a s prúdovým spínaním)



- operačný zosilňovač má 1 vstup na virtuálnej nule  $\Rightarrow$  cez odpory tečú rovnaké prúdy nezávisle od polohy prepínačov
- $U_r$  je zaťažené konštantným prúdom a parazitné C a L nevplyvajú

- $$U_0 = U_r \frac{R_0}{R} \sum_{i=1}^n \frac{a_i}{2^i}$$

# System na zber údajov

