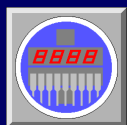


Číslicové meranie

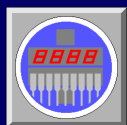
doc. Ing. Peter Kukuča, CSc. MIET
KMer FEI STU



Analógovo-číslicový prevod

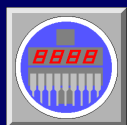
Prevod medzi spojitými veličinami s nekonečne veľa možnými hodnotami a diskrétnymi veličinami s konečným počtom hodnôt.

- Kvantovanie
- Vzorkovanie
- Kódovanie

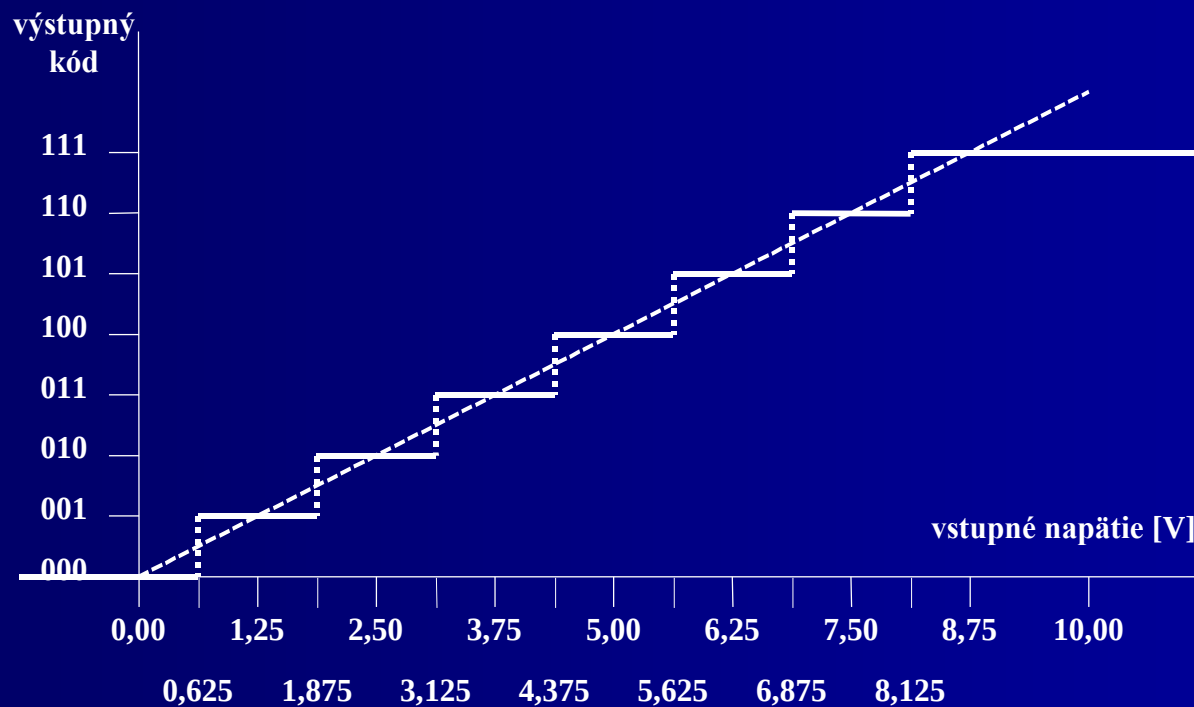


Kvantovanie

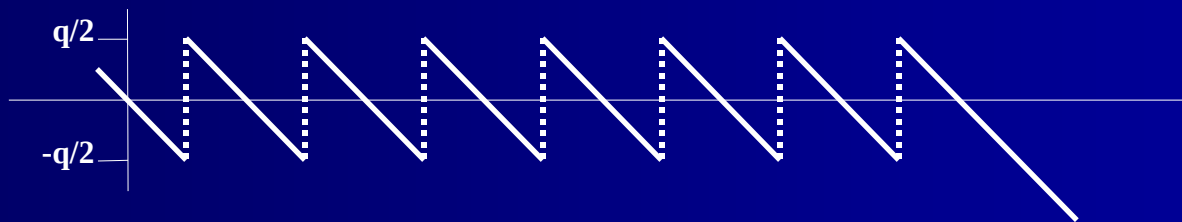
- diskretizácia hodnôt analógového signálu
- vstupný rozsah – Range, Full Scale (FS), Full Scale Range (FSR)
- rozlišovacia schopnosť – Resolution
 - počet bitov n
 - počet hodnôt $N = 2^n$
- krok kvantovania – quantum $q = FS / 2^n$

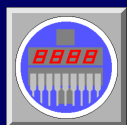


Kvantovanie



chyba kvantovania Δq



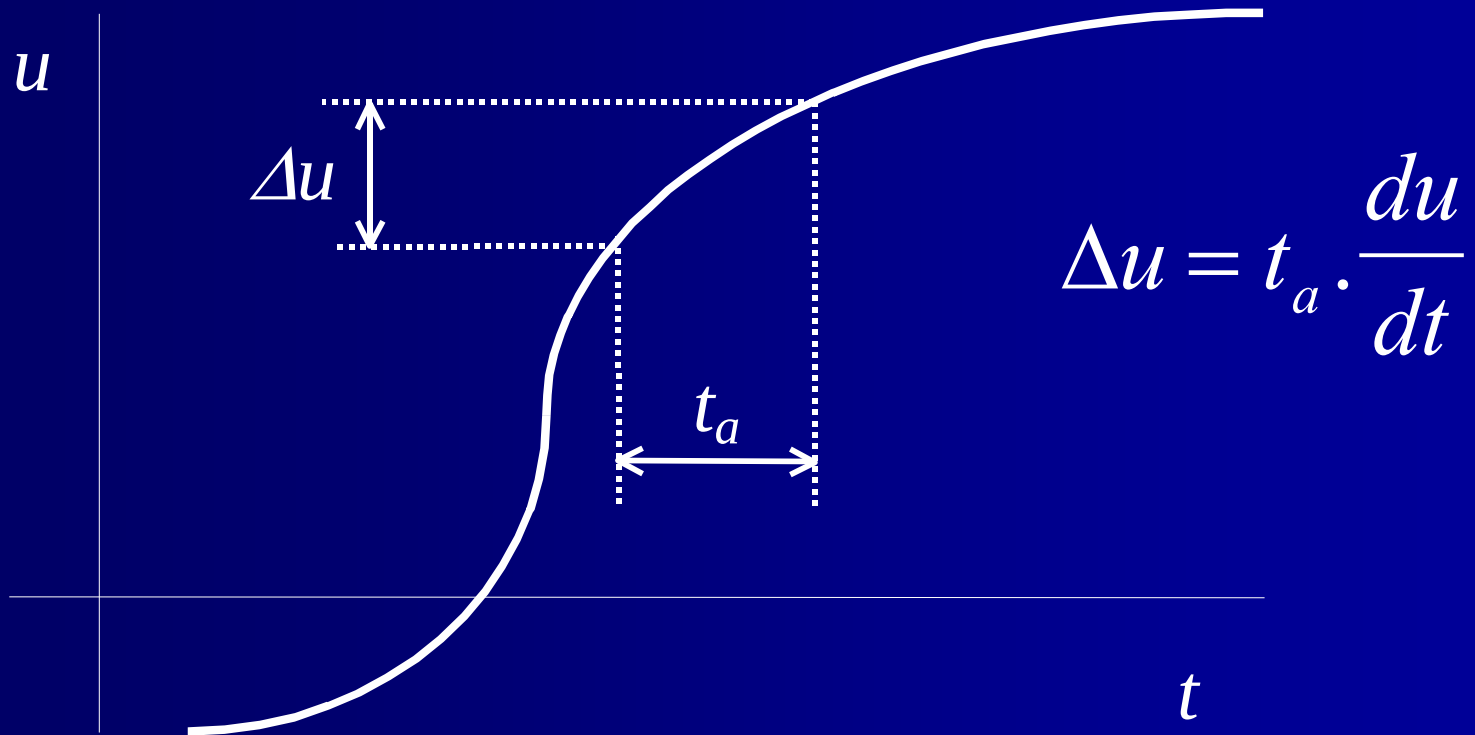


Kvantovanie

- Ideálny („bezchybný“) AČP má chybu kvantovania $= \pm q/2$.
- Chyba kvantovania spôsobuje kvantizačný šum s efektívnou hodnotou $U_q = q / \sqrt{12}$.



Vzorkovanie





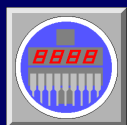
Vzorkovanie

$$\Delta u = t_a \cdot \frac{d(A \cdot \sin \omega t)}{dt} = t_a \cdot A \cdot \omega$$

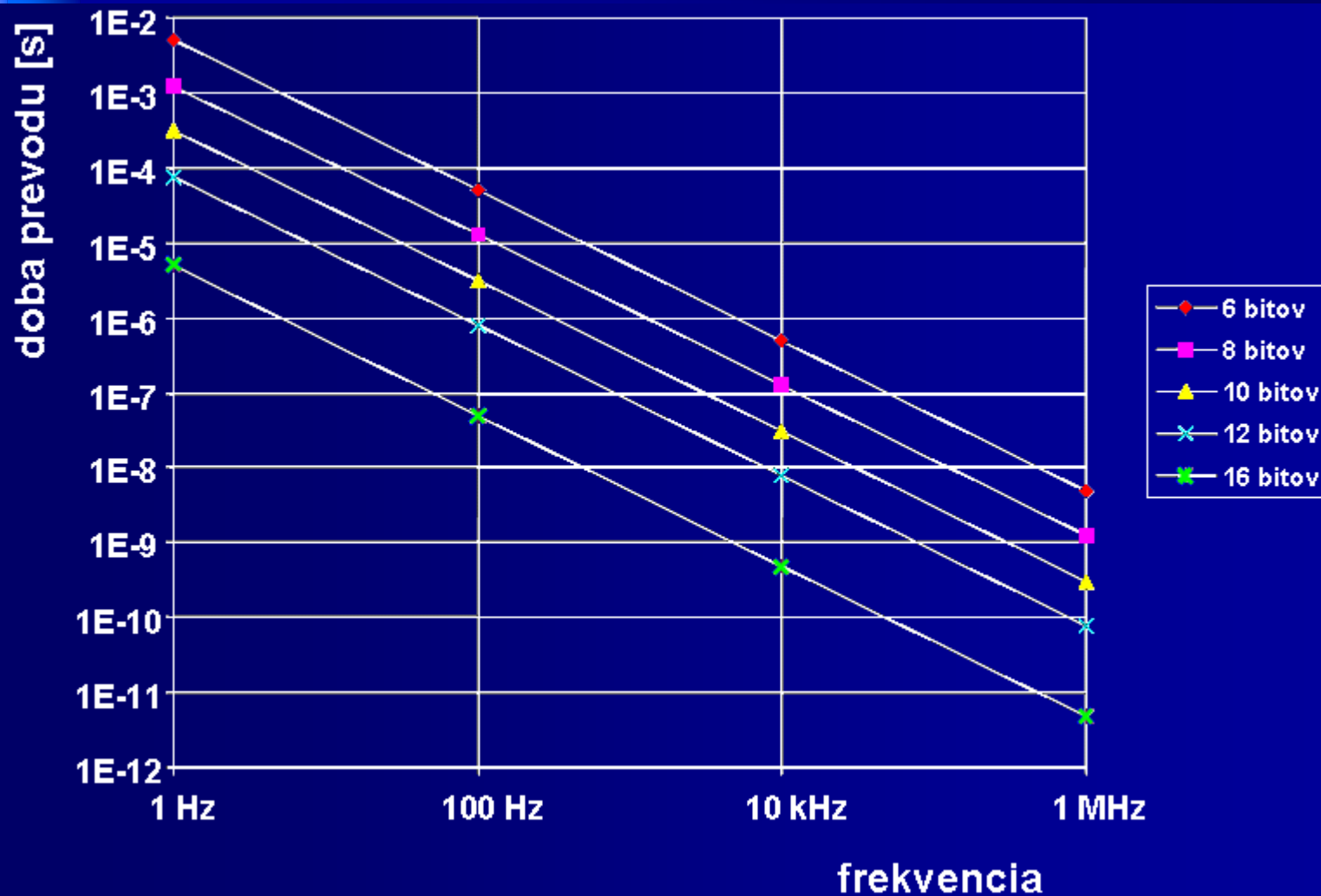
$$\delta u = \frac{\Delta u}{2A} = \pi \cdot f \cdot t_a \qquad t_a = \frac{\delta u}{\pi \cdot f}$$

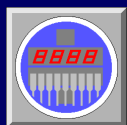
$$n = 10 \text{ bit} \Rightarrow \delta u < 0,001$$

$$f = 1 \text{ kHz} \Rightarrow t_a < 318 \text{ ns}$$



Vzorkovanie





Vzorkovacia teoréma

- Ak spojitý, **frekvenčne ohraničený signál** neobsahuje žiadne frekvenčné zložky nad frekvenciou f_h ,

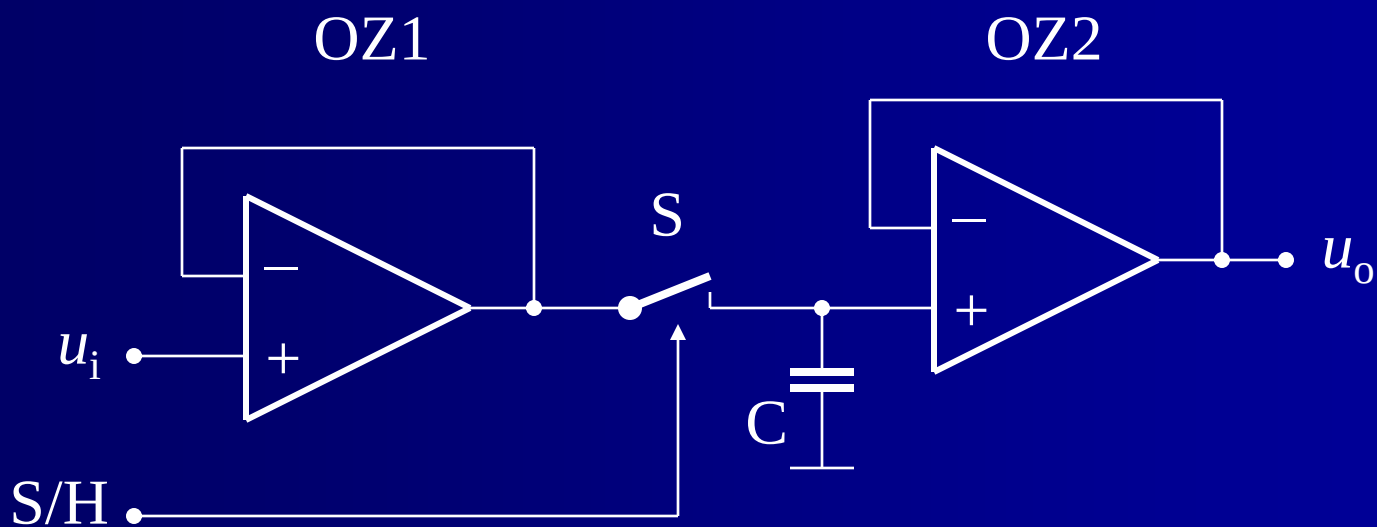
potom pôvodný signál **môže byť rekonštruovaný bez skreslenia,**

ak je navzorkovaný frekvenciou f_s vyššou než dvojnásobok f_h

$$f_s > 2 \cdot f_h$$

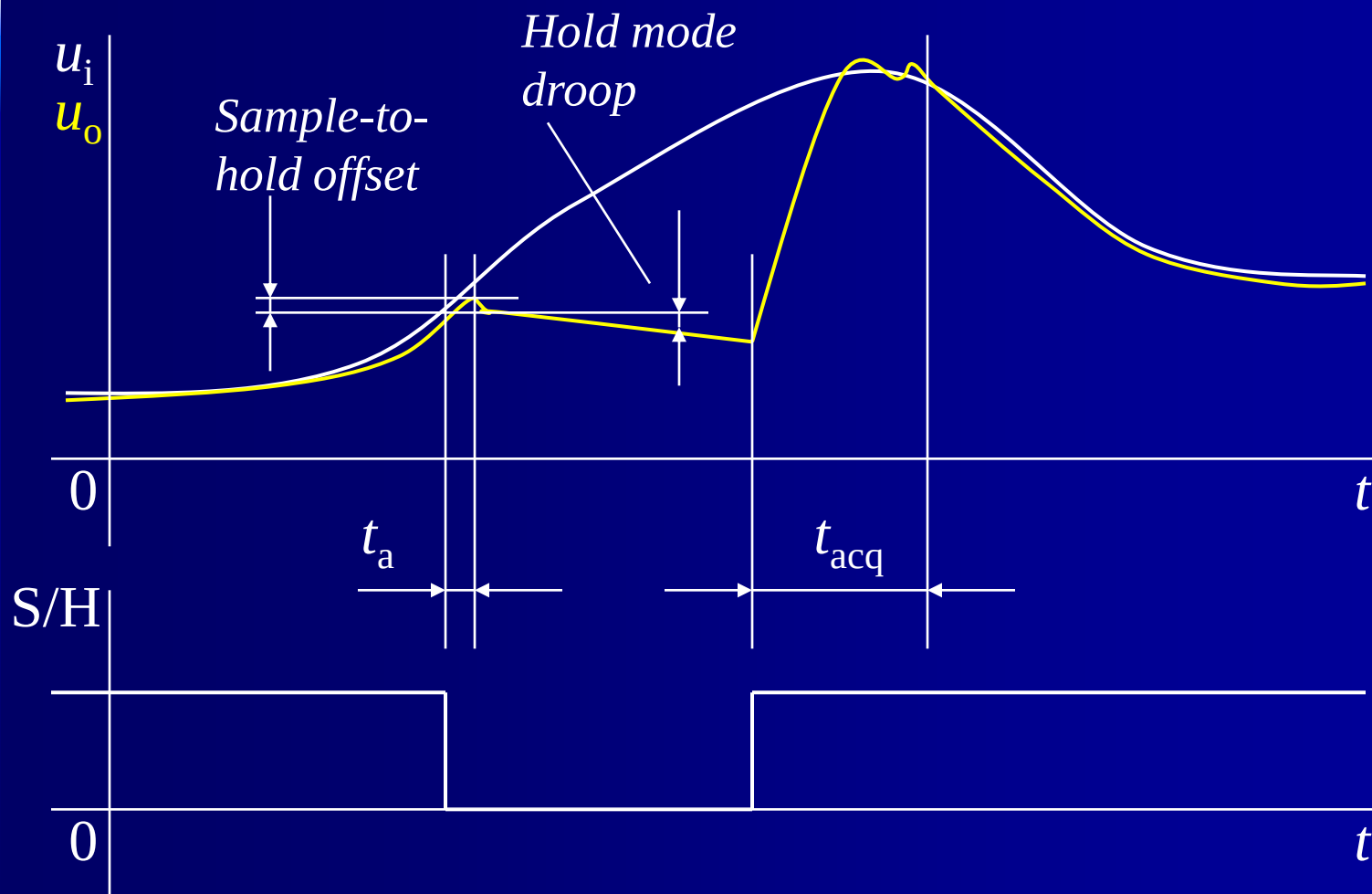


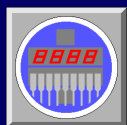
Vzorkovací obvod (Sample&Hold, Track & Hold)





Vzorkovací obvod (S&H, T&H)





Kódovanie

- Binárne (dvojkové) kódy - váhové
- Priamy binárny kód

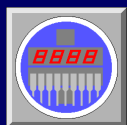
$$N = a_1 \cdot 2^{-1} + a_2 \cdot 2^{-2} + a_3 \cdot 2^{-3} + \dots + a_n \cdot 2^{-n}$$

- Binárny kód s posunutím – Offset Binary
 - najčastejšie používaný v AČP a ČAP
- Doplnkový kód – Two's Complement
 - vhodný na aritmetické operácie
- Inverzný kód – One's Complement
 - jednoduchý prevod na veľkosť + znamienko



Kódovanie

Analógová hodnota	Bin. kód s posunutím	Doplňkový bin. kód	Inverzný bin. kód
-4 V	000	100	---
-3 V	001	101	100
-2 V	010	110	101
-1 V	011	111	110
-0 V	100	000	111
+0 V	100	000	000
+1 V	101	001	001
+2 V	110	010	010
+3 V	111	011	011



Kódovanie

- MSB – Most Significant Bit
- LSB – Least Significant Bit
- Grayov kód
- BCD kód – Binary Coded Decimal
 - 3 1/2 -miestny voltmeter - ± 1999 mV
 - 3 3/4 -miestny voltmeter - ± 3999 mV

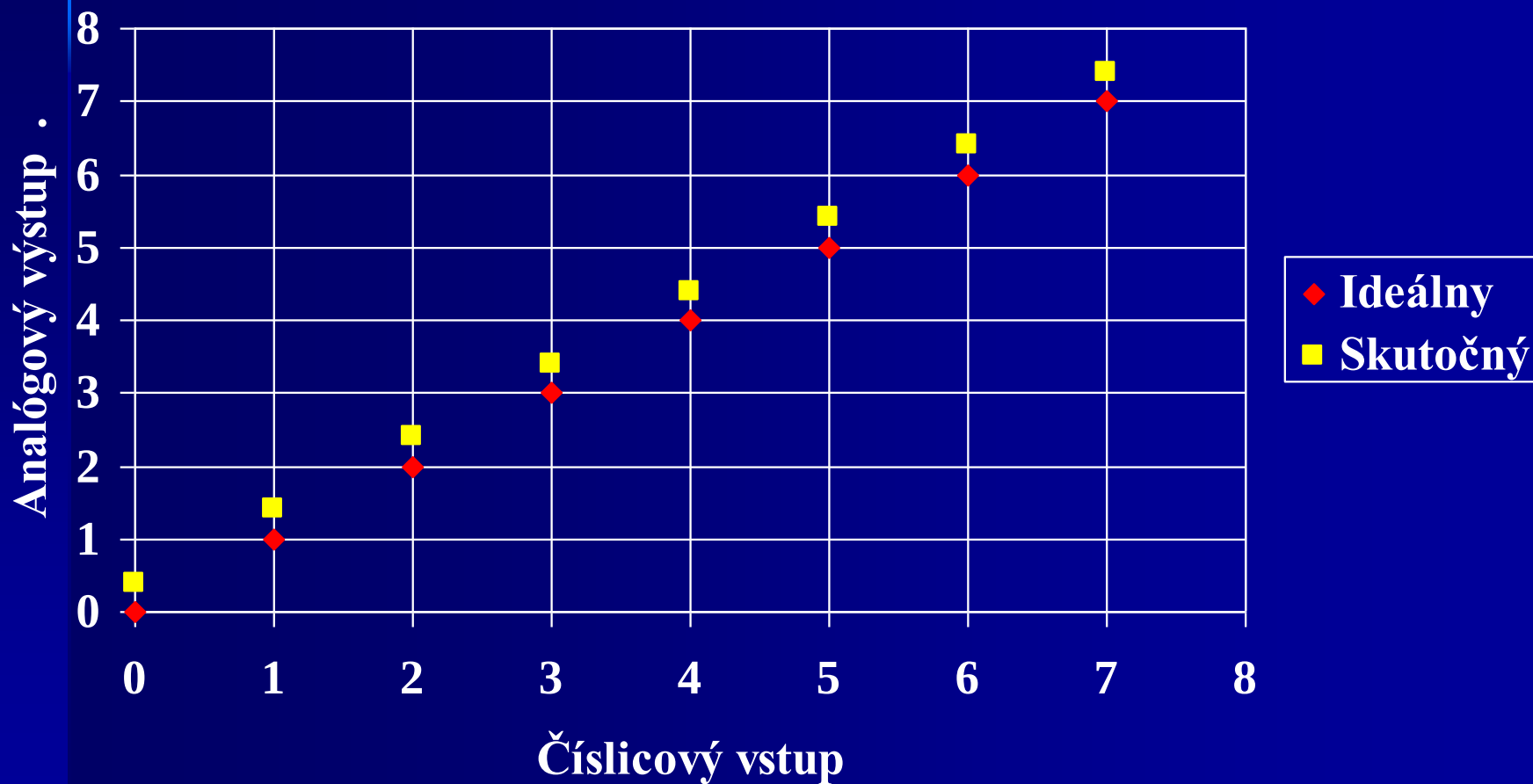


Chyby ČAP a AČP

- Chyba nuly
- Chyba zosilnenia
- Chyba linearity
 - integrálna nelinearita
 - diferenciálna nelinearita



Chyba nuly ČAP



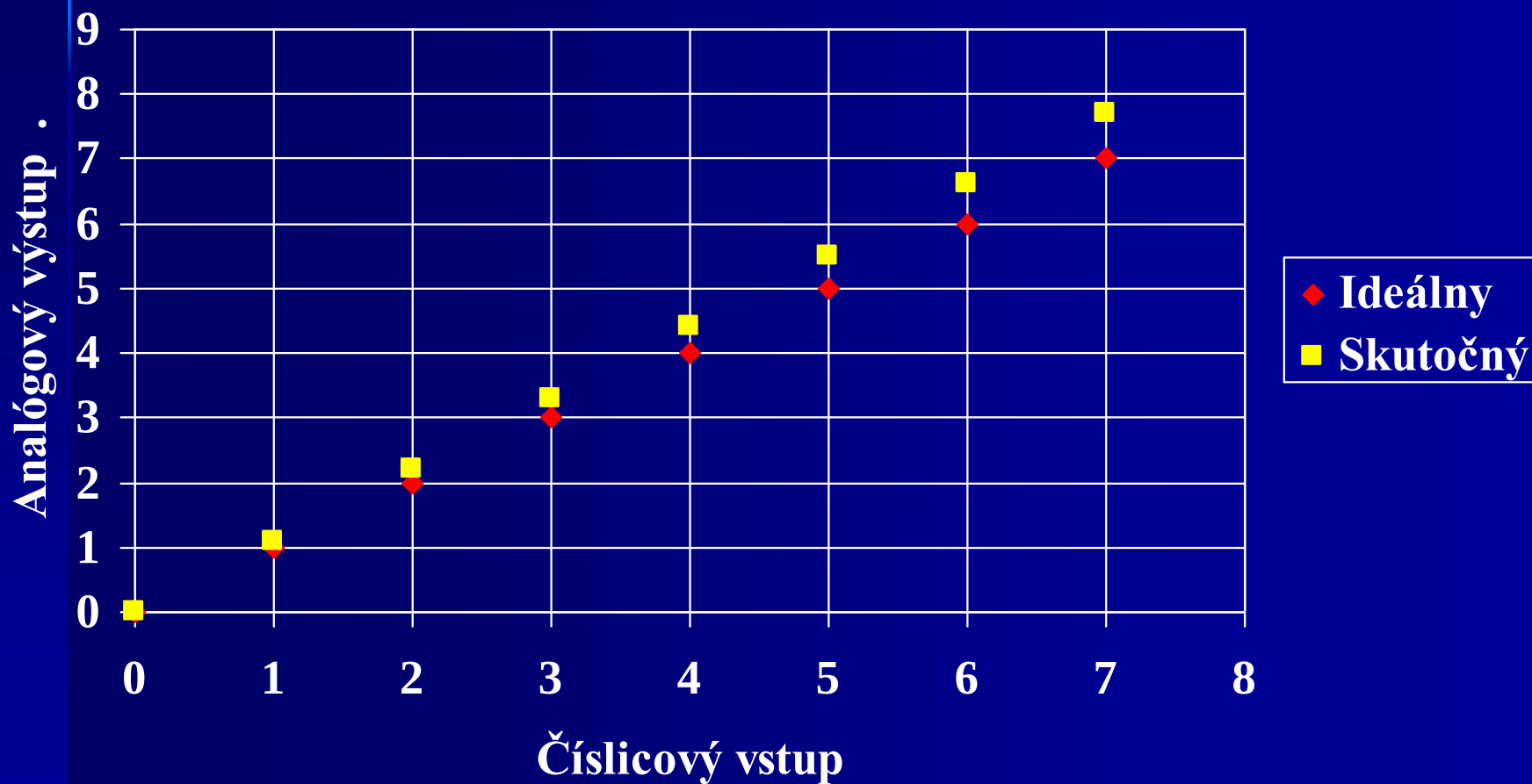


Chyba nuly ČAP

$$\Delta_0 = Y_{0s} - Y_{0i}$$

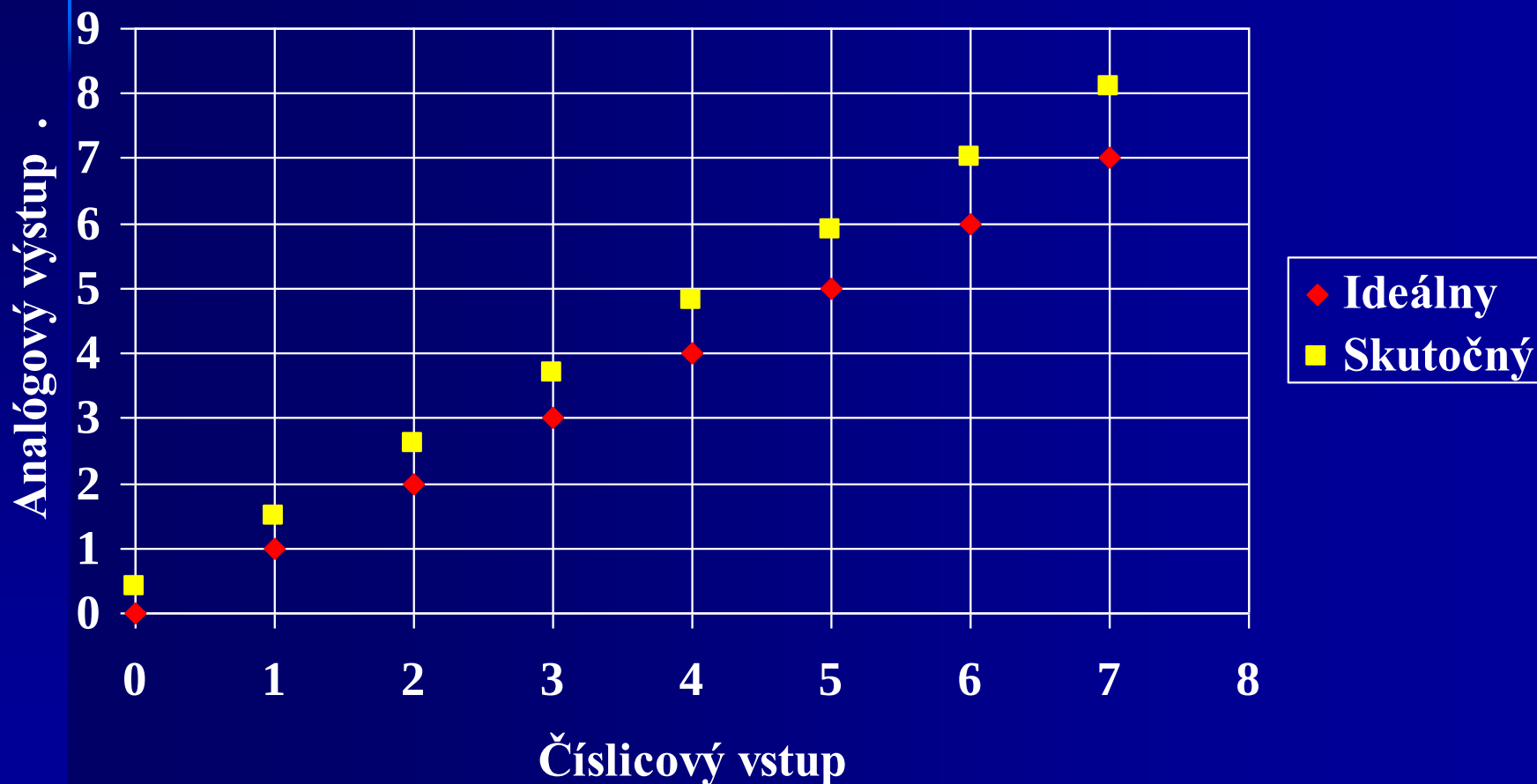


Chyba zosilnenia ČAP





Chyby nuly a zosilnenia ČAP





Chyba zosilnenia ČAP

$$\delta_z = \frac{Y_{ms} - Y_{0s}}{X_{ms} - X_{0s}} - \frac{Y_{mi} - Y_{0i}}{X_{mi} - X_{0i}}$$

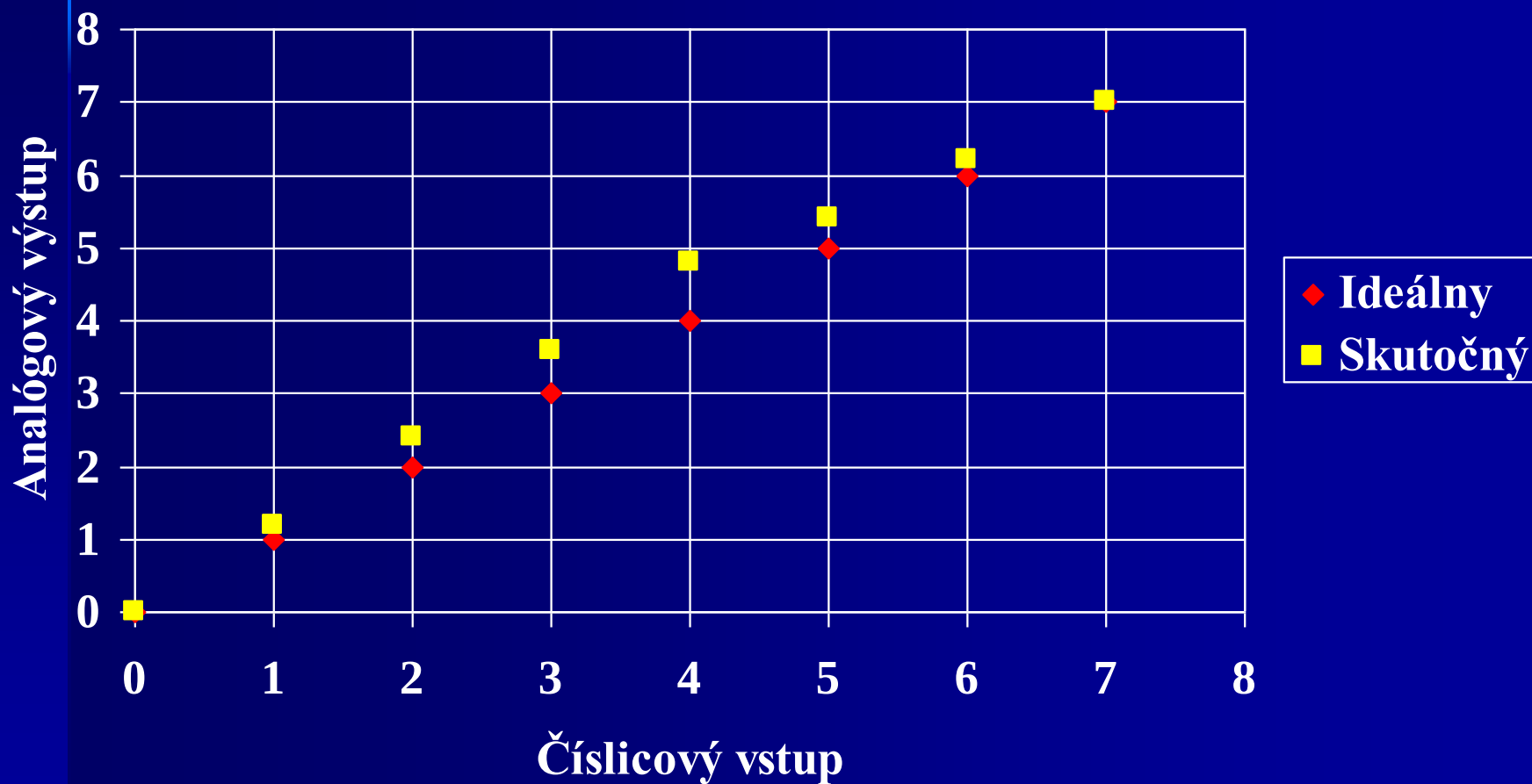
$$\delta_z = \frac{Y_{ms} - Y_{0s}}{X_m - X_0} - \frac{Y_{mi} - Y_{0i}}{X_m - X_0}$$

$$\delta_z = \frac{Y_{ms} - Y_{0s} - Y_{mi} + Y_{0i}}{X_m - X_0}$$

$$\delta_z = \frac{Y_{ms} - Y_{mi} - \Delta_0}{X_m - X_0}$$



Chyba linearity ČAP





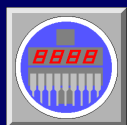
Chyba linearity

- Integrálna nelinearita
 - Maximálna odchýlka medzi prevodovou charakteristikou a jej priamkovou náhradou
- Diferenciálna nelinearita
 - Maximálny rozdiel medzi skutočným a ideálnym krokom kvantovania

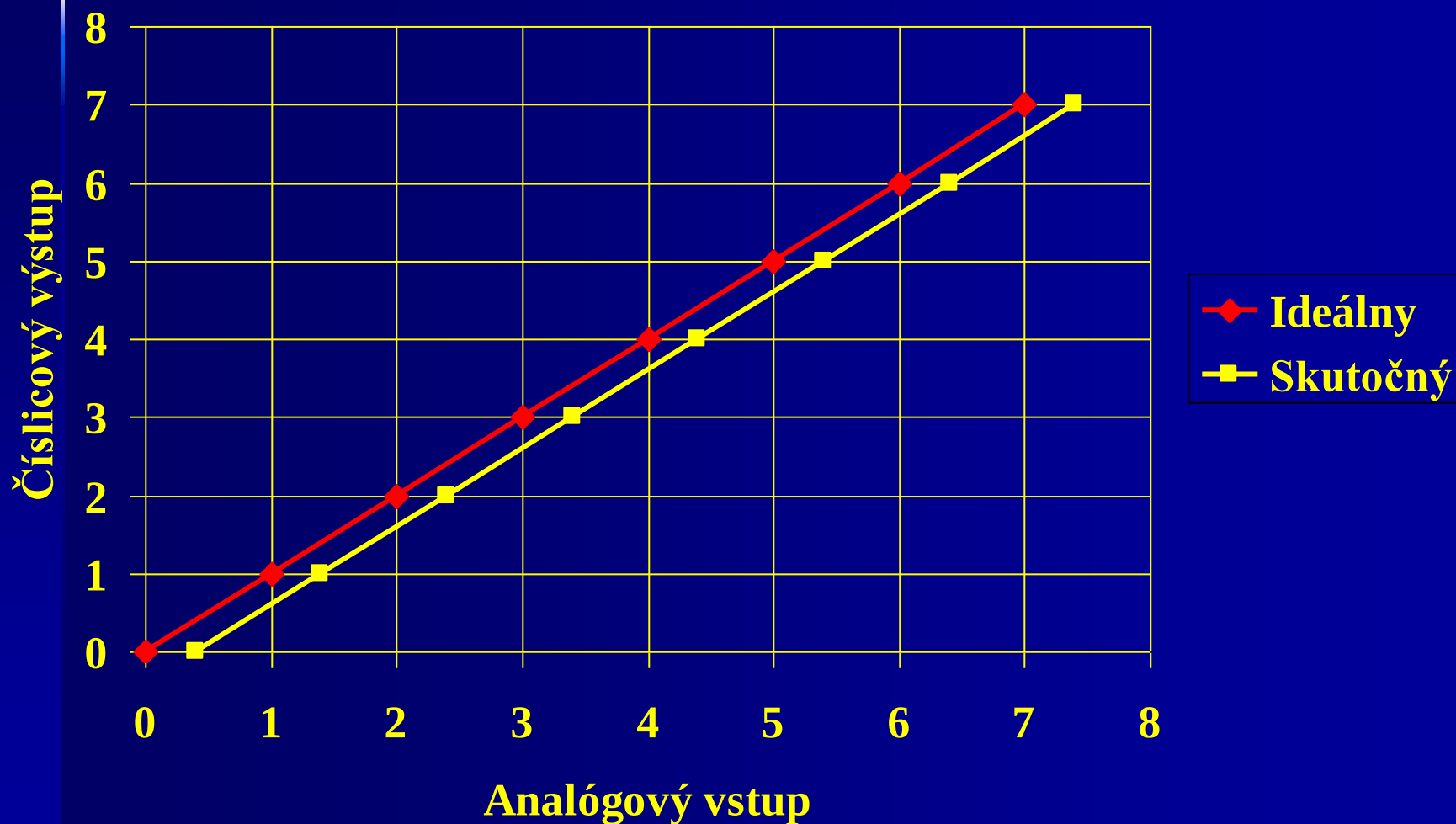


Postup zisťovania chýb ČAP

- Odmeranie prevodovej charakteristiky
- Chyba nuly (z jednej hodnoty)
 - odčítanie chyby nuly
- Chyba zosilnenia (z druhej hodnoty)
 - odčítanie chyby zosilnenia
- Chyba linearity (z ostatných hodnôt)

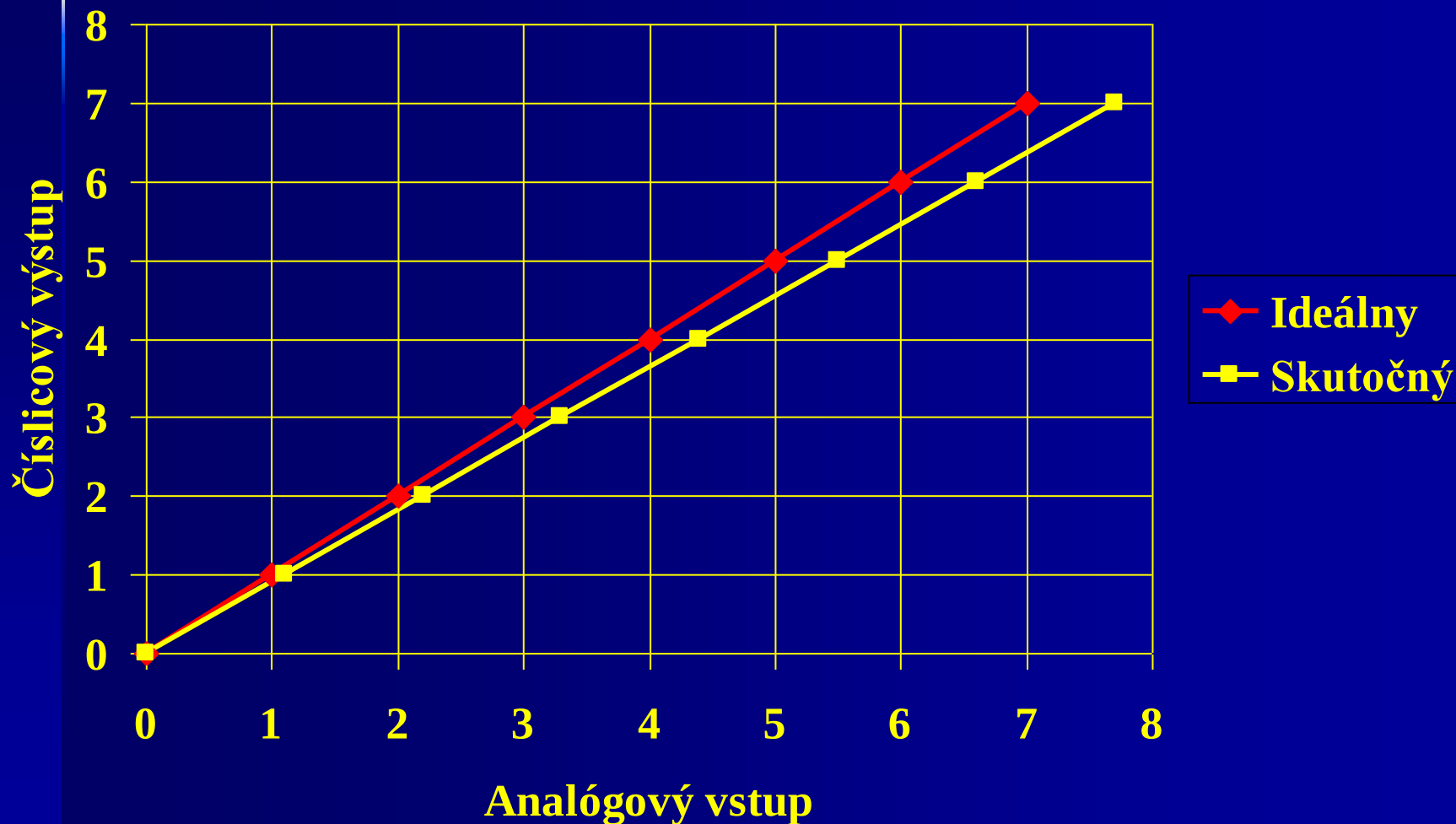


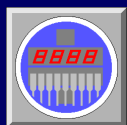
Chyba nuly AČP



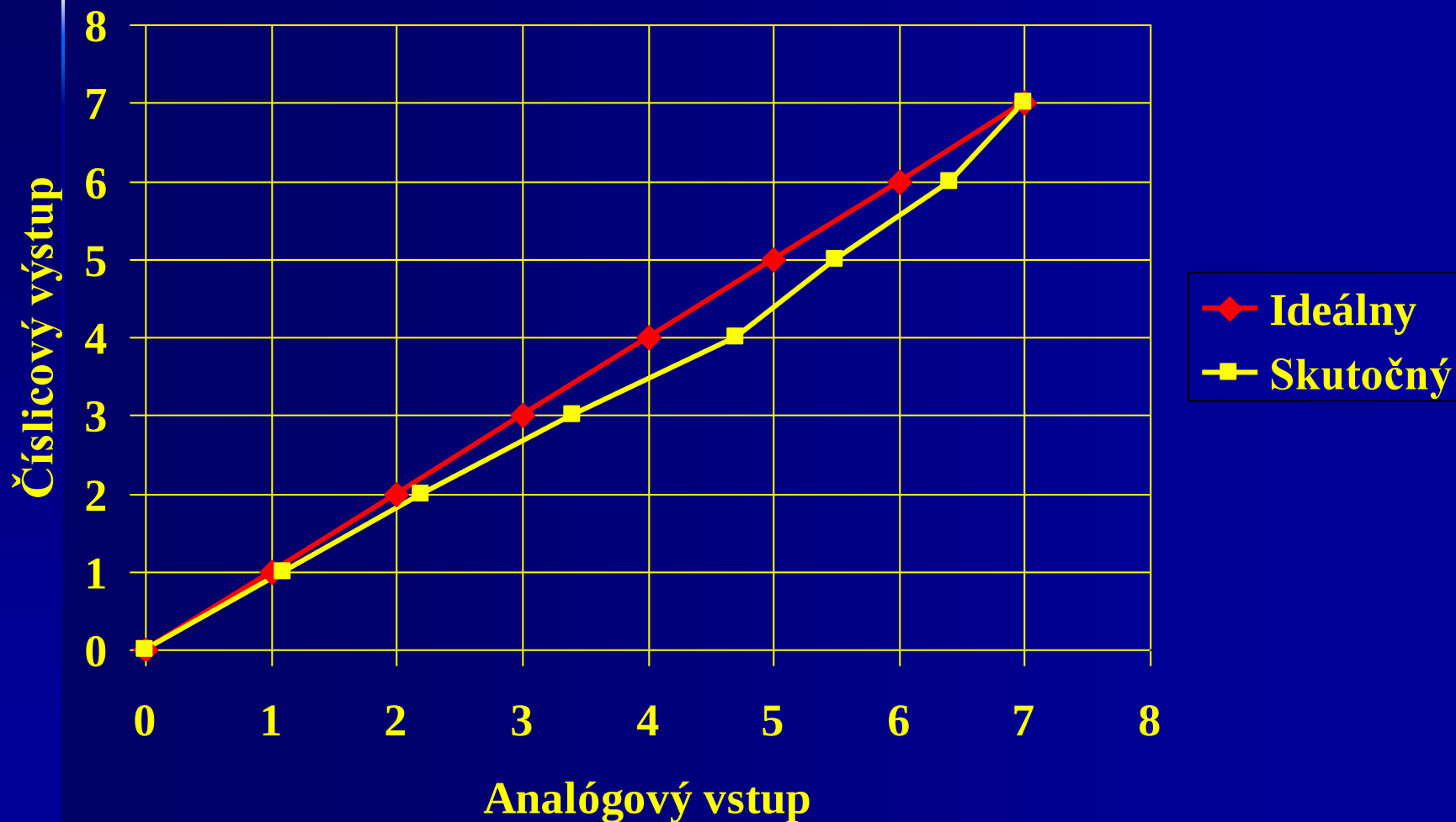


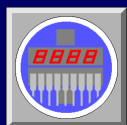
Chyba zosilnenia AČP





Chyba linearity AČP



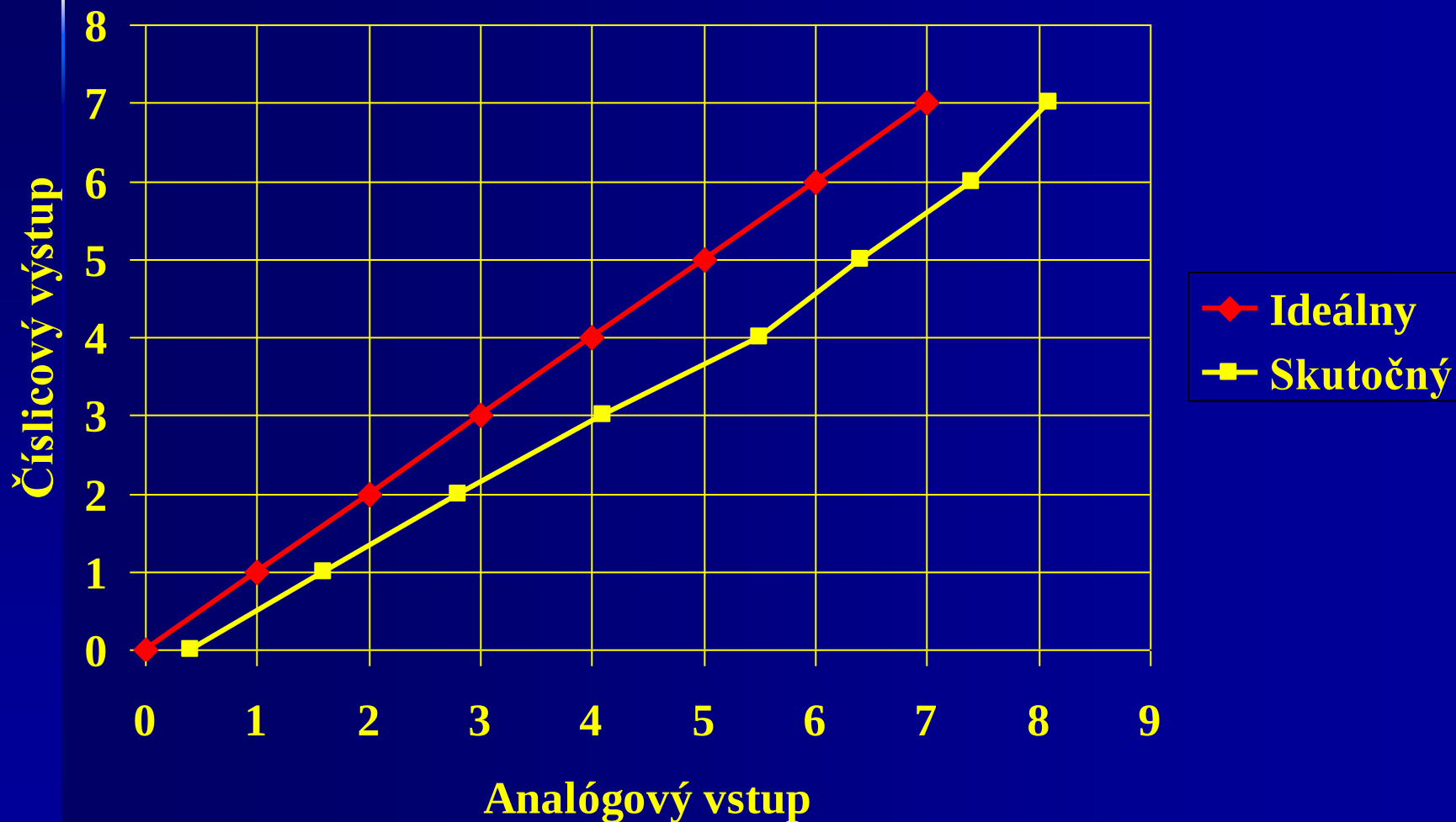


Postup zisťovania chýb AČP

- Odmeranie prevodovej charakteristiky
- Chyba nuly (z jednej hodnoty)
 - odčítanie chyby nuly
- Chyba zosilnenia (z druhej hodnoty)
 - odčítanie chyby zosilnenia
- Chyba linearity (z ostatných hodnôt)

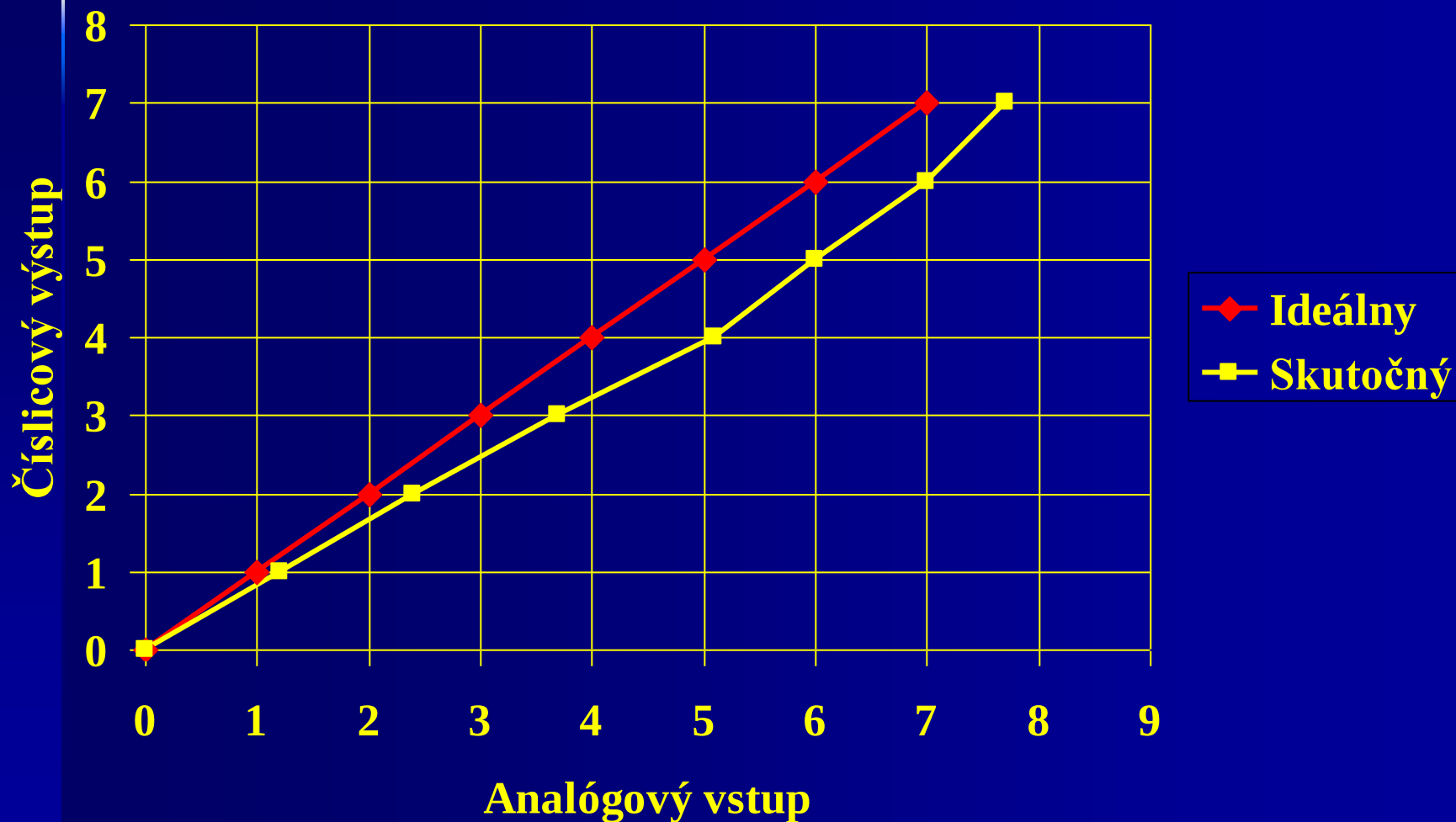


Celková chyba AČP



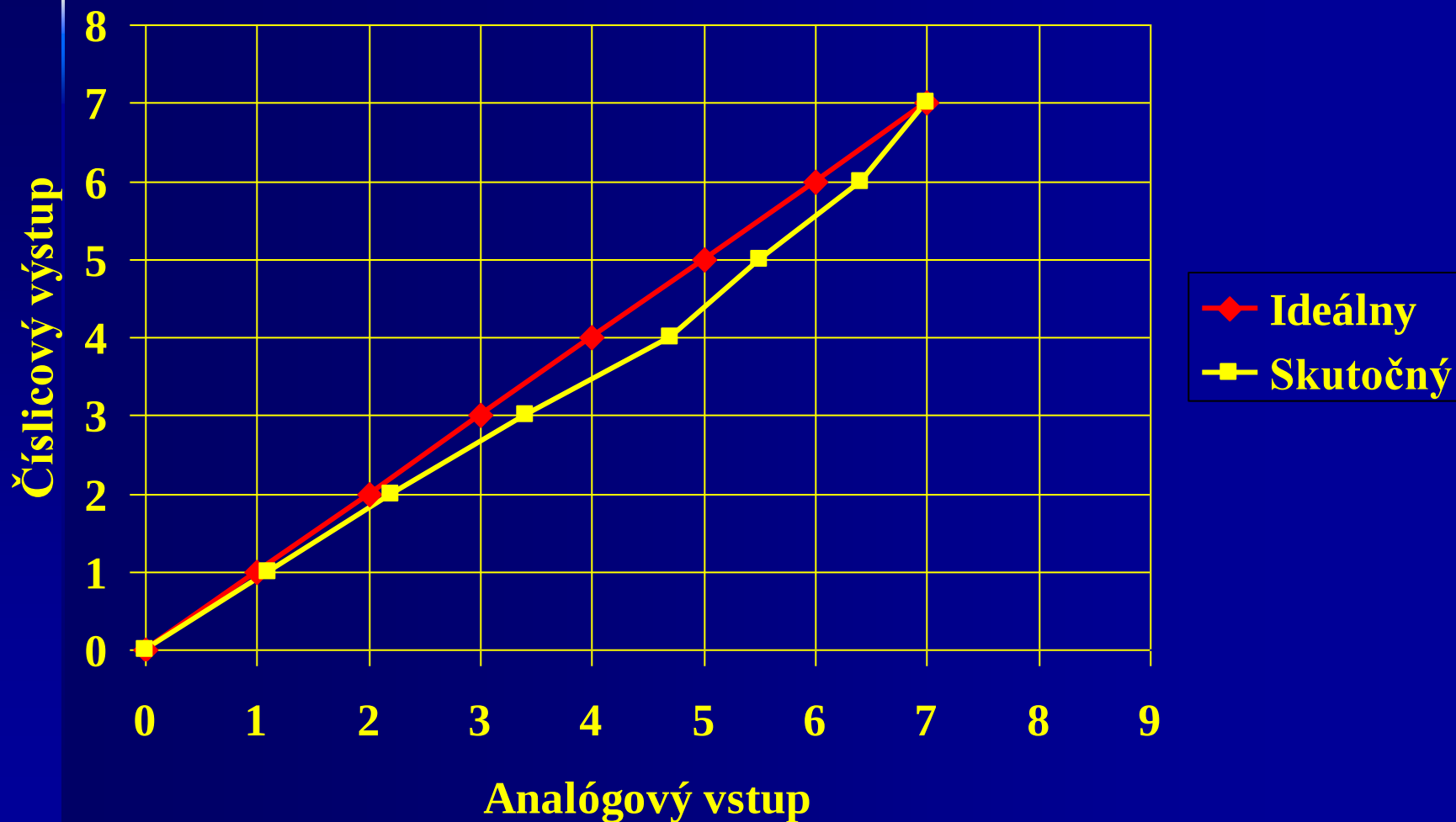


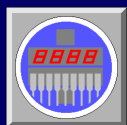
Chyba AČP bez chyby nuly





Chyba AČP bez chyby nuly a chyby zosilnenia





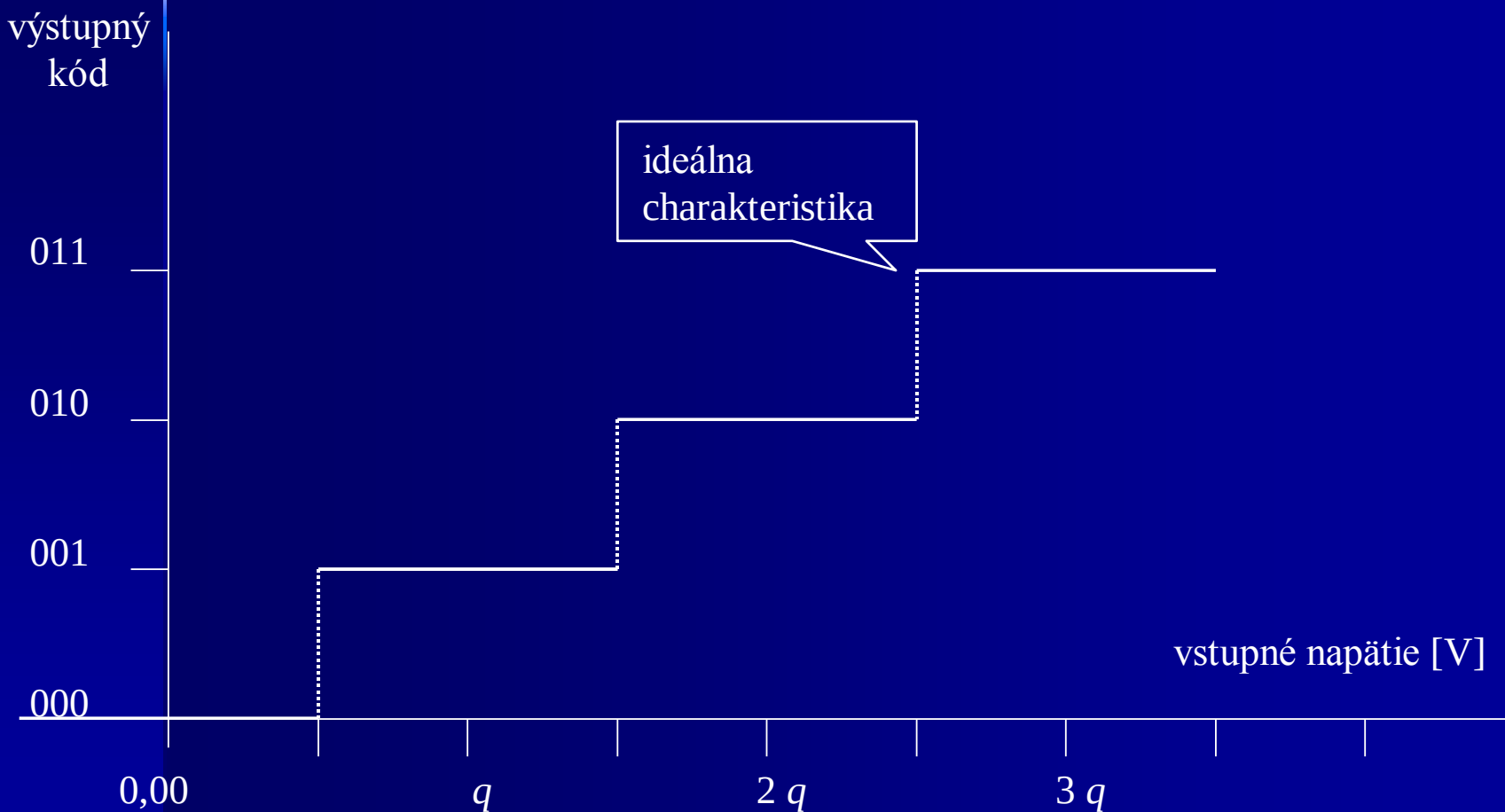
Ako je to s chybami AČP naozaj

- Nezistujú sa hodnoty číslicových výstupov pri daných analógových vstupných hodnotách,

ale hodnoty analógových vstupov, pri ktorých sa MENIA číslicové výstupné hodnoty.

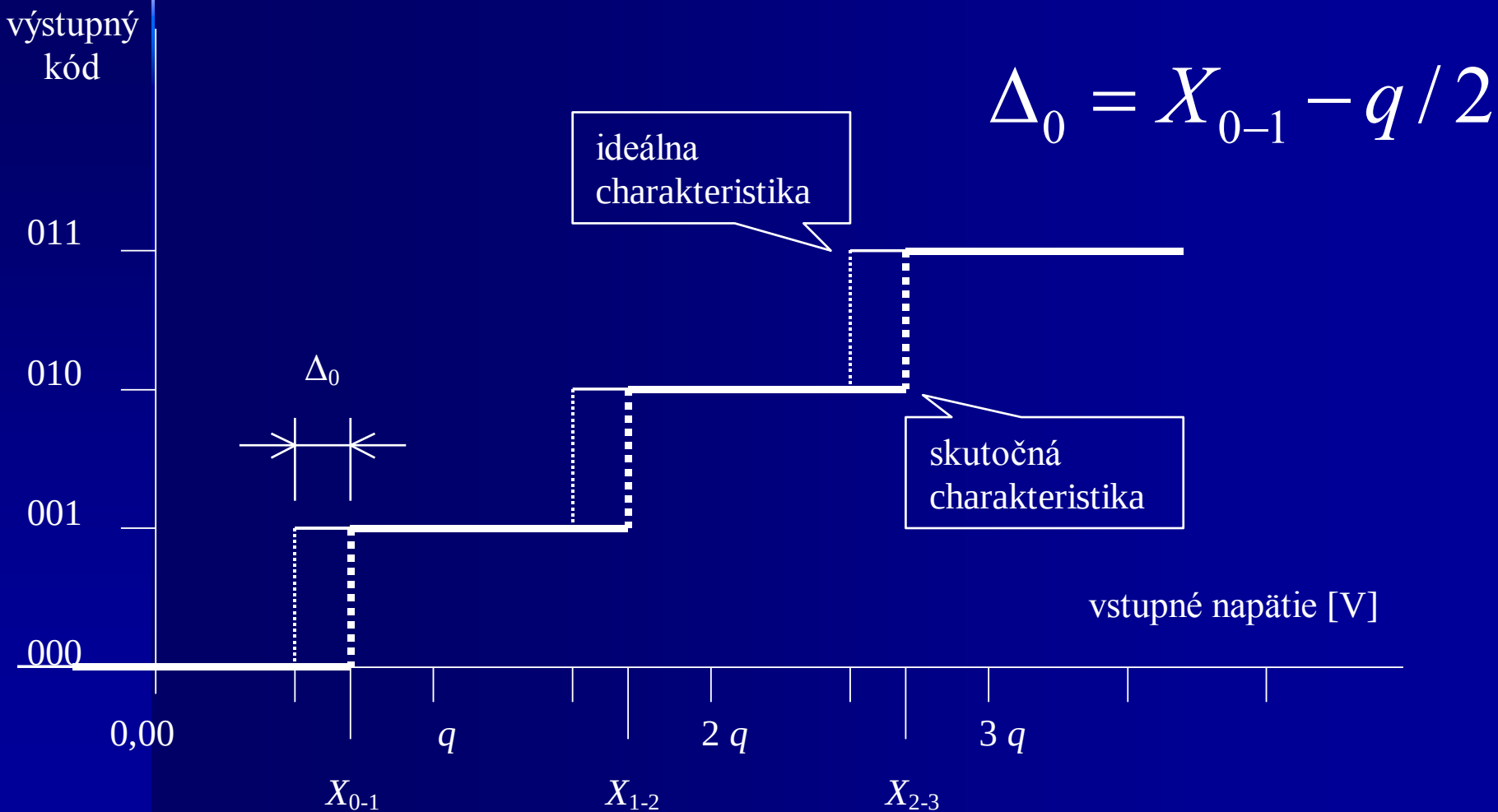


Chyba nuly AČP



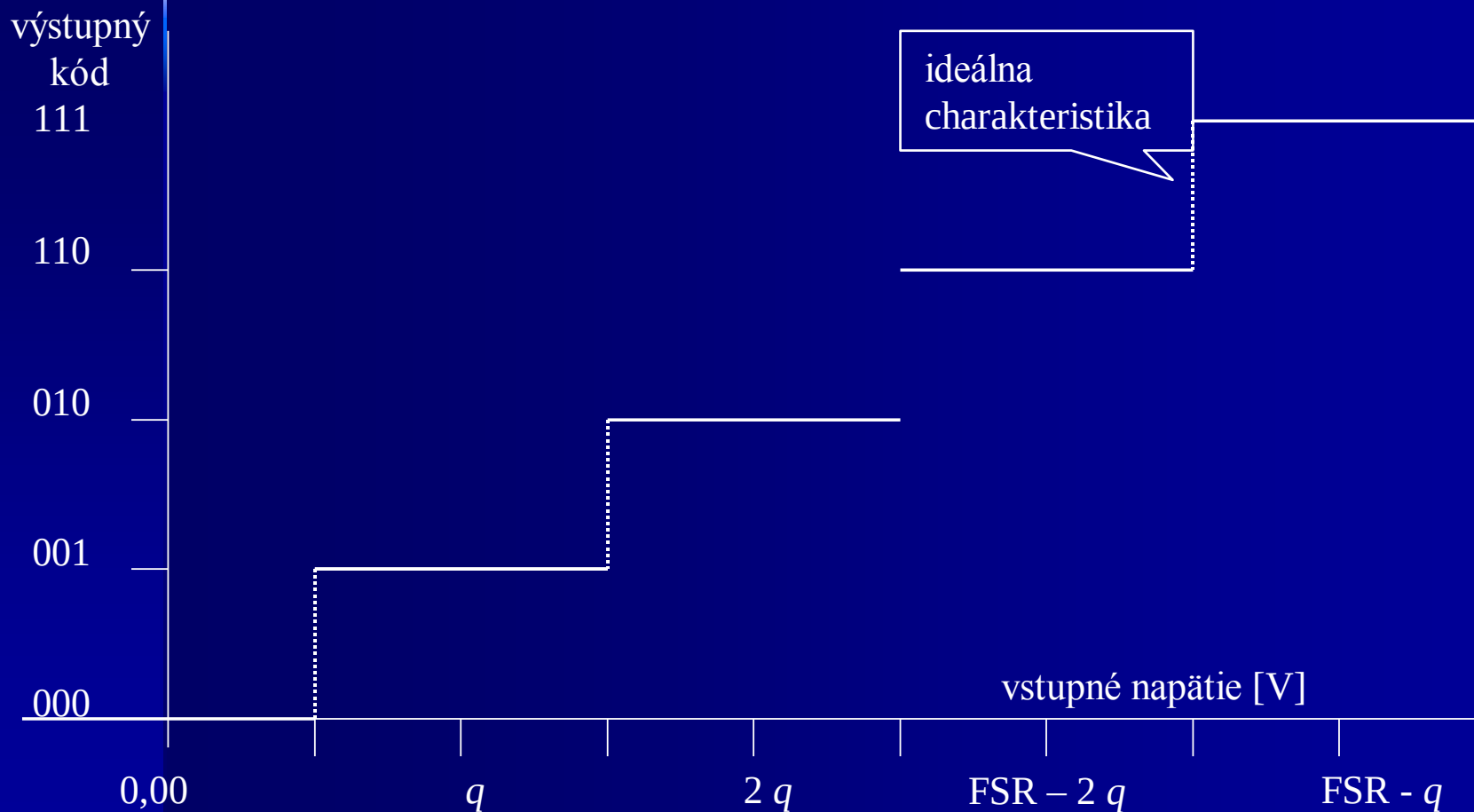


Chyba nuly AČP



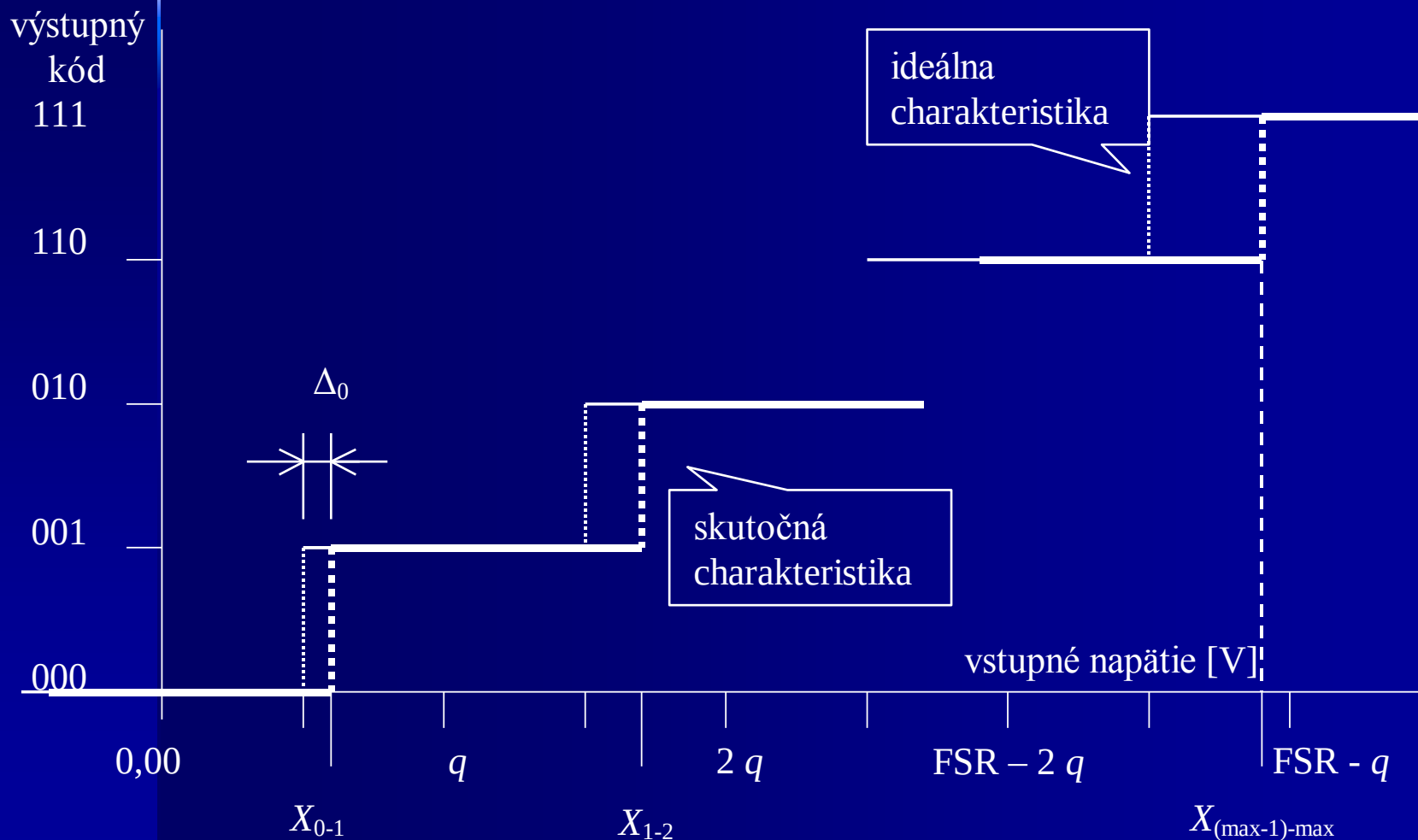


Chyba zosilnenia AČP





Chyba zosilnenia AČP

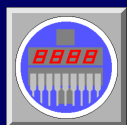




Chyba zosilnenia AČP

- $\Delta X_i = FSR - 2.q$
- $\Delta X_s = X_{(\max-1) - \max} - X_{0-1}$
- $\Delta Y_i = \Delta Y_s = FSR - 2.q$

$$\delta_z = \frac{\Delta Y_s}{\Delta X_s} - \frac{\Delta Y_i}{\Delta X_i} = \frac{\Delta Y_s}{\Delta X_s} - 1$$



Meranie chýb AČP

$n = 3, N = 8, FSR = 8 \text{ V}, q = 1 \text{ V}, X_{\max} = 7 \text{ V}$

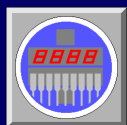
Y [V]	X [V]	Δ [V]	$\Delta - \Delta_0$	$\Delta - \Delta_0 - \Delta_z$	Δ_q
0,5	0,6	- 0,1	0,0	0,0	-
1,5	1,7	- 0,2	- 0,1	- 0,07	- 0,07
2,5	2,9	- 0,4	- 0,3	- 0,23	- 0,16
3,5	4,0	- 0,5	- 0,4	- 0,30	- 0,07
4,5	4,9	- 0,4	- 0,3	- 0,17	+ 0,13
5,5	5,8	- 0,3	- 0,2	- 0,03	+ 0,14
6,5	6,8	- 0,3	- 0,2	0,0	+ 0,03

$\Delta_0 = - 0,1 \text{ V}$ $\delta_z = - 0,2/6,2 \text{ V/V}$ $\Delta_{\text{inl}} = \pm 0,3 \text{ V}$ $\Delta_{\text{dnl}} = \pm 0,16 \text{ V}$

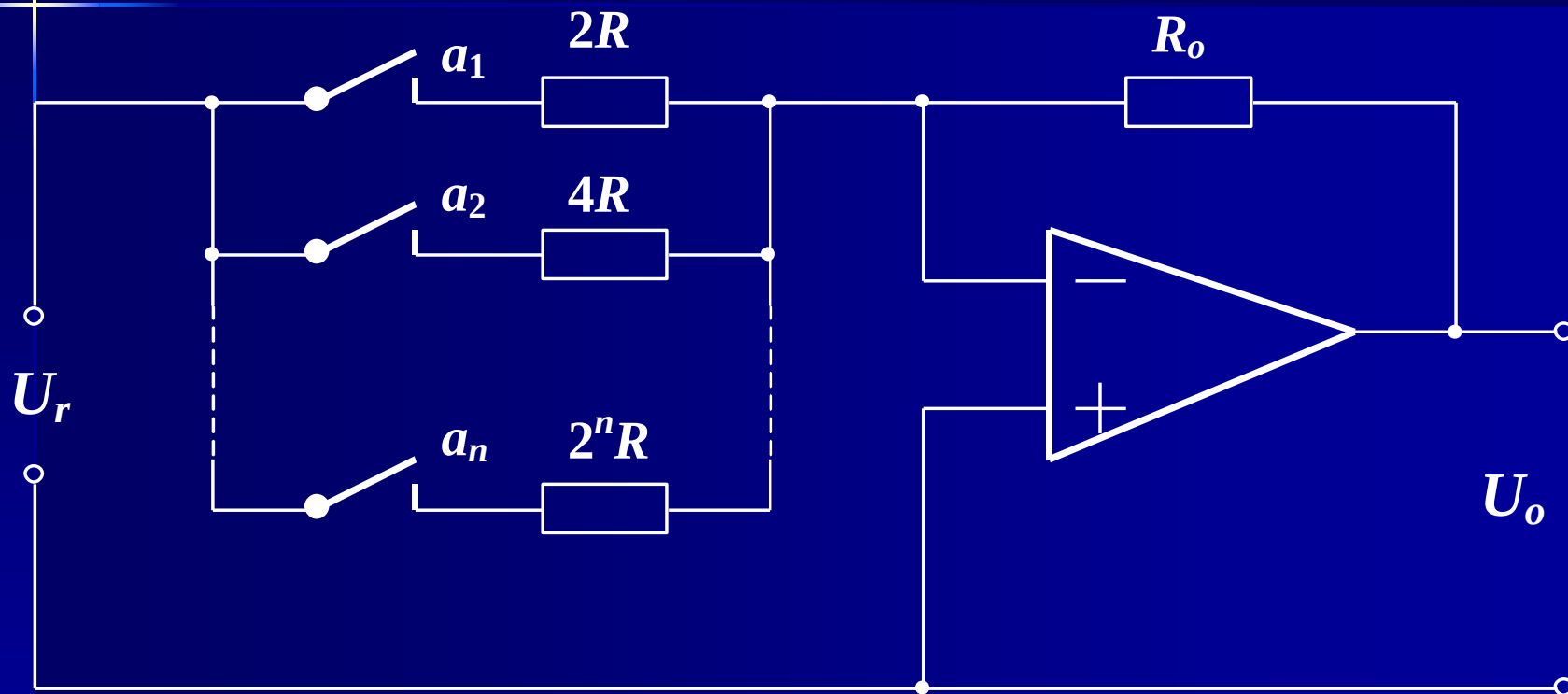


Druhy ČAP

- Paralelné ČAP
- Sériové ČAP
- ČAP s pomocným prevodom



ČAP so sčítaváním prúdov

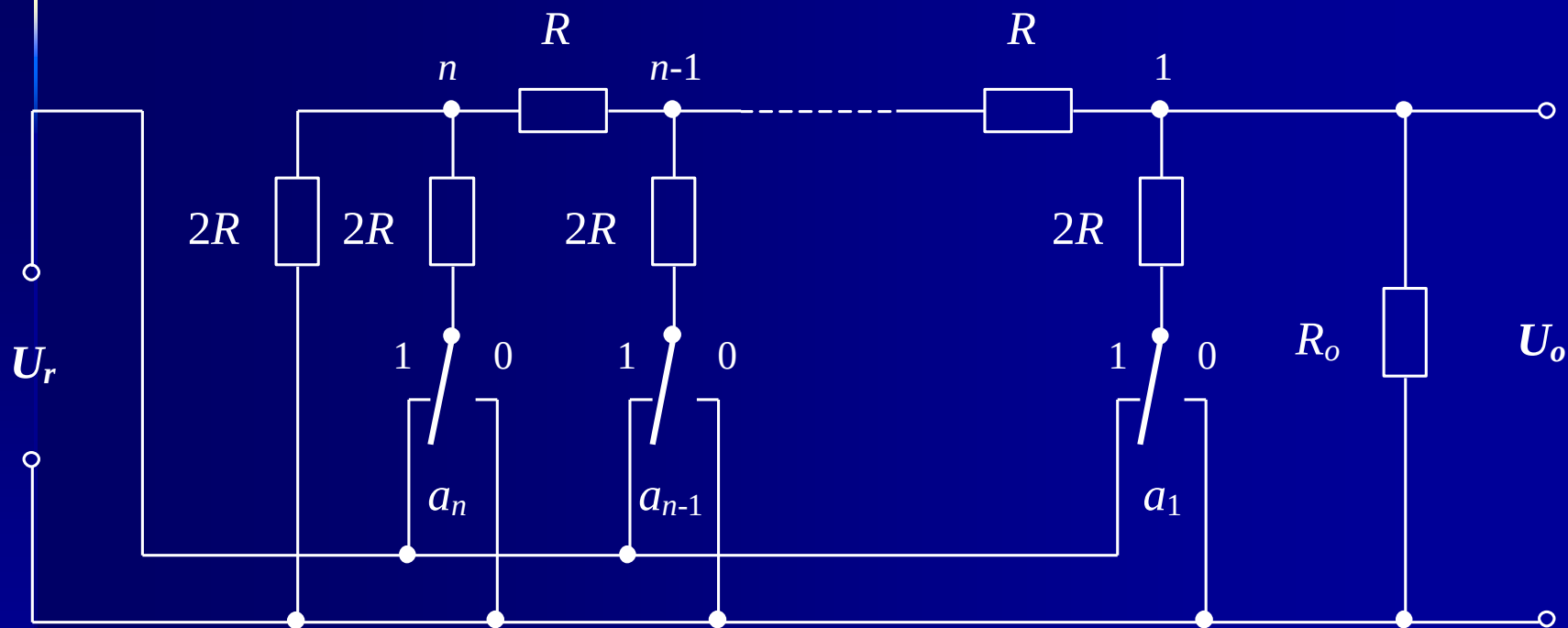


$$U_o = U_r \cdot R_o \cdot \sum_{i=1}^n \frac{a_i}{2^i R}$$

$$U_o = U_r \cdot \sum_{i=1}^n \frac{a_i}{2^i}$$



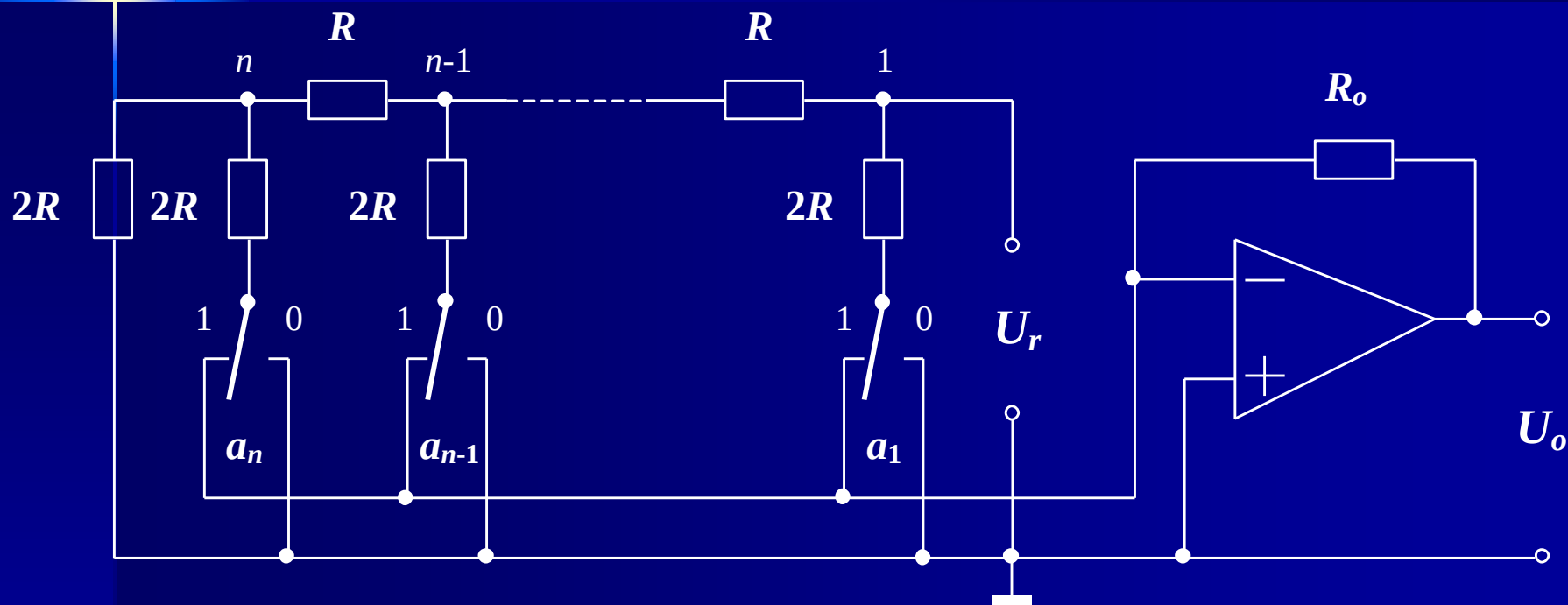
ČAP s odporovou sieťou R-2R



$$U_o = U_r \cdot \frac{R_o}{R_o + R} \cdot \sum_{i=1}^n \frac{a_i}{2^i}$$



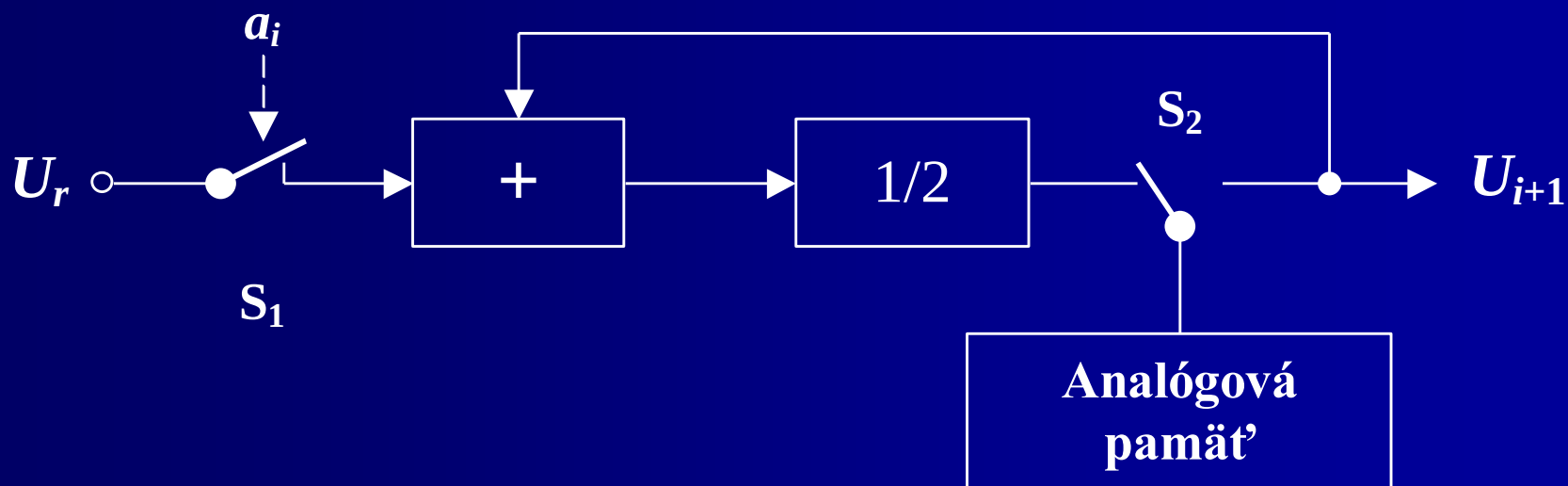
ČAP s odporovou sieťou R-2R



$$U_o = U_r \cdot \frac{R_o}{R} \cdot \sum_{i=1}^n \frac{a_i}{2^i}$$



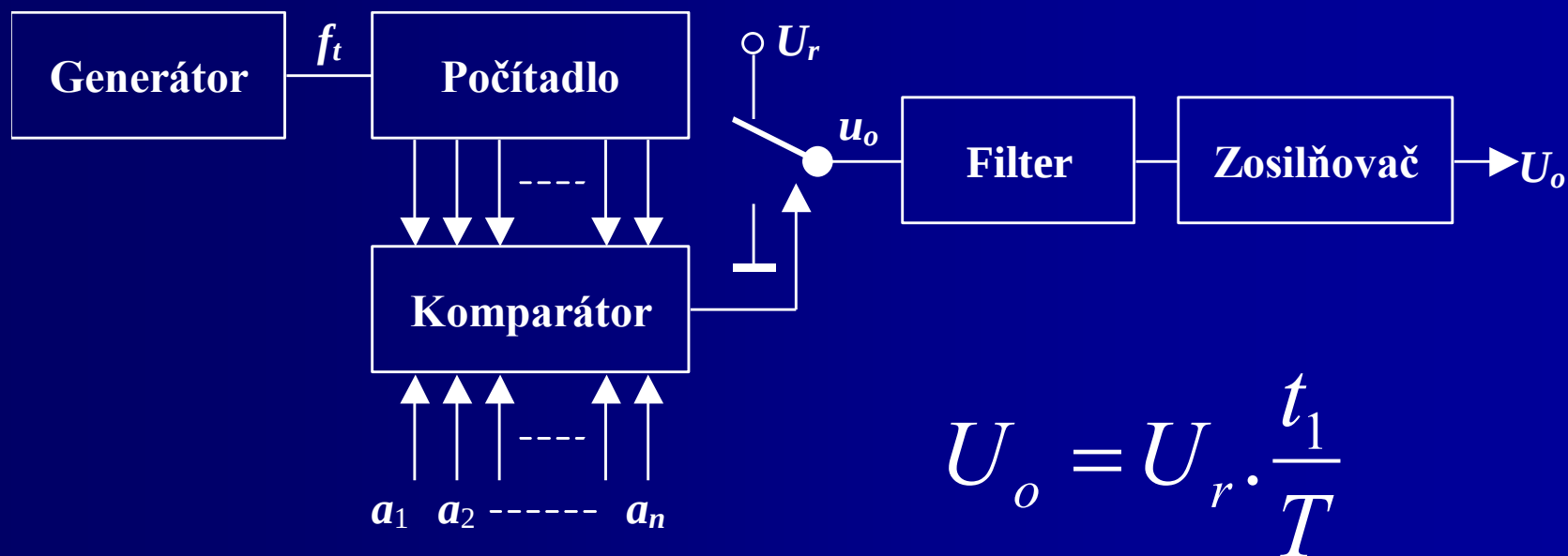
Sériový ČAP

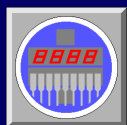


$$U_{i+1} = 1/2 \cdot (U_i + a_i \cdot U_r)$$

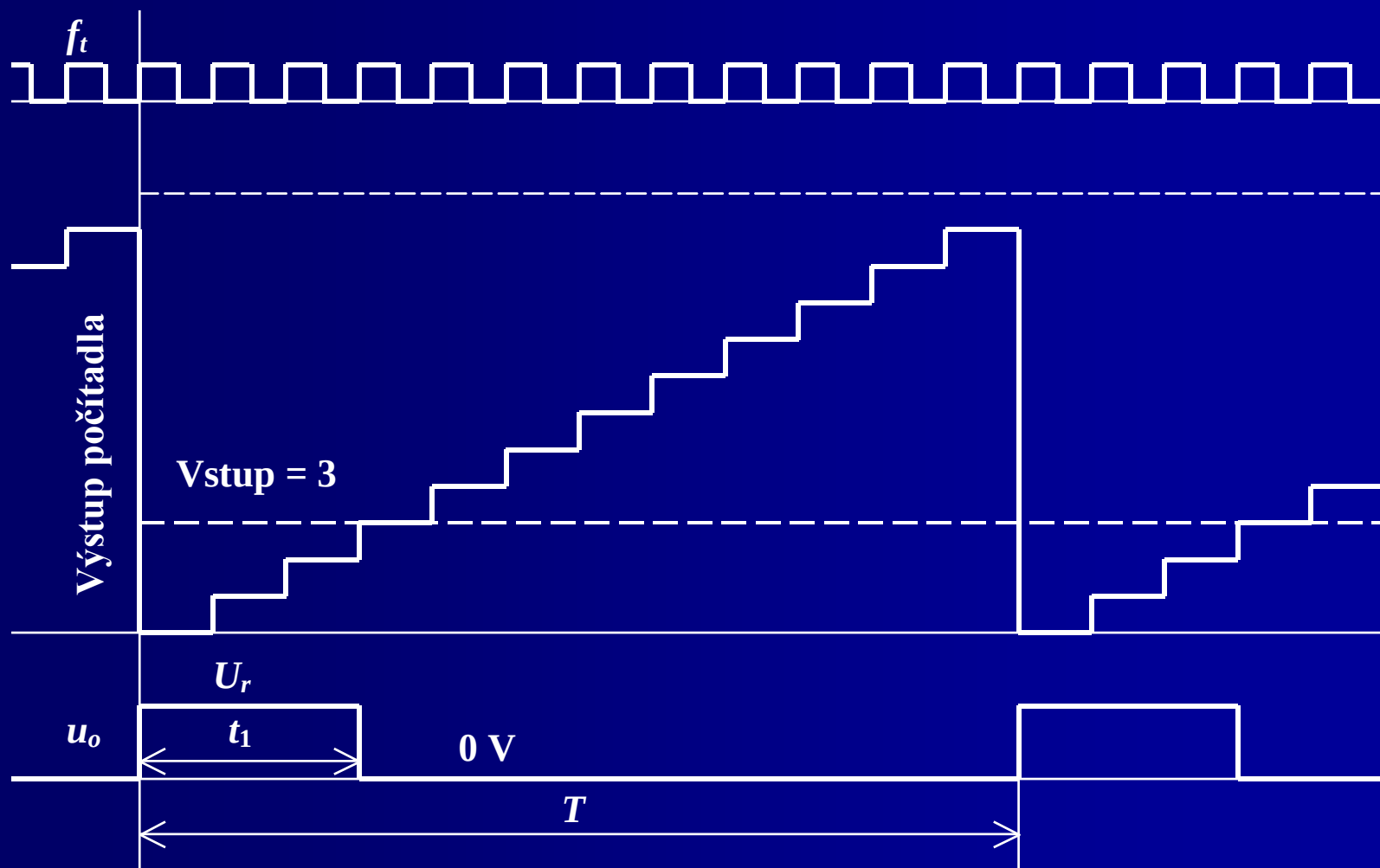


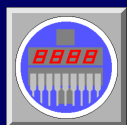
ČAP s prevodom na dĺžku impulzov





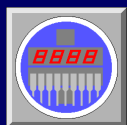
ČAP s převodem na dĺžku impulzov





Druhy AČP

- Komparačné – najrýchlejšie
- Kompenzačné – najbežnejšie
- Integračné – najpresnejšie
- Sigma-delta – najmodernejšie
- Kombinované – naj-aj-aj



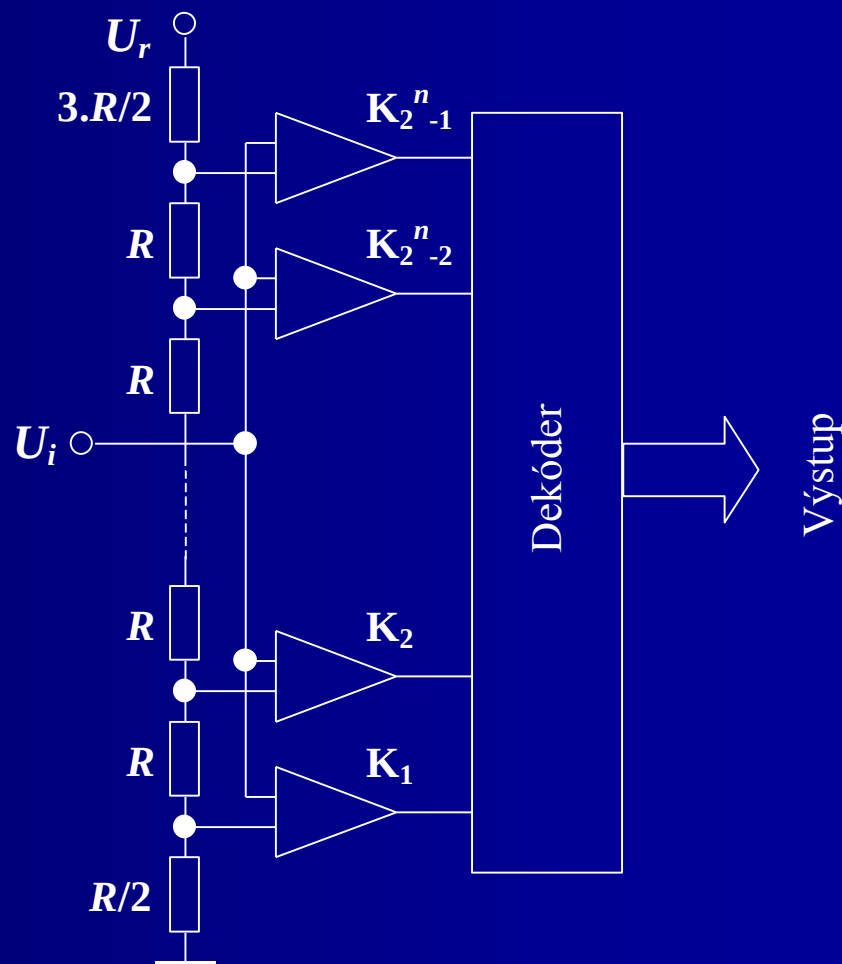
Komparačné AČP

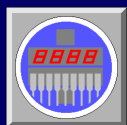
$$FSR - q - q/2 \Rightarrow$$

$$q + q + q/2 \Rightarrow$$

$$q + q/2 \Rightarrow$$

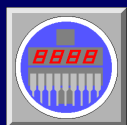
$$q/2 \Rightarrow$$



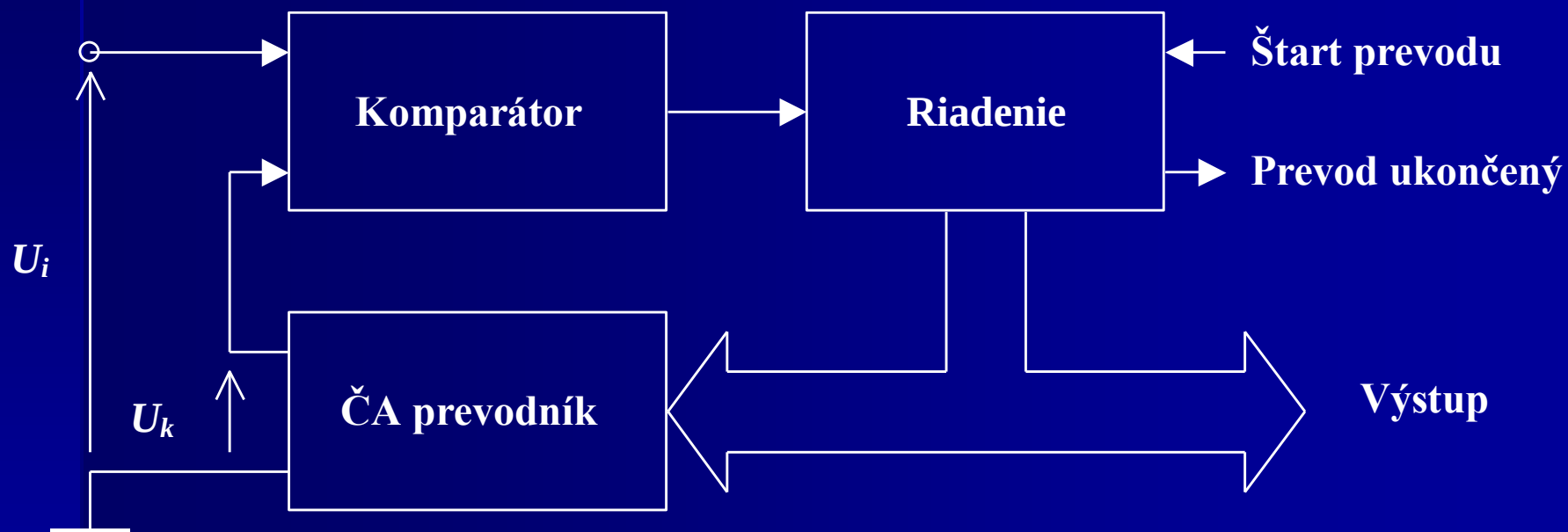


Komparačné AČP

- najrýchlejšie – 10^7 - 10^{10} prevodov/s
- málo presné – 6 - 8 bitov
- na spracovanie obrazu
- v číslicových osciloskopoch
- spracovanie radarových signálov
- ...

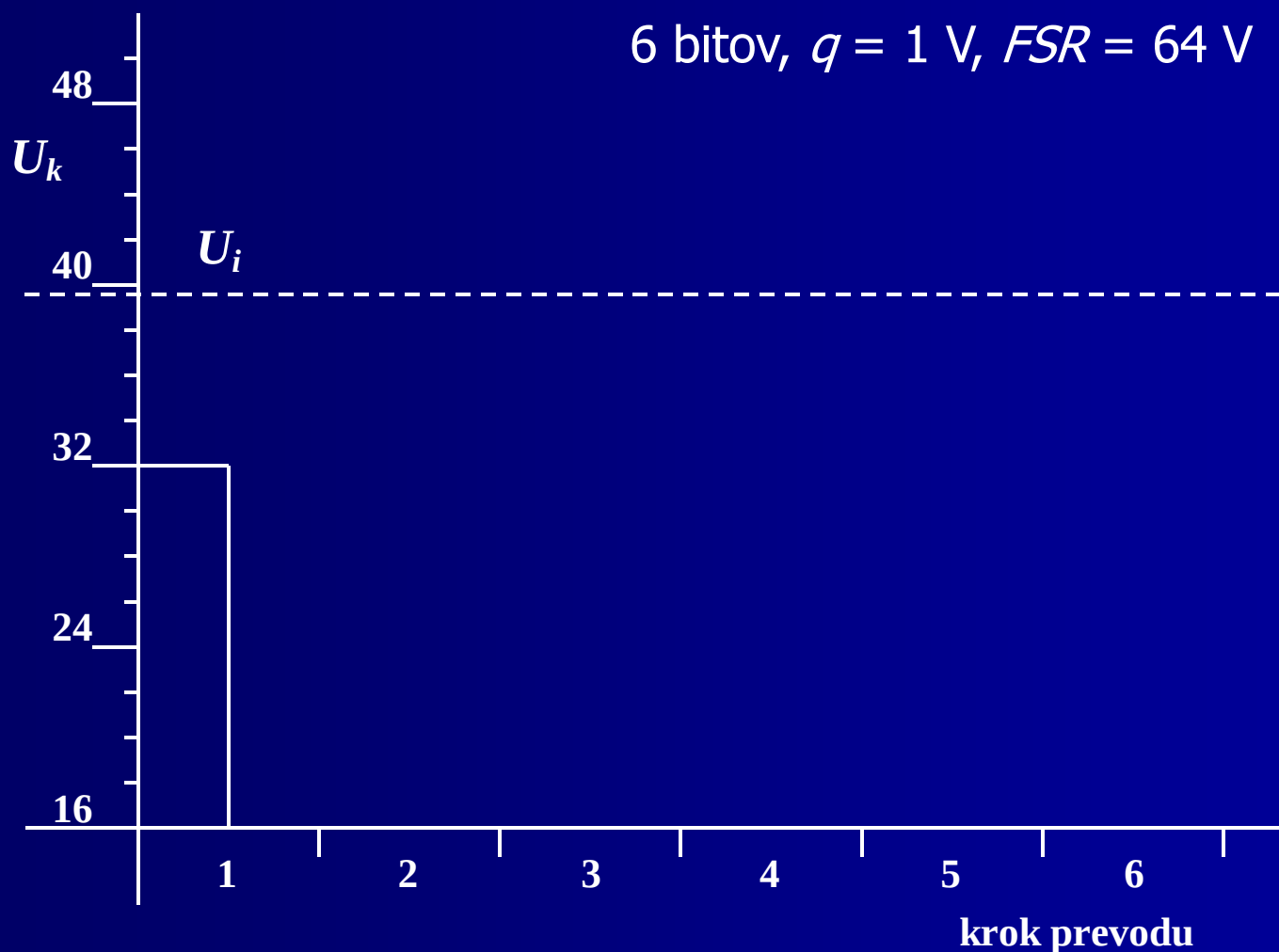


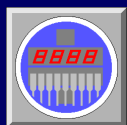
Kompenzačné AČP



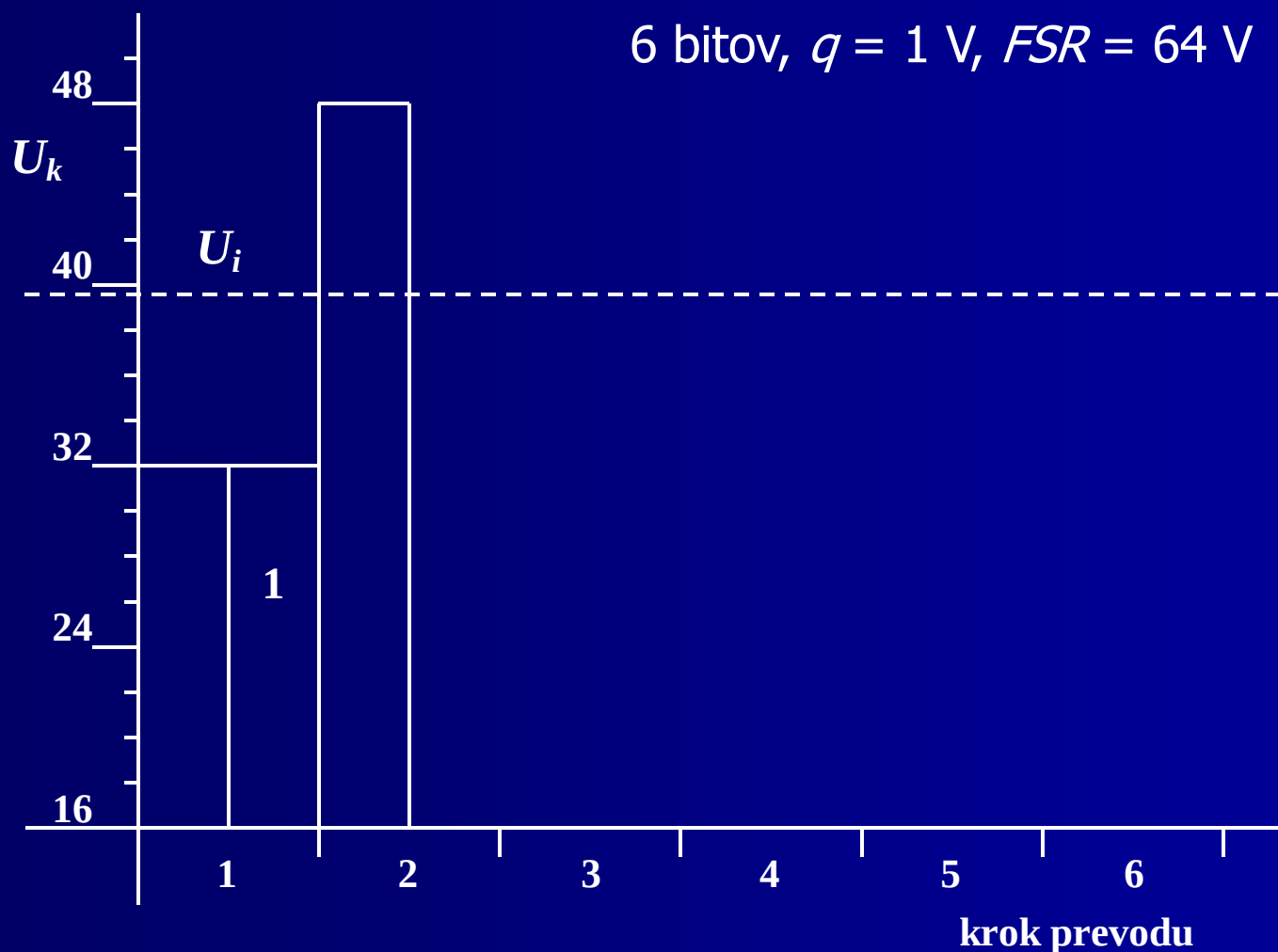


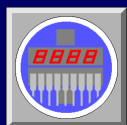
Kompenzačný AČP pracujúci metódou postupnej aproximácie



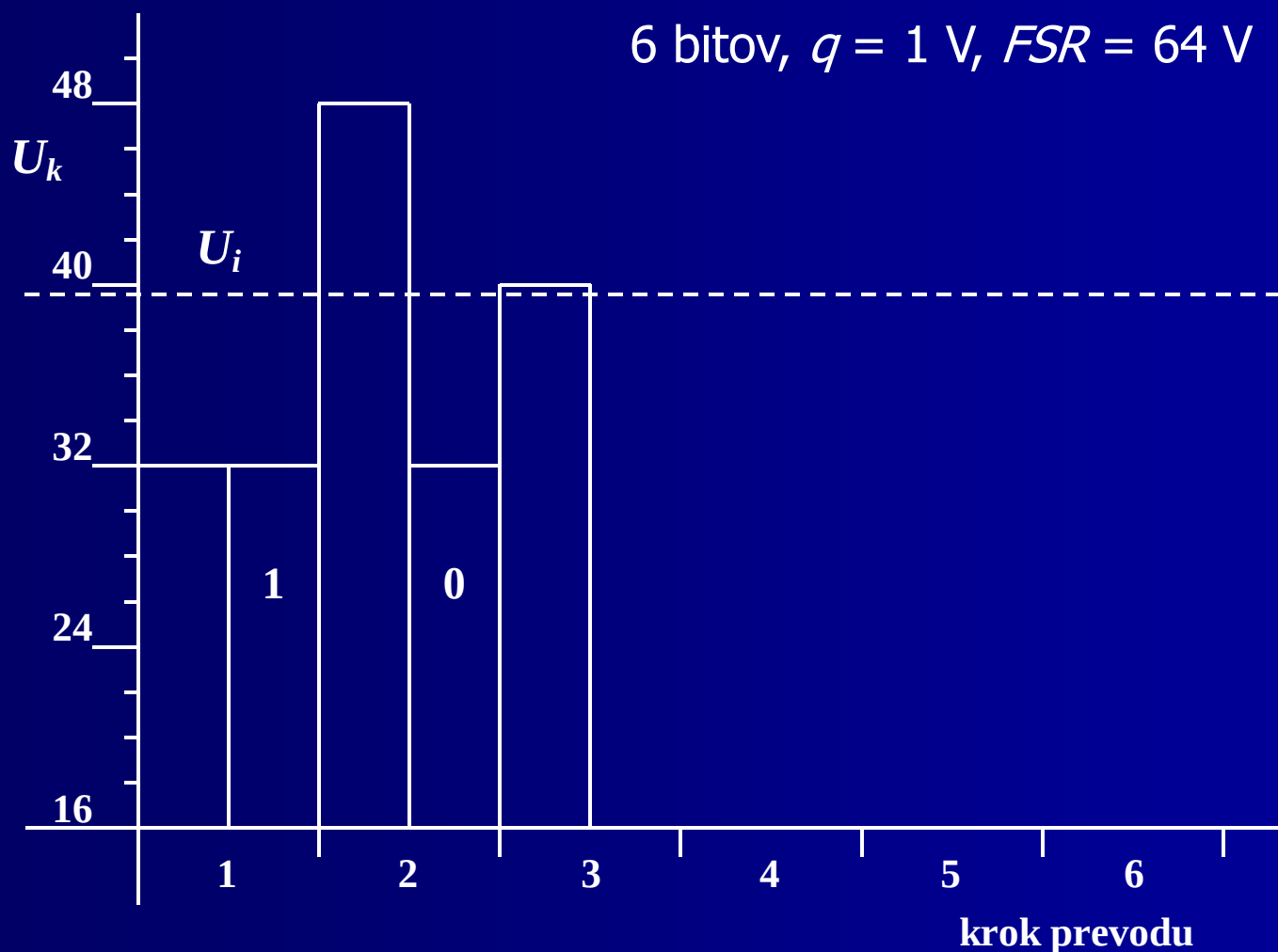


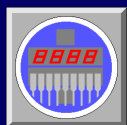
Kompenzačný AČP pracujúci metódou postupnej aproximácie



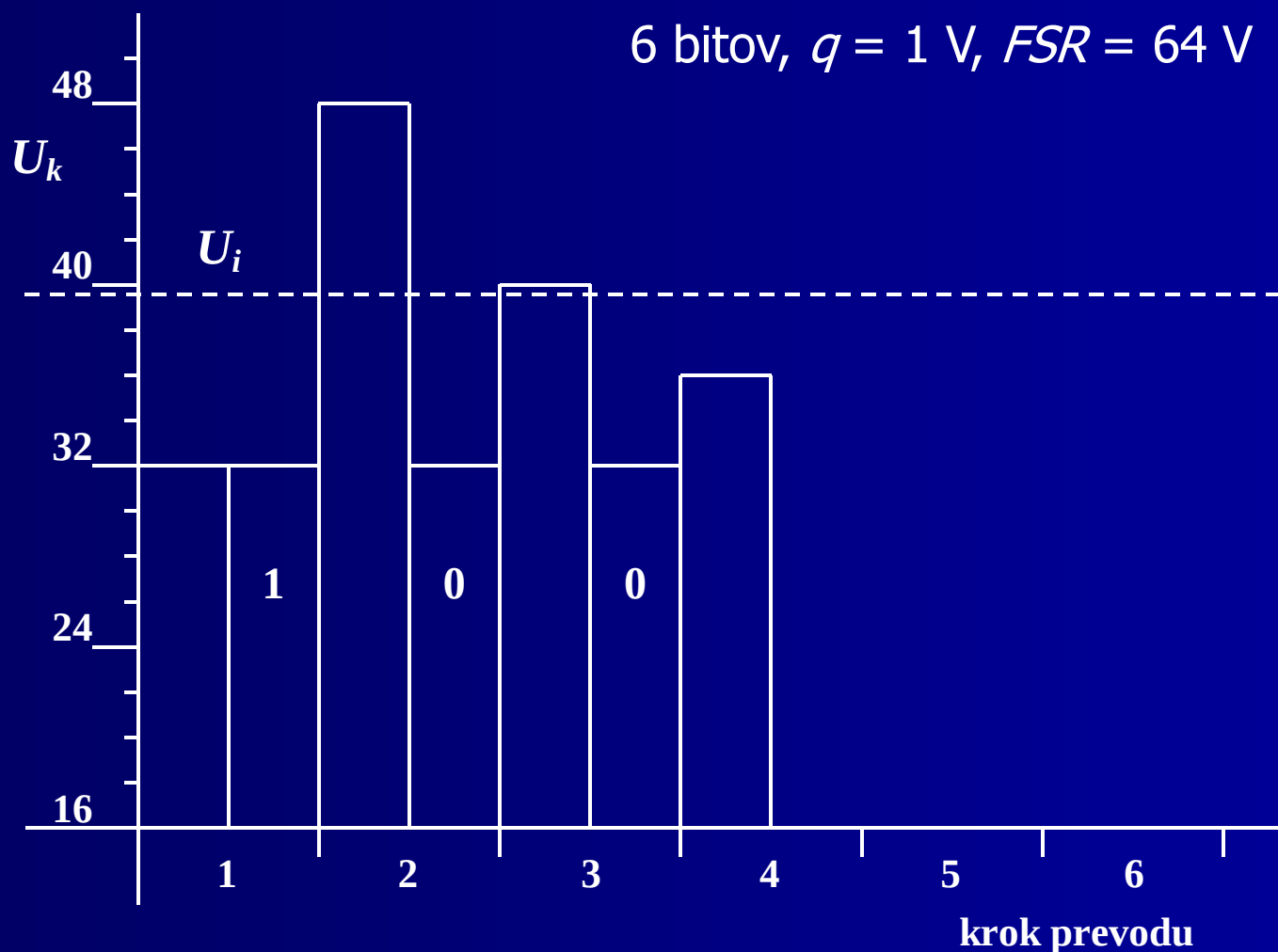


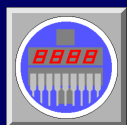
Kompenzačný AČP pracujúci metódou postupnej aproximácie



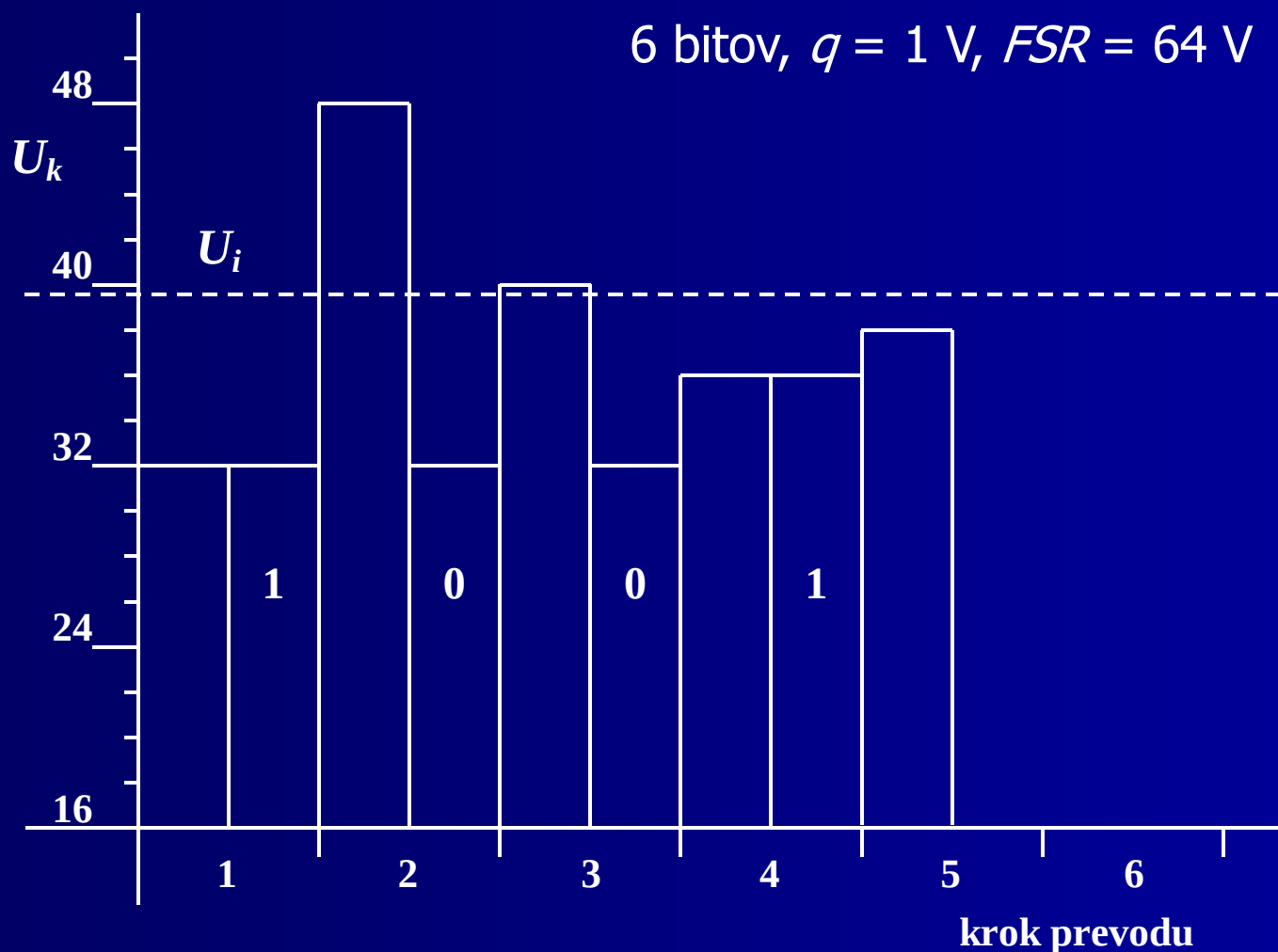


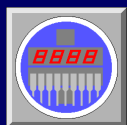
Kompenzačný AČP pracujúci metódou postupnej aproximácie



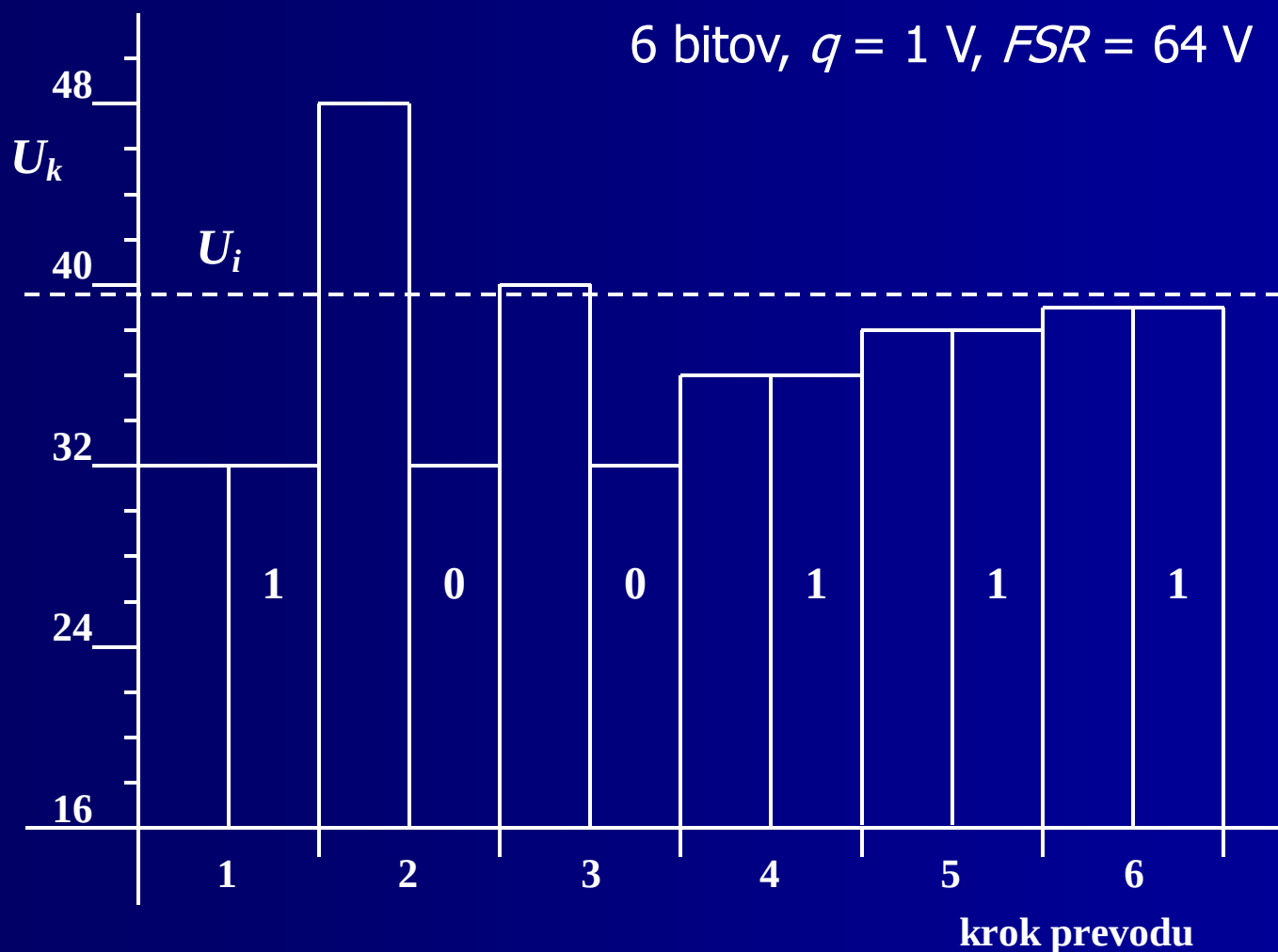


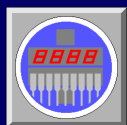
Kompenzačný AČP pracujúci metódou postupnej aproximácie





Kompenzačný AČP pracujúci metódou postupnej aproximácie



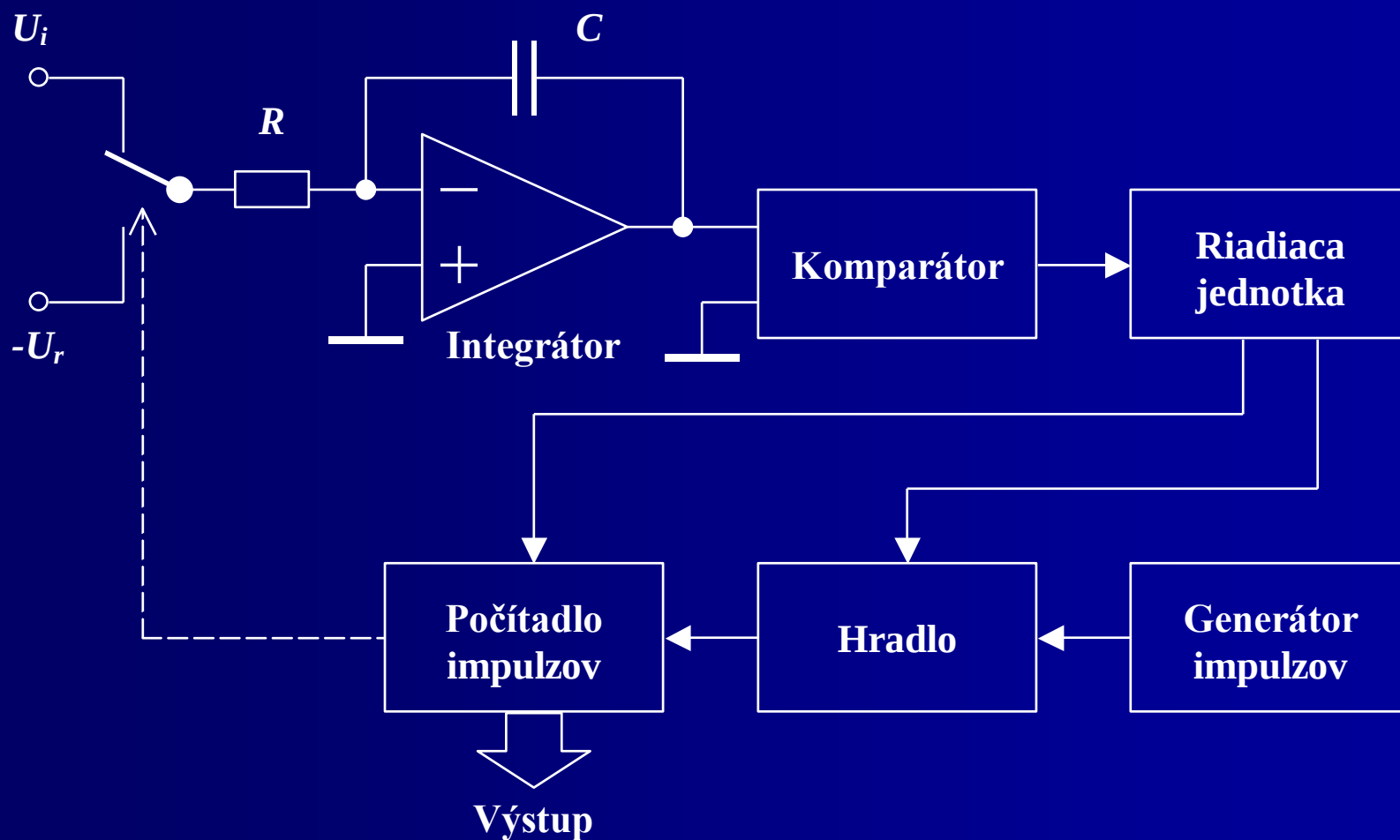


Kompenzačné AČP pracujúce metódou postupnej aproximácie

- najbežnejšie, najlacnejšie
- pomerne presné – 8 - 16 bitov
- pomerne rýchle – 50 tis. - 1 mil. prev./s
- vyžadujú vzorkovací obvod
- používajú sa v zásuvných kartách do PC
- „low cost - general purpose“ =
 - 12 bitov, 20 - 50 tis. prevodov/s

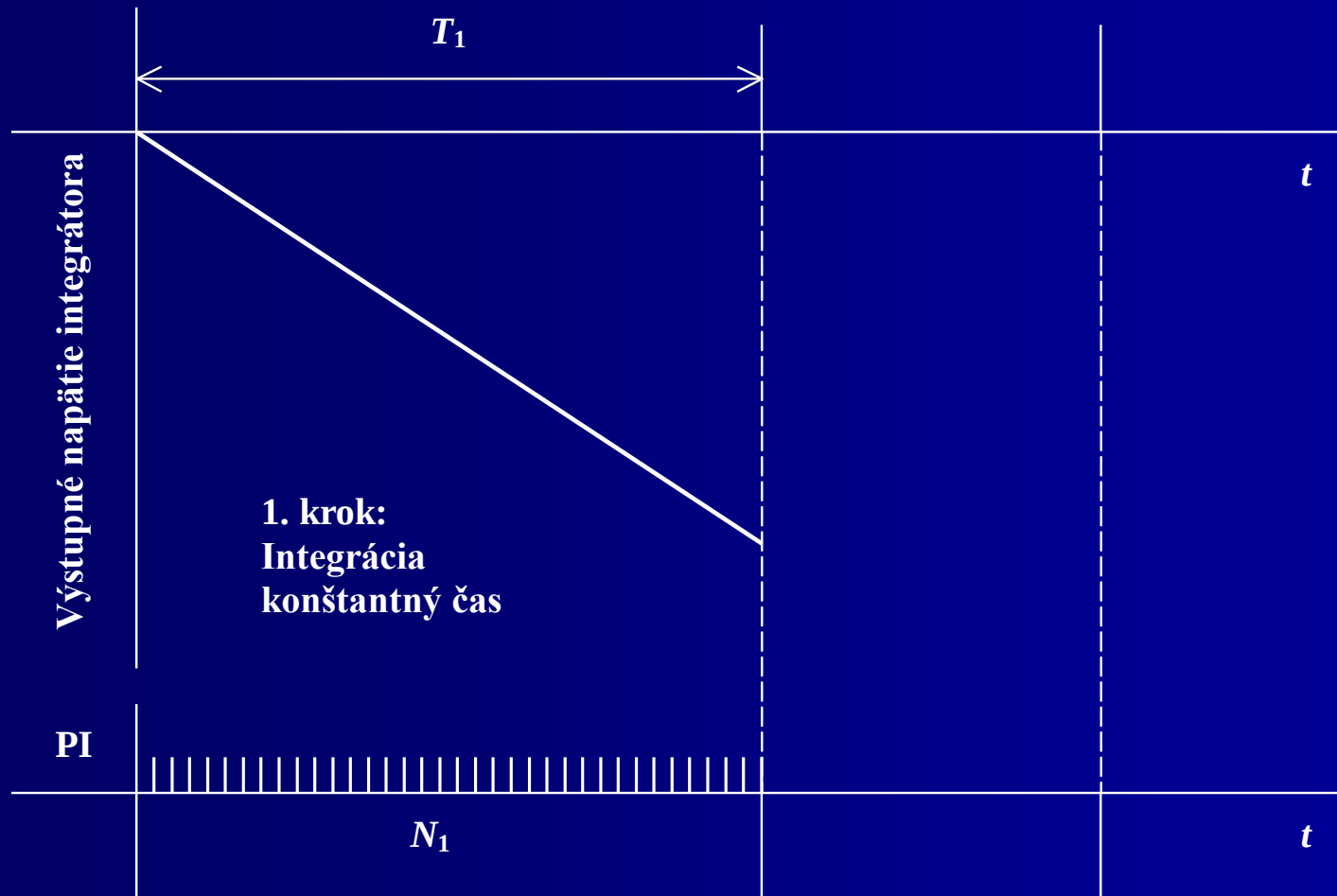


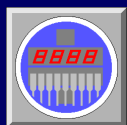
Integračné AČP – Dual Slope



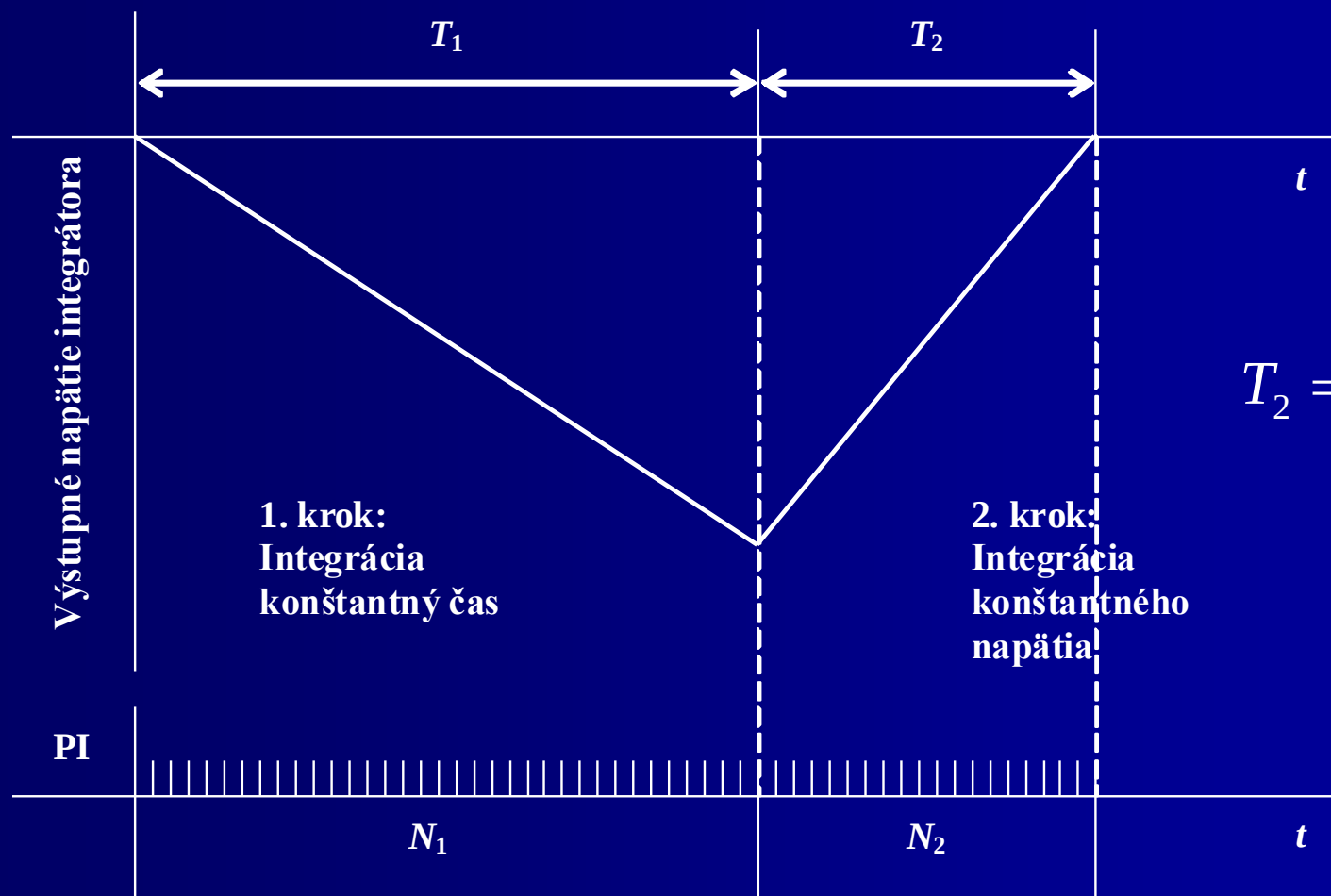


Metóda dvojitej integrácie



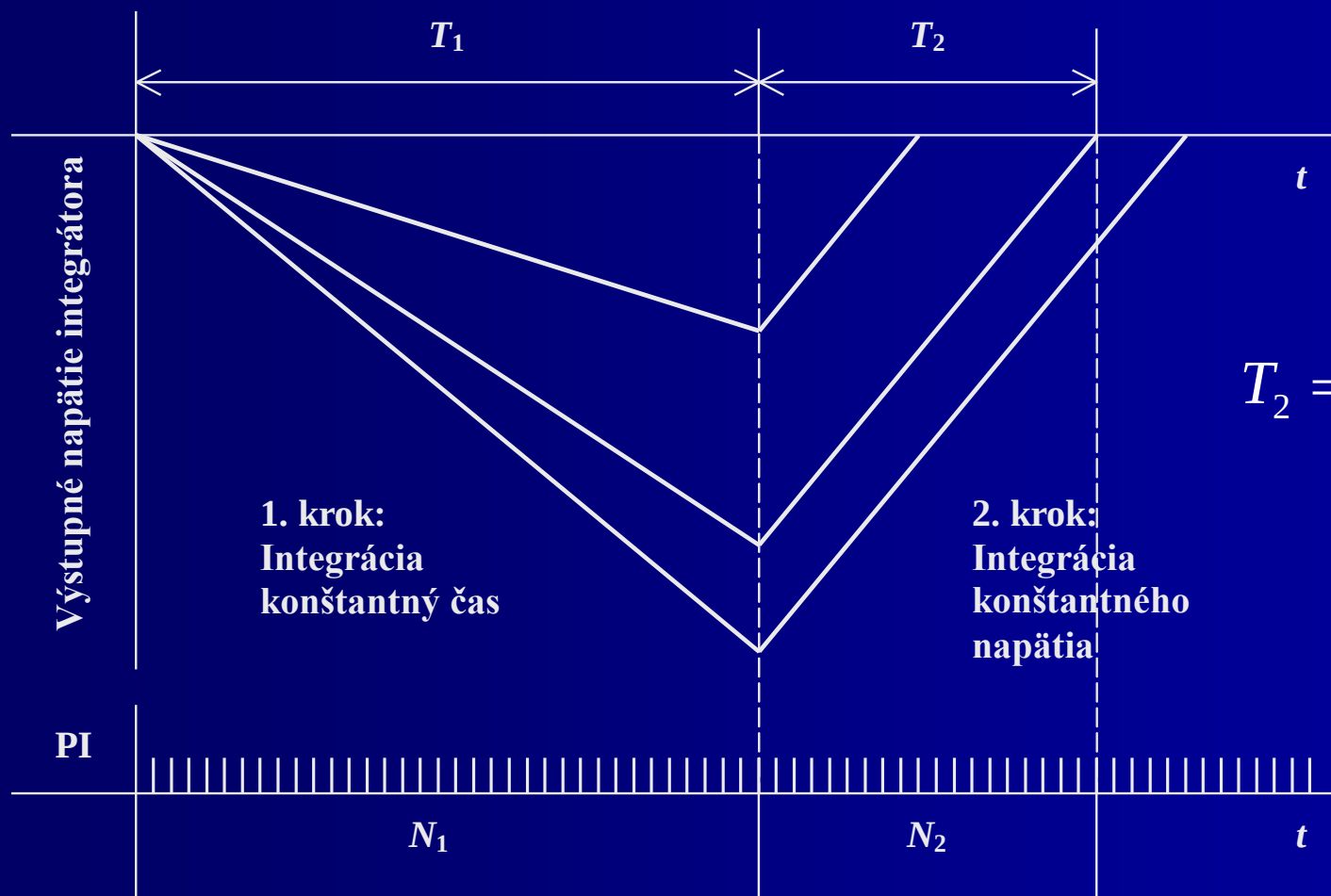


Metóda dvojitej integrácie



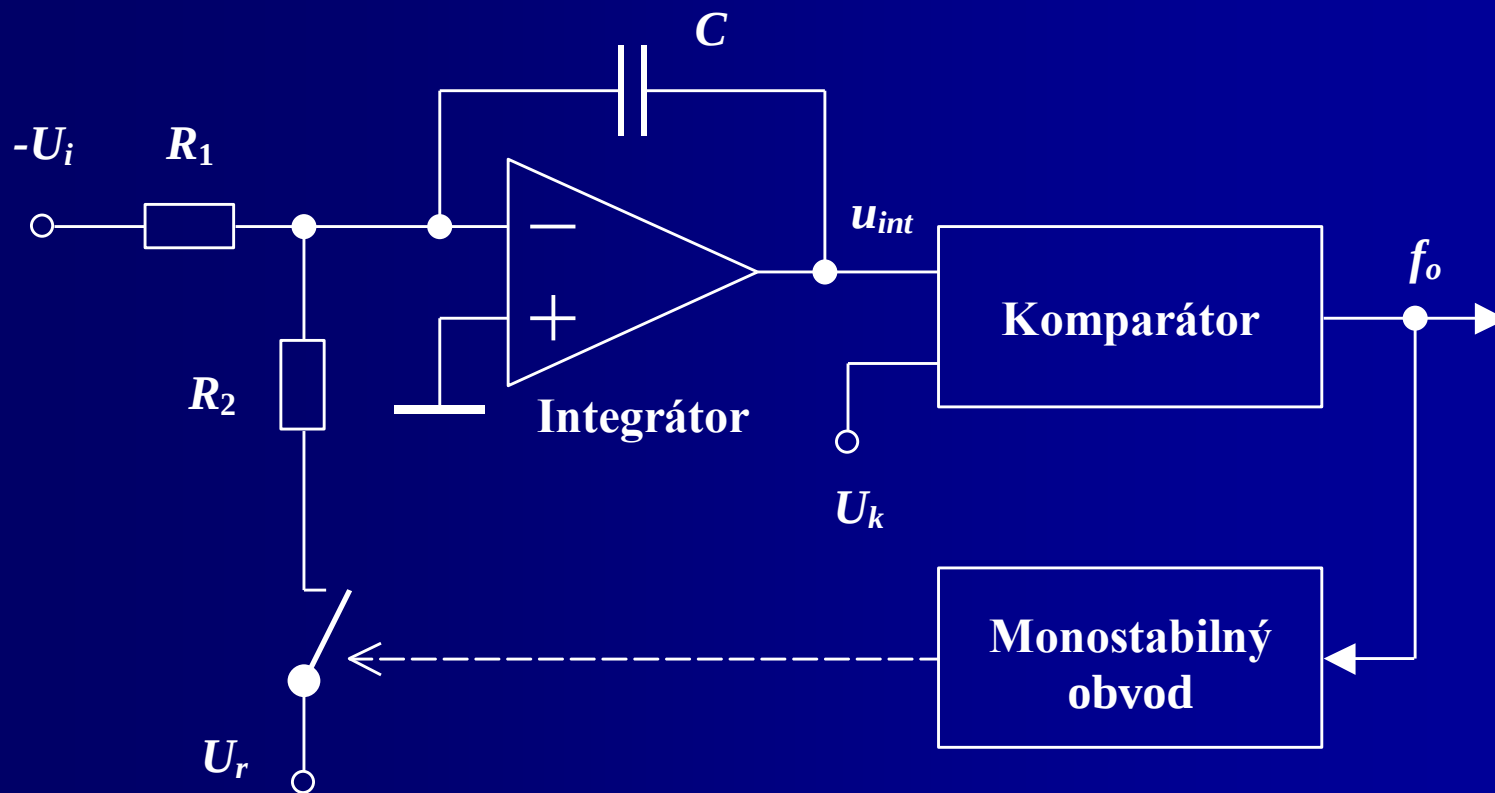


Metóda dvojitej integrácie



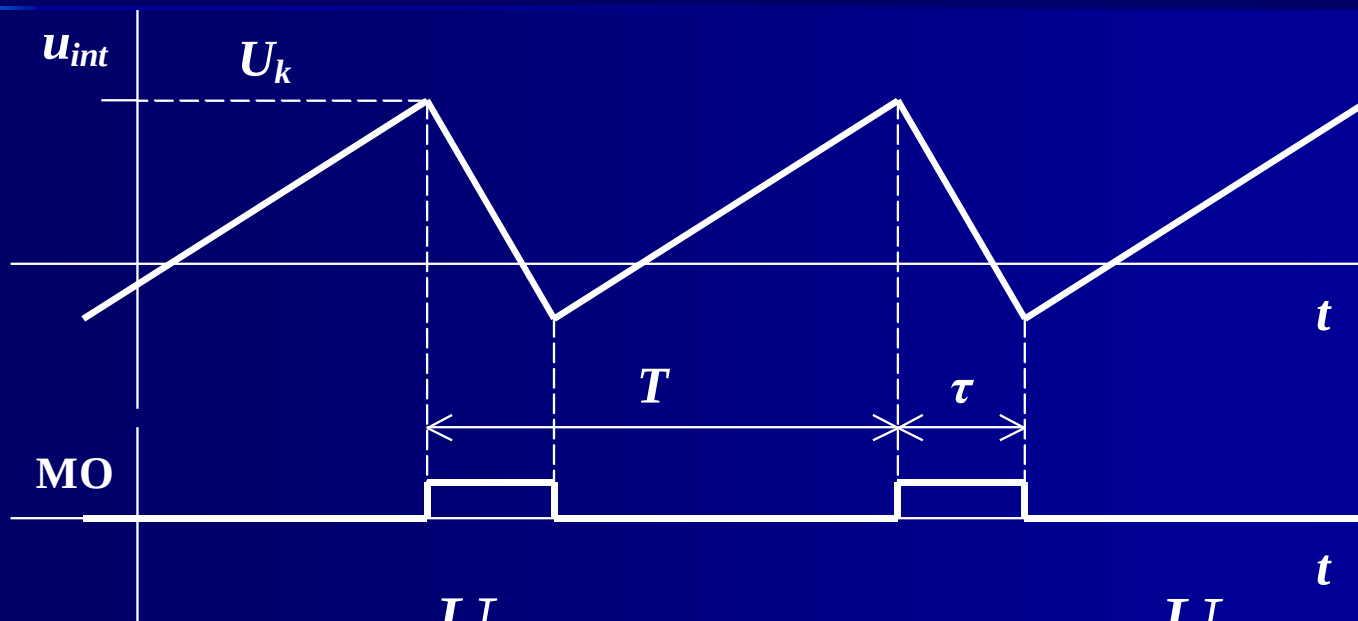


Prevodník napätia na frekvenciu





Prevodník napätia na frekvenciu



$$Q_1 = I_i \cdot T = \frac{U_i}{R_1} \cdot T = Q_2 = I_r \cdot \tau = \frac{U_r}{R_2} \cdot \tau$$

$$f = \frac{1}{T} = \frac{U_i}{U_r} \cdot \frac{R_2}{R_1} \cdot \frac{1}{\tau} \quad f = \frac{U_i}{U_r} \cdot \frac{1}{\tau}$$



Integračné AČP – potlačenie sériového rušivého napätia

- vstupné napätie U_i
- rušivé napätie $U_{\check{s}} \cdot \sin(\omega_{\check{s}} \cdot t)$

$$\int_0^{T_1} [U_i + U_{\check{s}} \cdot \sin(\omega_{\check{s}} \cdot t)] dt = U_i \cdot T_1 + U_{\check{s}} \cdot \frac{\sin(\pi \cdot f_{\check{s}} \cdot T_1)}{\pi \cdot f_{\check{s}}}$$



Integračné AČP – potlačenie sériového rušivého napätia

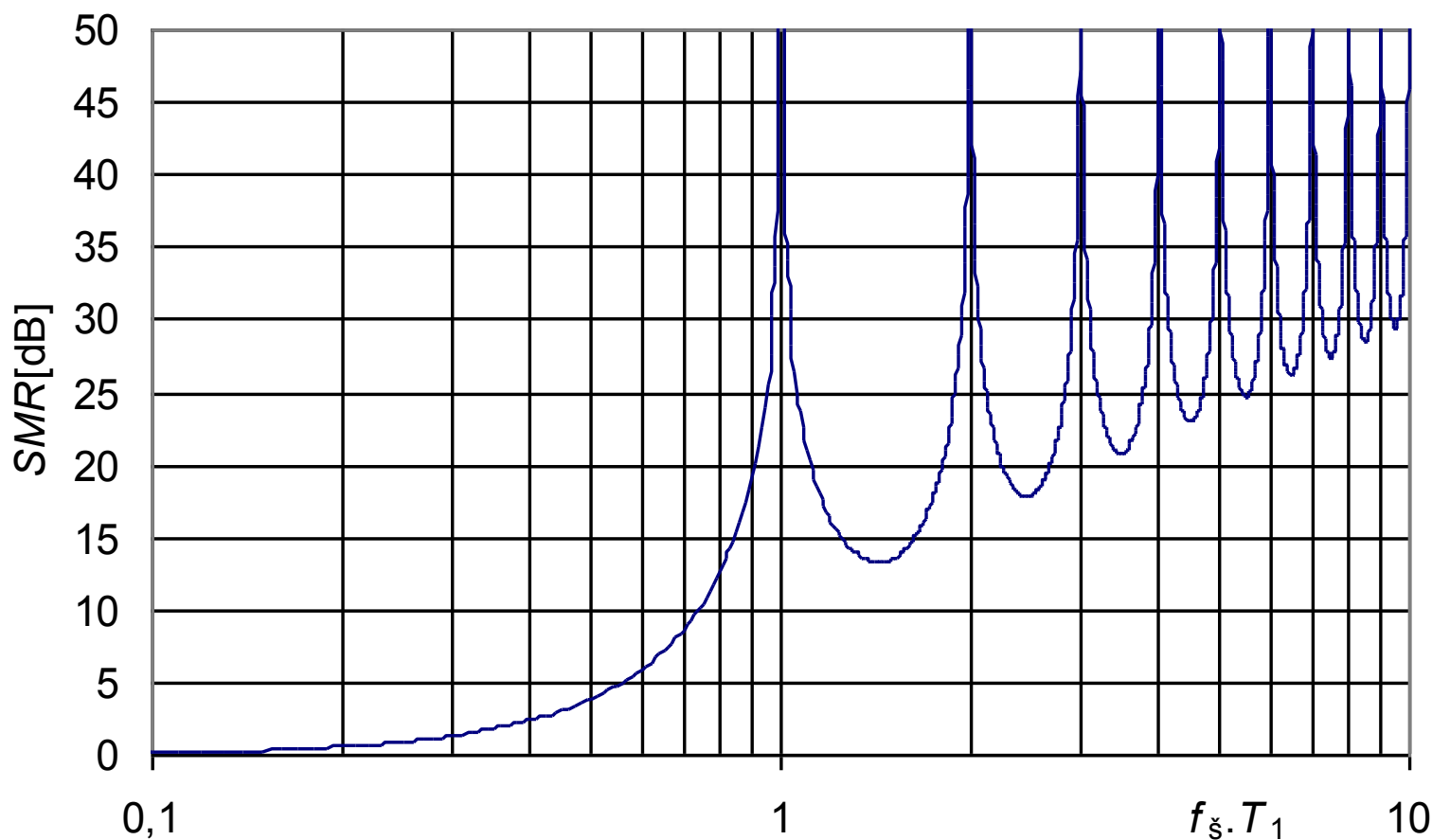
$$T_2 = \left[U_i \cdot T_1 + U_{\check{s}} \cdot \frac{\sin(\pi \cdot f_{\check{s}} \cdot T_1)}{\pi \cdot f_{\check{s}}} \right] / U_r$$

$$T_2 = \frac{U_i \cdot T_1}{U_r} + \frac{U_{\check{s}}}{U_r} \cdot \frac{\sin(\pi \cdot f_{\check{s}} \cdot T_1)}{\pi \cdot f_{\check{s}}}$$

$$SMR = 20 \cdot \log \frac{\pi \cdot f_{\check{s}} \cdot T_1}{\sin(\pi \cdot f_{\check{s}} \cdot T_1)} \quad [dB]$$



Integračné AČP – potlačenie sériového rušivého napätia





Integračné AČP

- najpresnejšie
- najpomalšie
- merajú strednú hodnotu
- najčastejšie v multimetroch
 - 3 ½ až 8 ½ miestne
 - 3 merania za sekundu

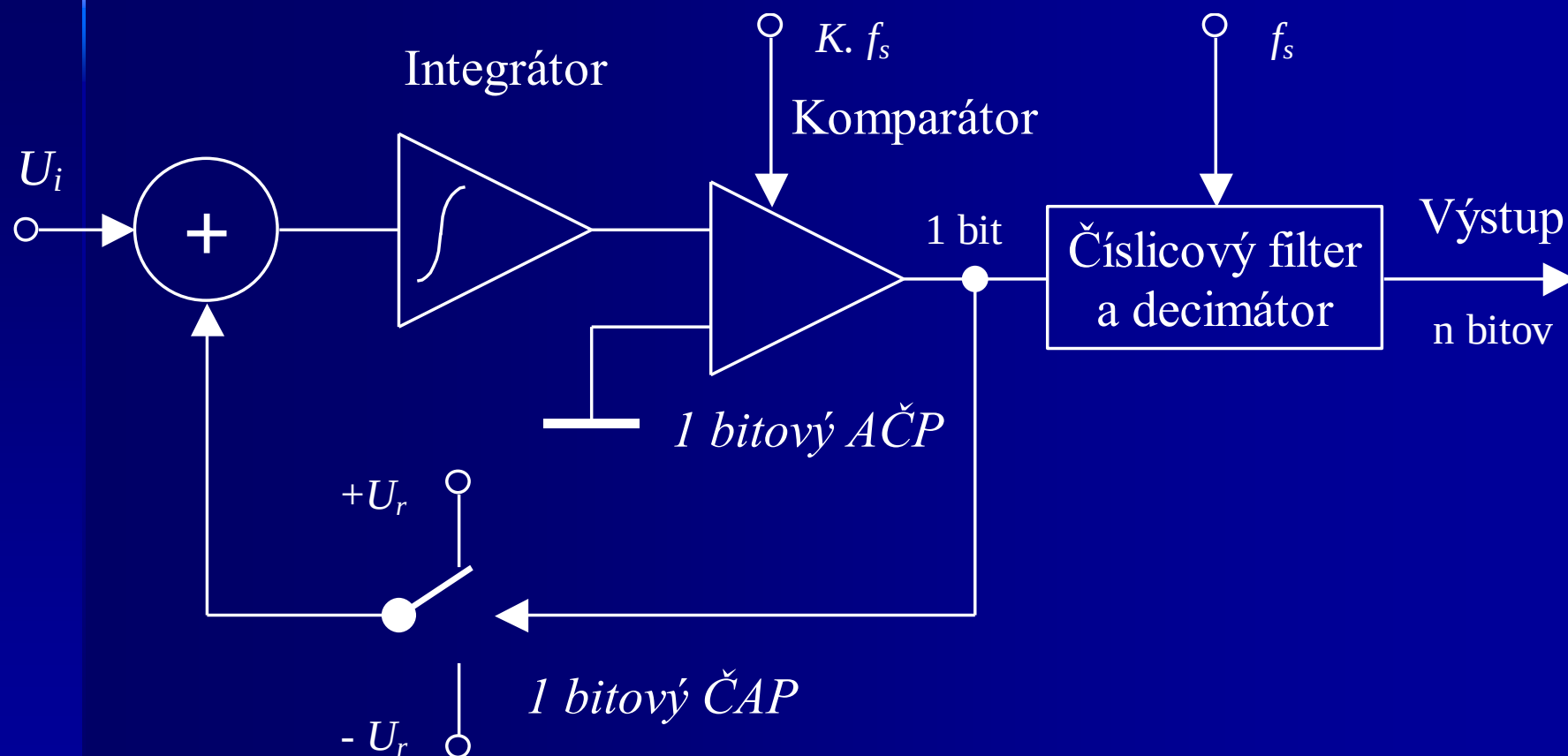


Sigma-delta AČP

- Prevzorkovanie
- Tvarovanie spektra šumu
- Číslicová filtrácia
- Decimácia



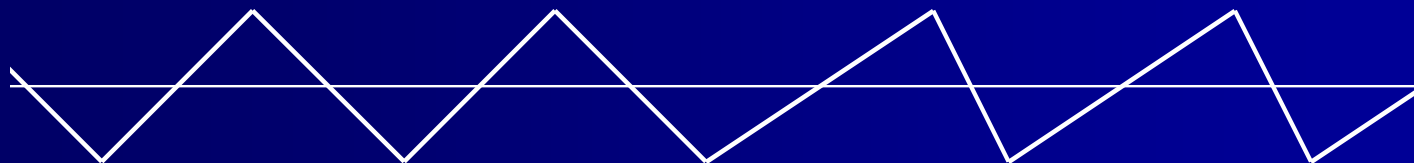
Sigma-delta AČP





Sigma-delta AČP

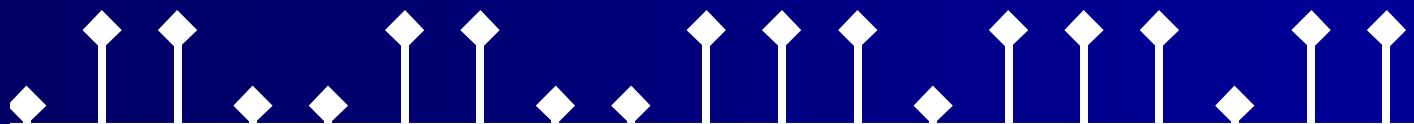
Výstup integrátora



Výstup komparátora (spojitý)



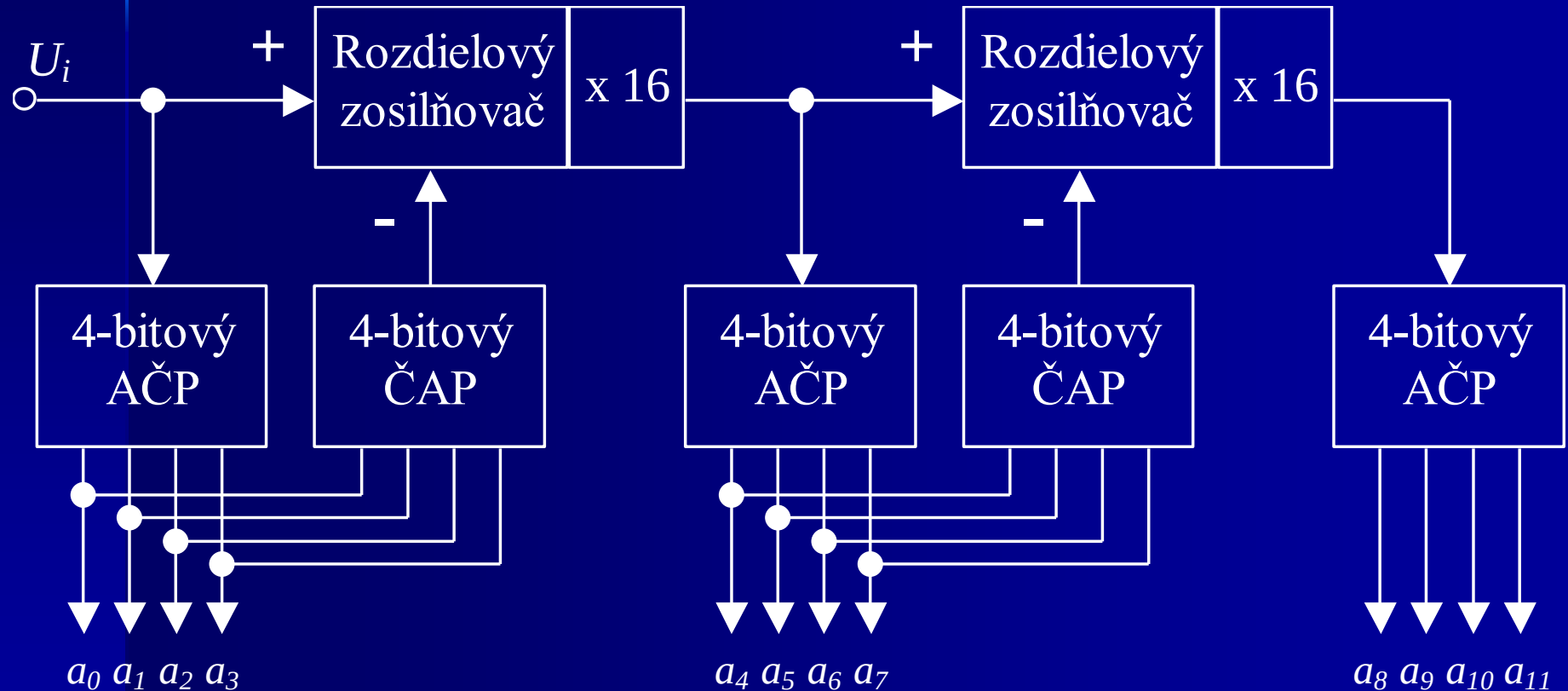
Výstup komparátora (taktovaný)

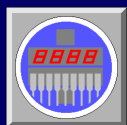




Sigma-delta AČP

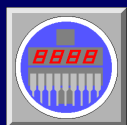
- najmodernejšie
- najvyššia linearita
- potreba autokalibrácie
 - presné a pomalé:
 - 24 bitov/desiatky až stovky prevodov/s
 - audio
 - 16 bitov/48 tis. prevodov/s





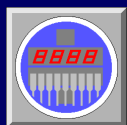
Efektívny počet bitov

- n -bitový prevodník
- Signál = sínus cez celý rozsah = $q \cdot 2^{n-1} / 1,41$
- Šum = kvantizačný šum = $q / \sqrt{12}$
- $SNR[\text{dB}] = 6,02 \cdot n + 1,76$
- $ENOB = (SNR - 1,76) / 6,02$
- Počet bitov analógového signálu
- Efektívny počet bitov AČP



Efektívny počet bitov

	THS 8083	ADS 809	THS 1401	ADS 1252	AD 7718	AD 7718
n [bit]	8	12	14	24	24	24
ENOB	6,68	10,50	11,67	18,3	19,1	15,9
SNR [dB]	42	65	72	112	117	98
Šum [ppm]	7943	562	251	2,5	1,38	13
Sa/s					5,35	105,3

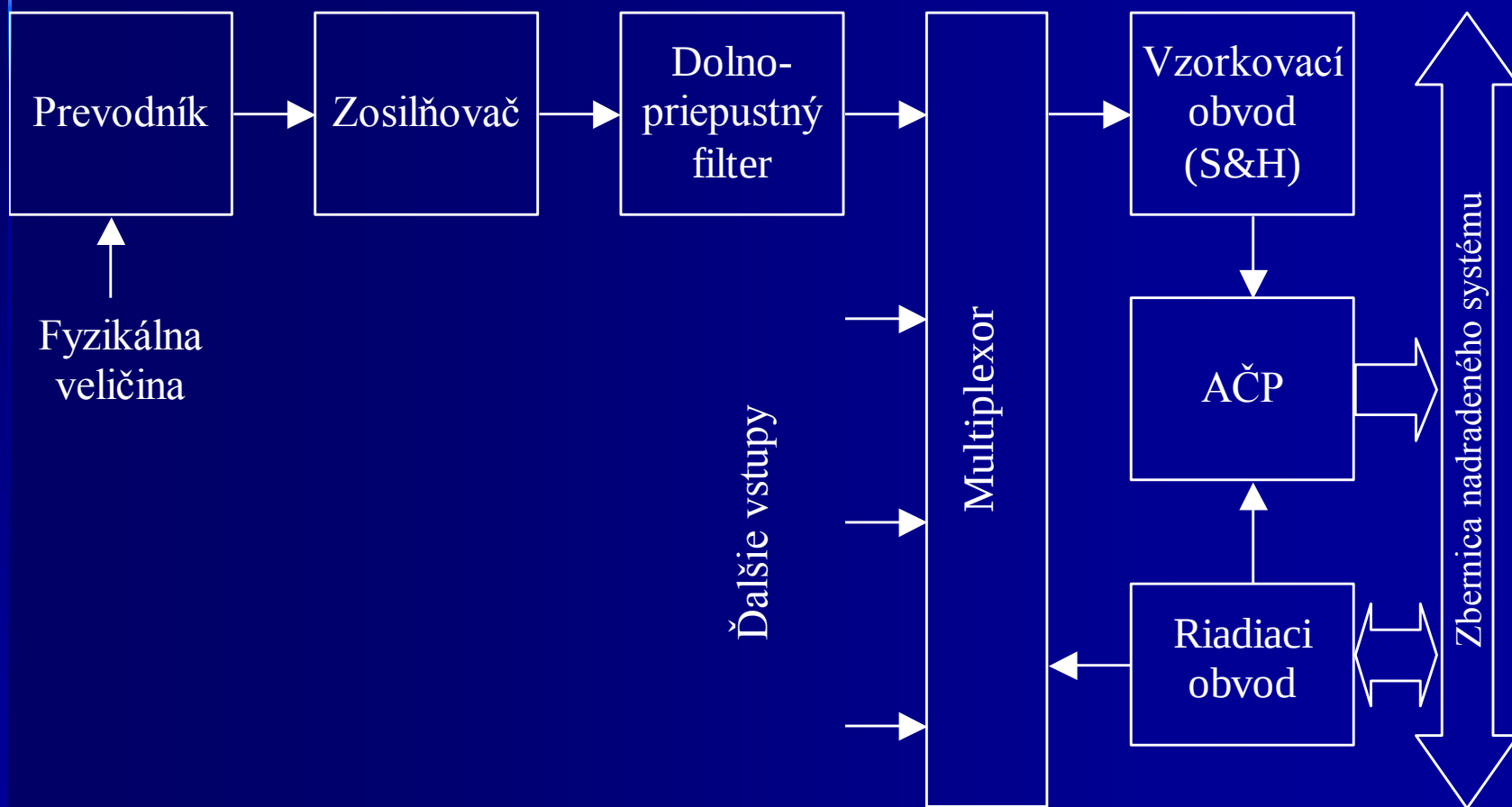


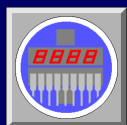
Porovnanie AČP

Typ	Počet bitov	MS/s	DNL +/-LSB	INL +/-LSB	SNR [dB]
THS 8083	3x8	95	1,75	2,15	42
ADS 809	12	80	1,7	6	65
THS 1401	14	1	1	5	72
ADS 1252	24 19 _{ef.}	0,041	1	256	112



System na zber údajov

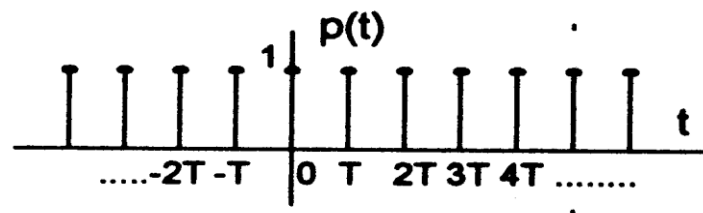
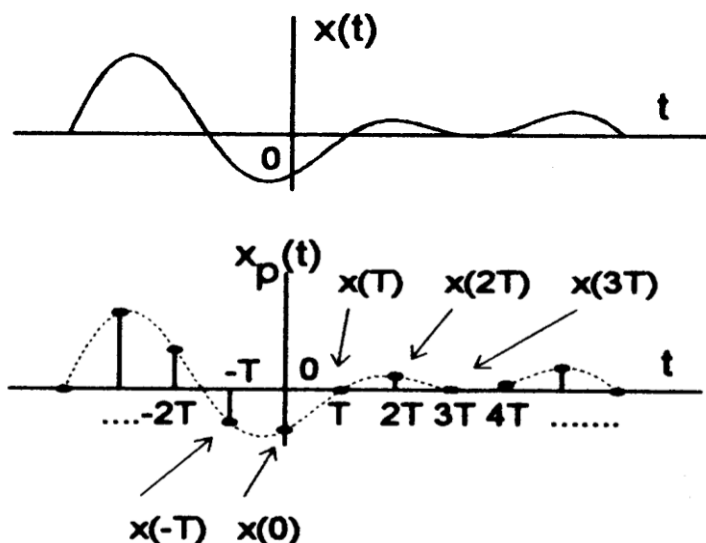




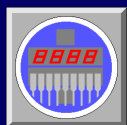
Vzorkovanie

- vzorkovacia funkcia $p(t)$
- vzorkovacia perióda T_s
- vzorkovacia frekvencia ω_s

$$\omega_s = \frac{2\pi}{T_s}$$



$$x_p(t) = x(t) \cdot p(t)$$

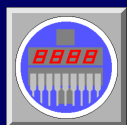


Vzorkovanie

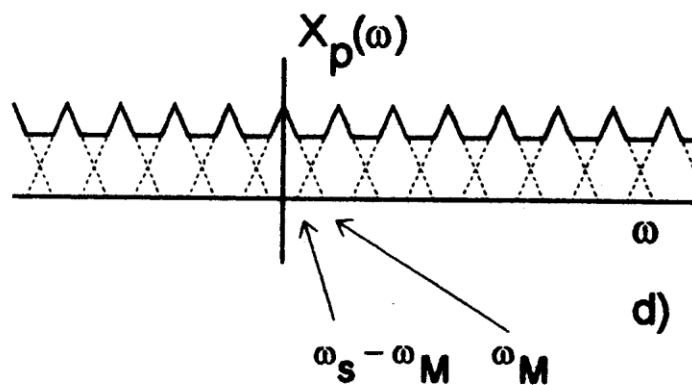
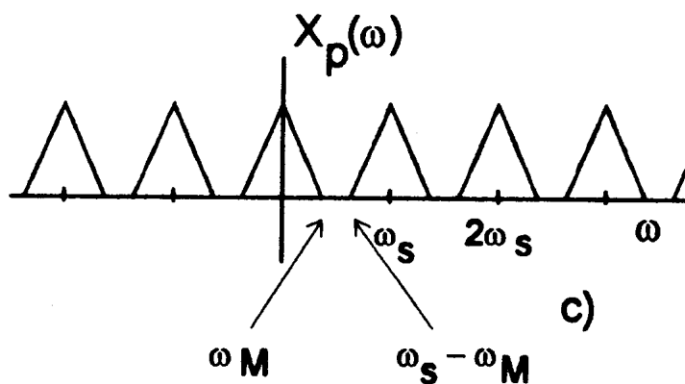
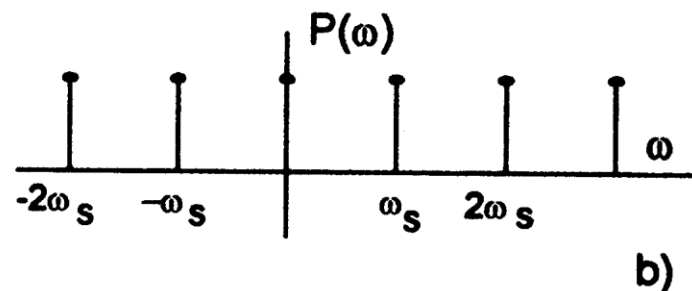
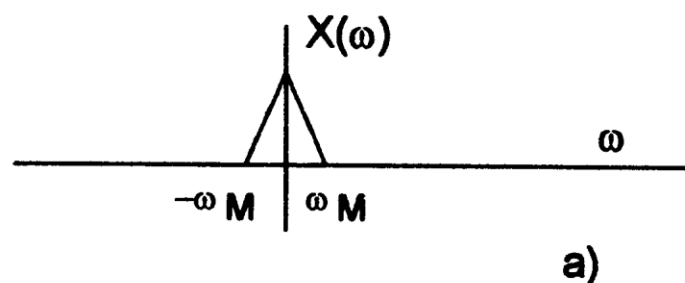
- Spektrum vzorkovaného signálu

$$x_p(t) = x(t) \cdot p(t)$$

$$X_p(\omega) = \frac{1}{T_S} \sum_{k=-\infty}^{\infty} X(\omega - k\omega_s)$$

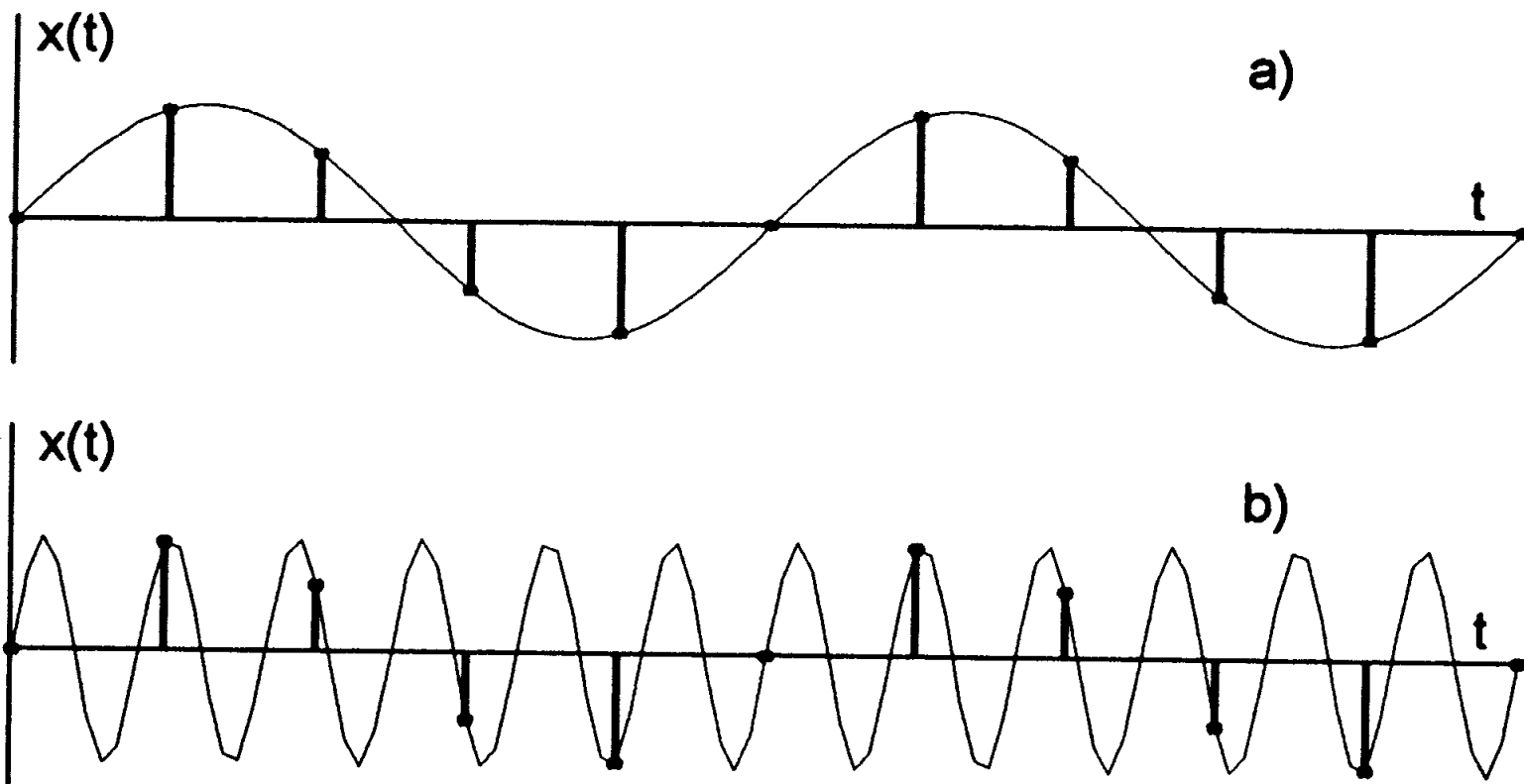


Vzorkovanie





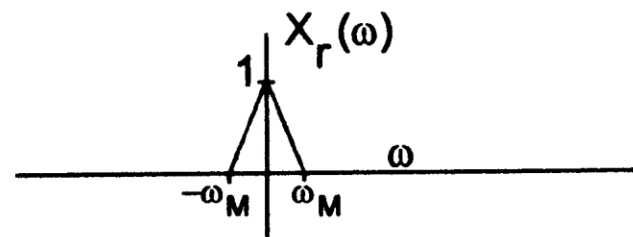
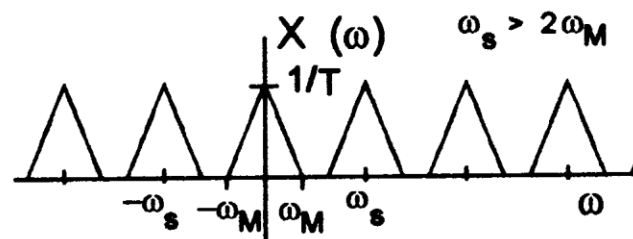
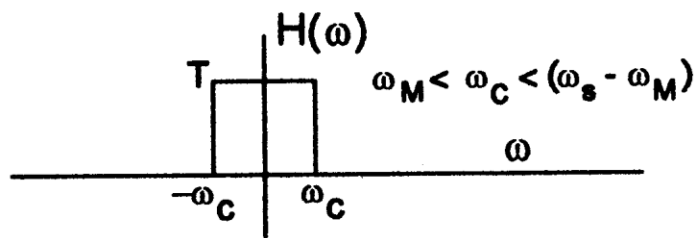
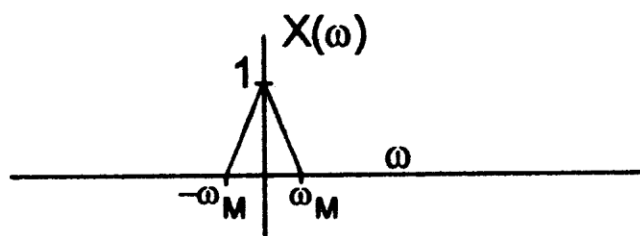
Aliasing - Prekrývanie spektier





Rekonštrukcia signálu

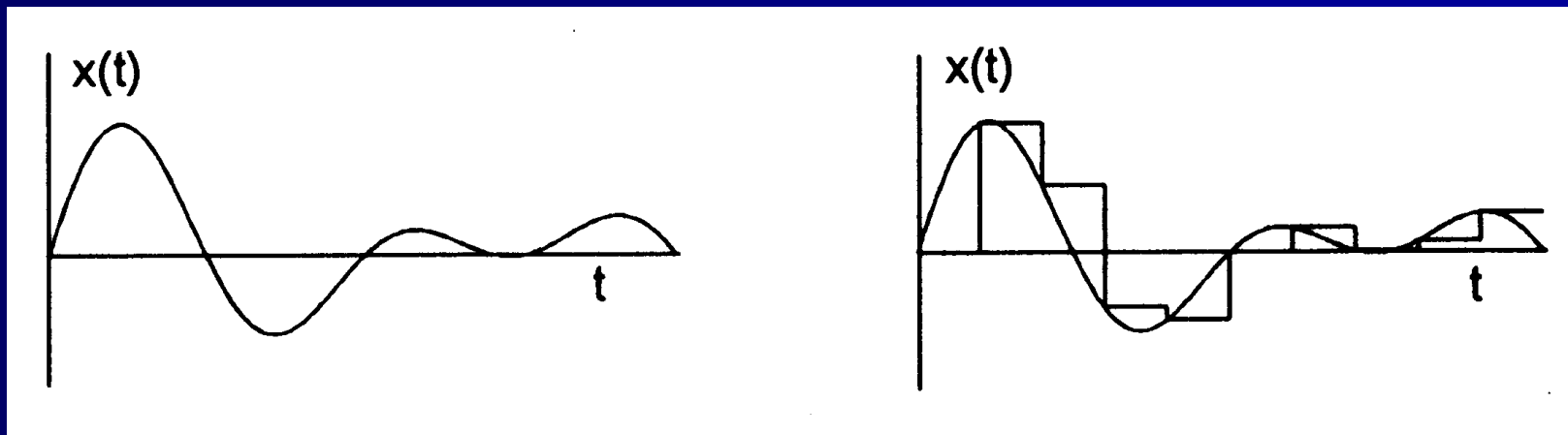
■ analógovým filtrom





Rekonštrukcia signálu

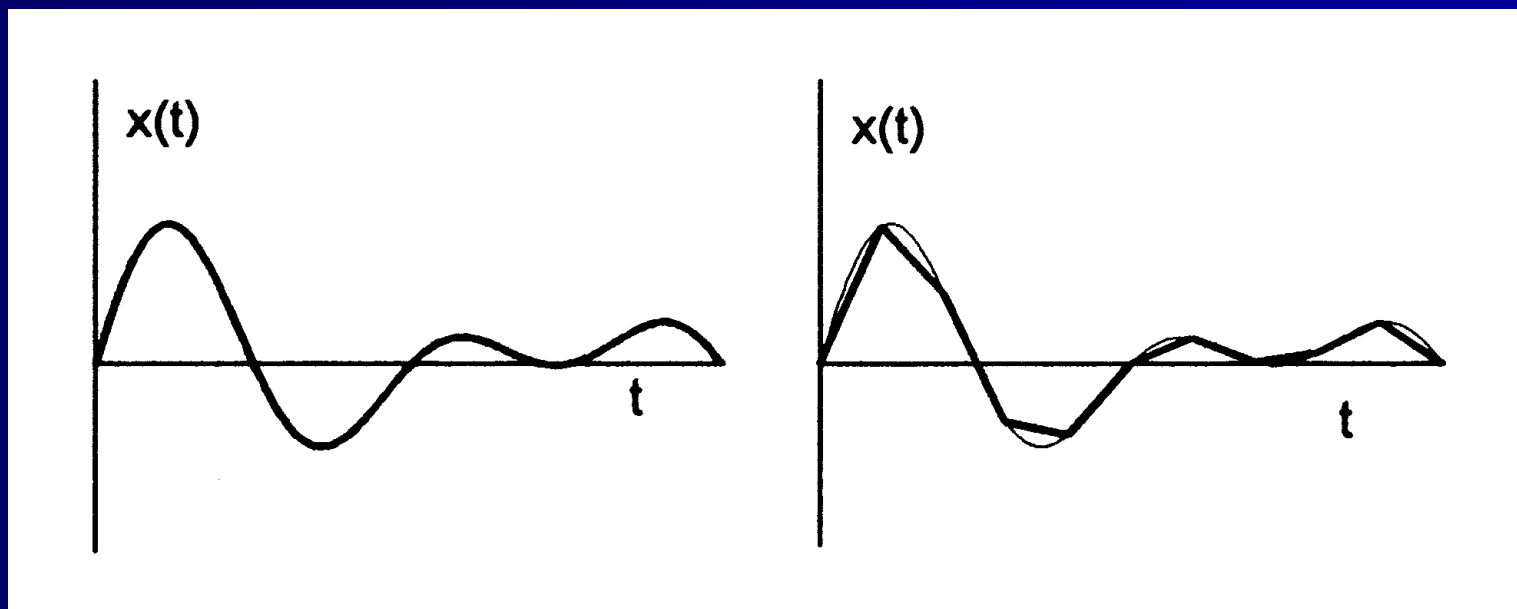
- skokovým priebehom

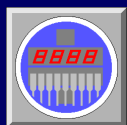




Rekonštrukcia signálu

- lineárnou interpoláciou





Rekonštrukcia signálu

- sínusovou interpoláciou

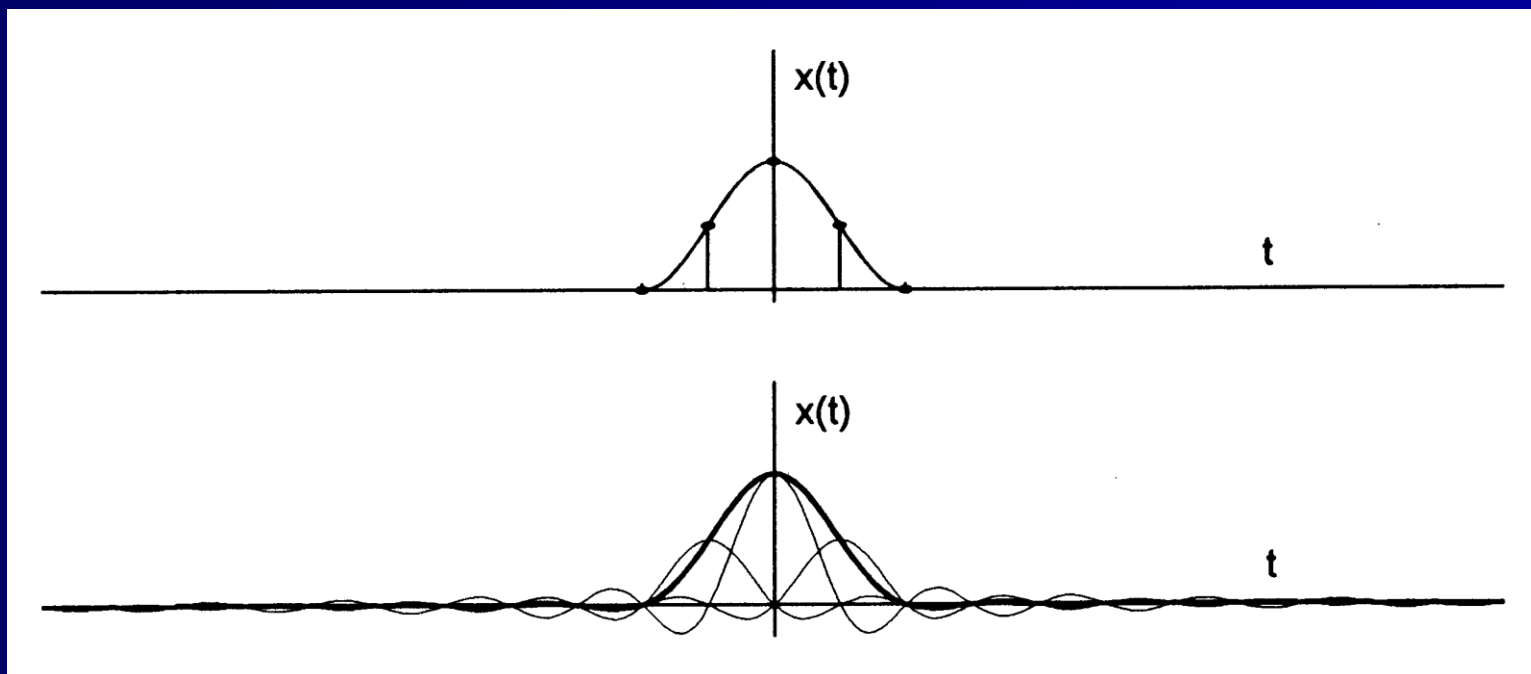
$$x(t) = \sum_{n=-\infty}^{\infty} \left[x(nT_s) \frac{\sin((t - nT_s)\pi / T_s)}{(t - nT_s)\pi / T_s} \right]$$

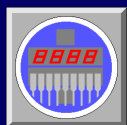
- zobrazenie priebehu
- generovanie signálu



Rekonštrukcia signálu

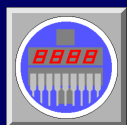
- sínusovou interpoláciou



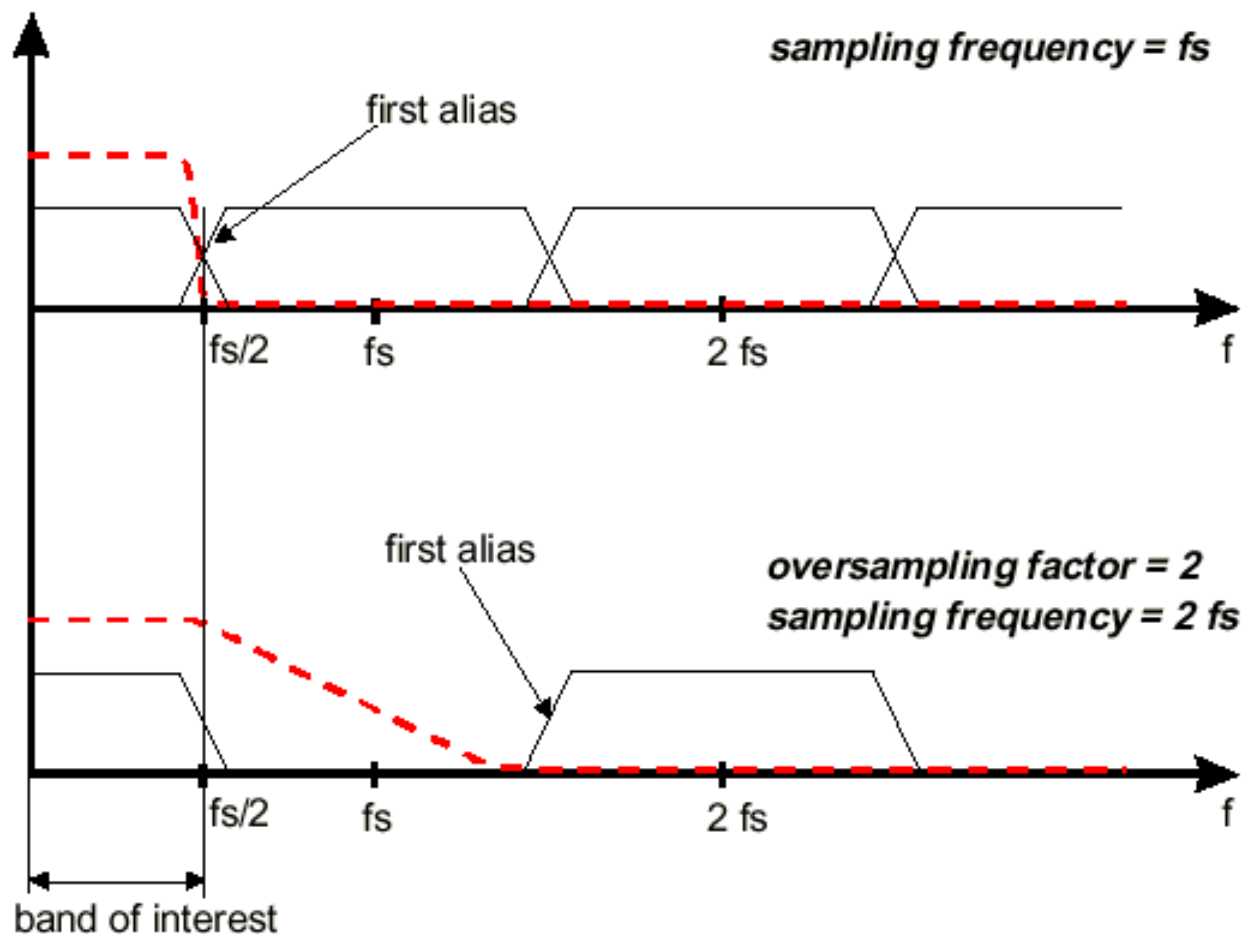


Oversampling

- Prevzorkovanie
- vzorkovanie (podstatne) vyššou frekvenciou než vyžaduje vzorkovacia teoréma
- nasledujúce spracovanie
 - filtrácia
 - decimácia
- zvýšenie rozlišovacej schopnosti
- zjednodušenie protiprekryvného filtra



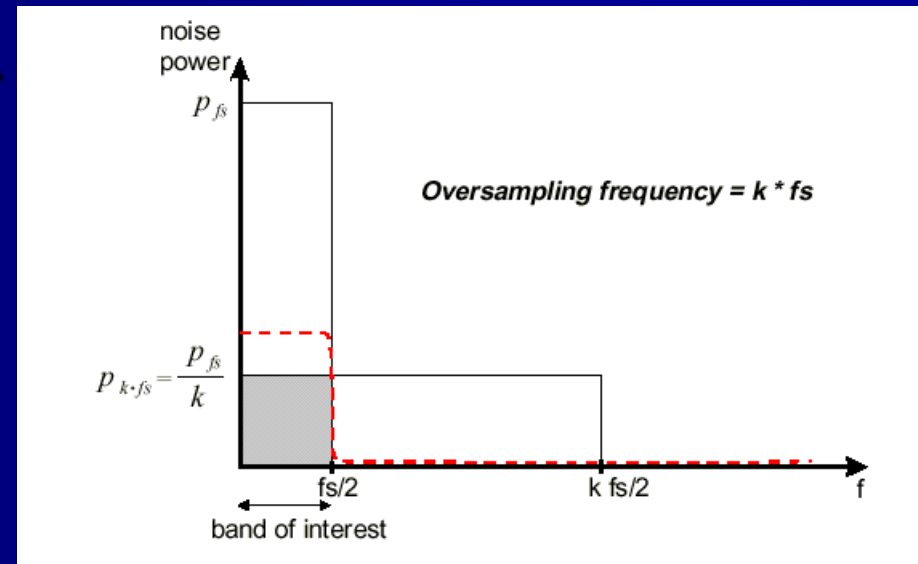
Prevzorkovanie

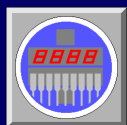




Prevzorkovanie

- Vplyv prevzorkovania na veľkosť kvantizačného šumu
- výkon kvantizačného šumu nezávisí od frekvencie vzorkovania
- $SNR[\text{dB}] = 6,02 \cdot n + 1,76 + 10 \cdot \log(k)$

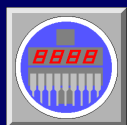




Prevzorkovanie

- Vplyv prevzorkovania pri pridaní alebo prítomnosti bieleho šumu

Koeficient prevzorkovania k	Zlepšenie SNR v dB	Prírastok rozlišovacej schopnosti v bitoch
2	3	0,5
4	6	1,0
8	9	1,5
16	12	2,0
32	15	2,5
64	18	3,0
128	21	3,5
256	24	4,0



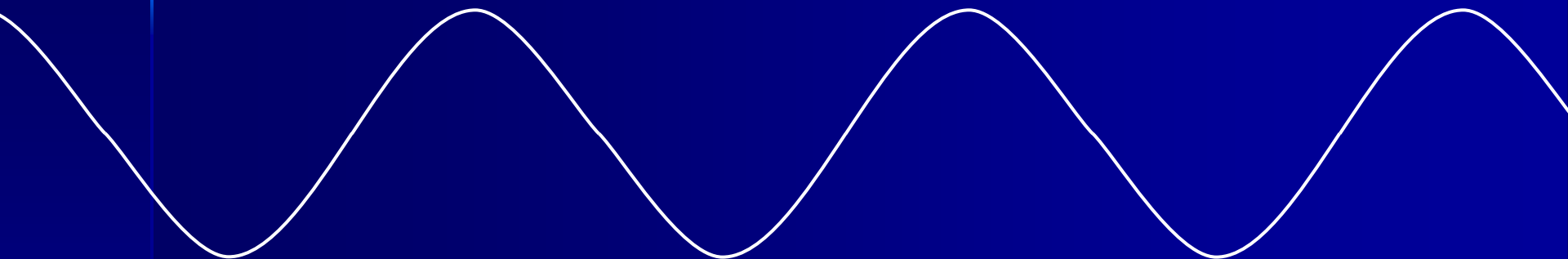
Okná pri vzorkovaní

- Fourierova transformácia
 - nekonečný časový interval
 - vzorkovanie konečný čas
 - Okno
 - nová periodická funkcia
 - synchrónne vzorkovanie = OK
 - nesynchrónne vzorkovanie = skreslenie
 - Spectrum leakage – roztekание spektier
 - použitie okien na „vylepšenie“ spektra

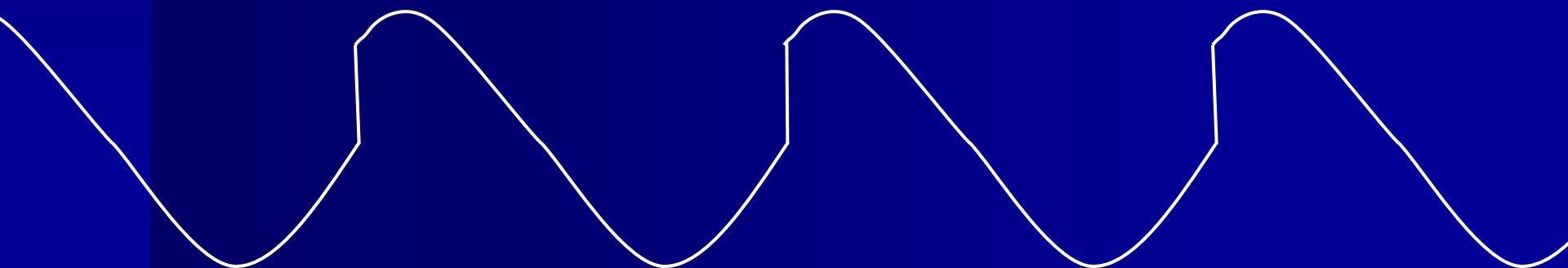


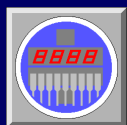
Okná pri vzorkovaní

- synchrónne vzorkovanie = OK



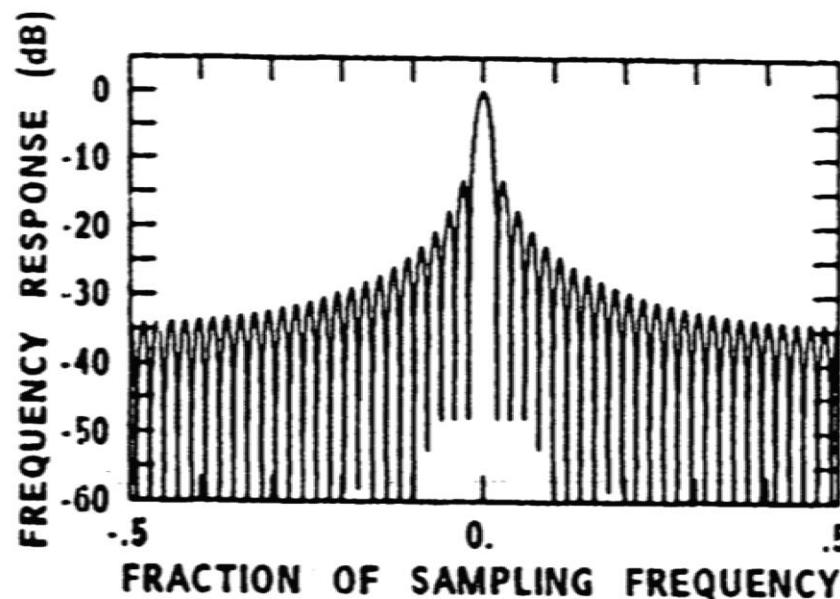
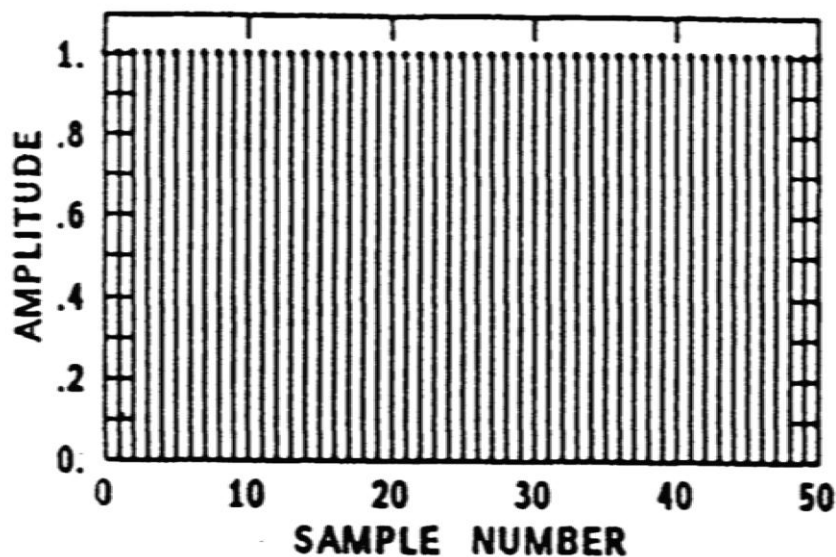
- nesynchrónne vzorkovanie = skreslenie

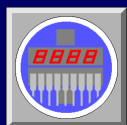




Okná pri vzorkovaní

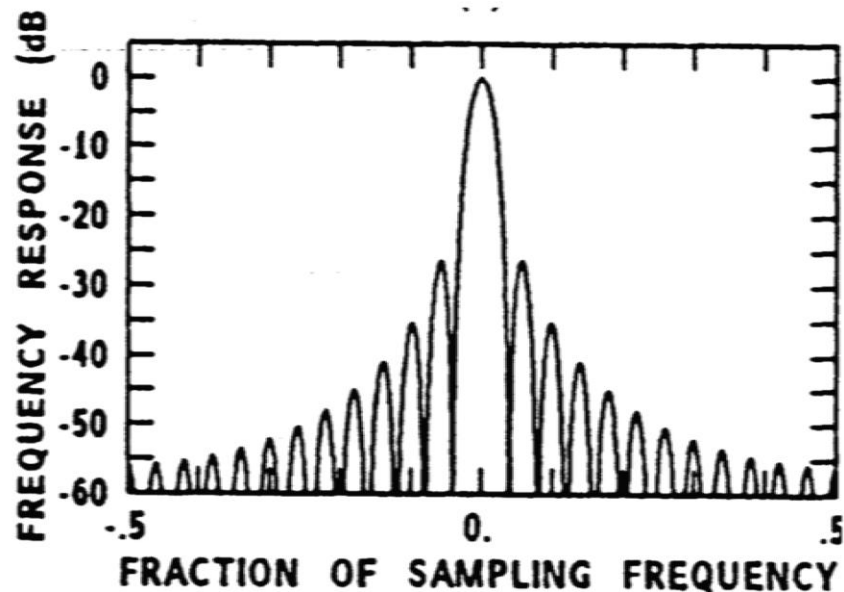
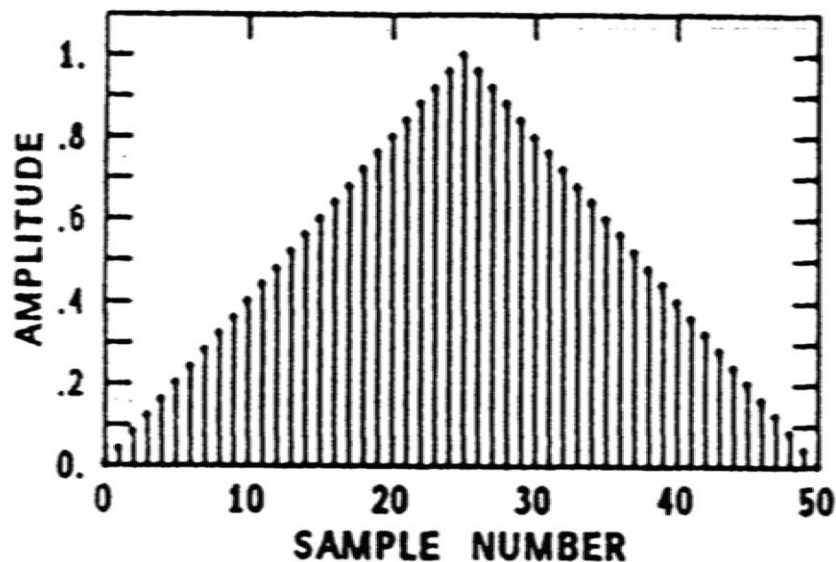
■ Pravoúhlé okno





Okná pri vzorkovaní

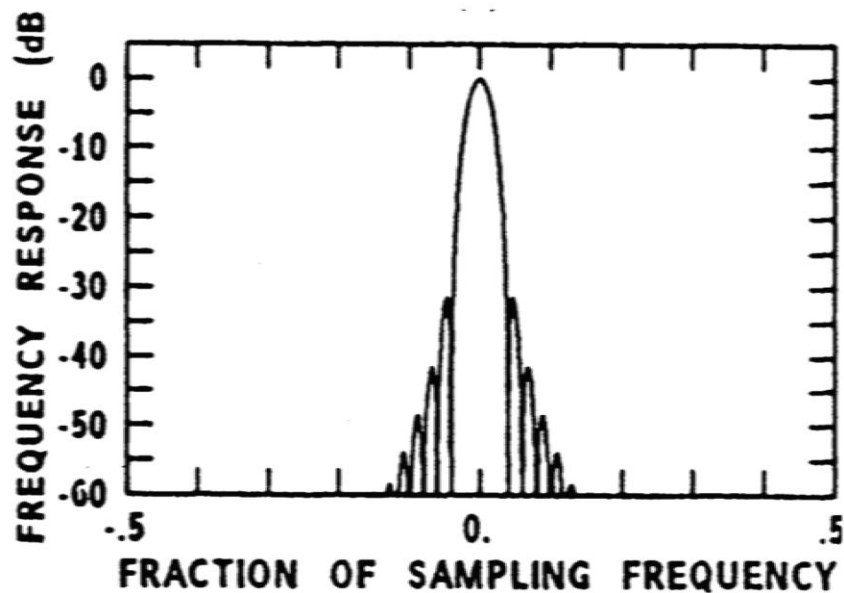
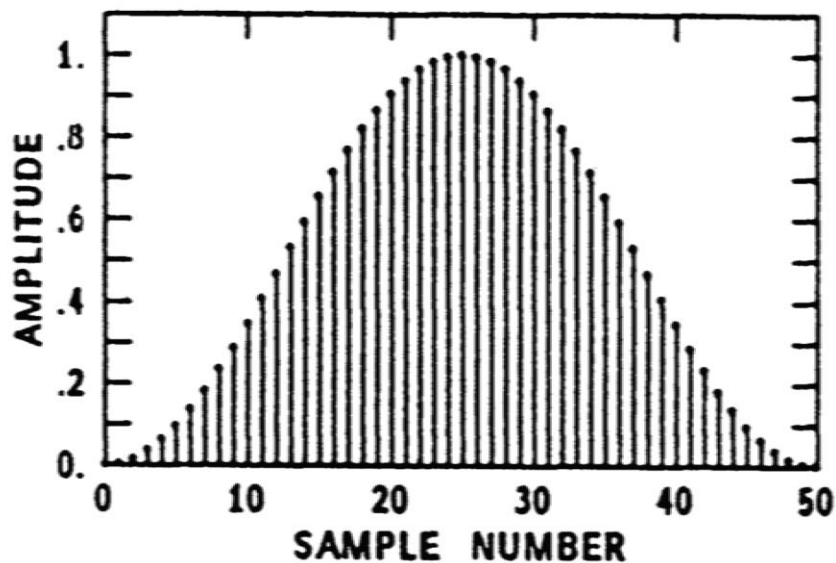
- Trojuholníkové (Bartlettovo) okno

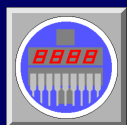




Okná pri vzorkovaní

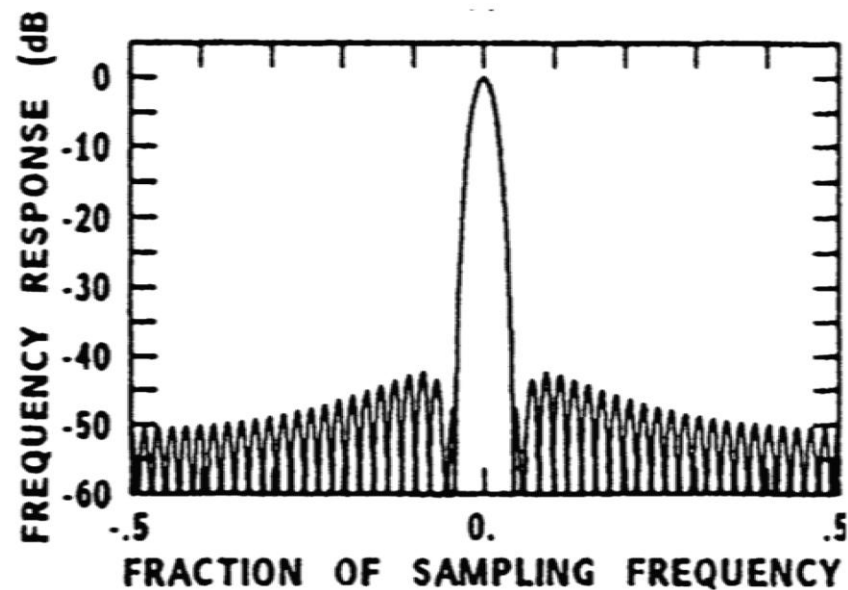
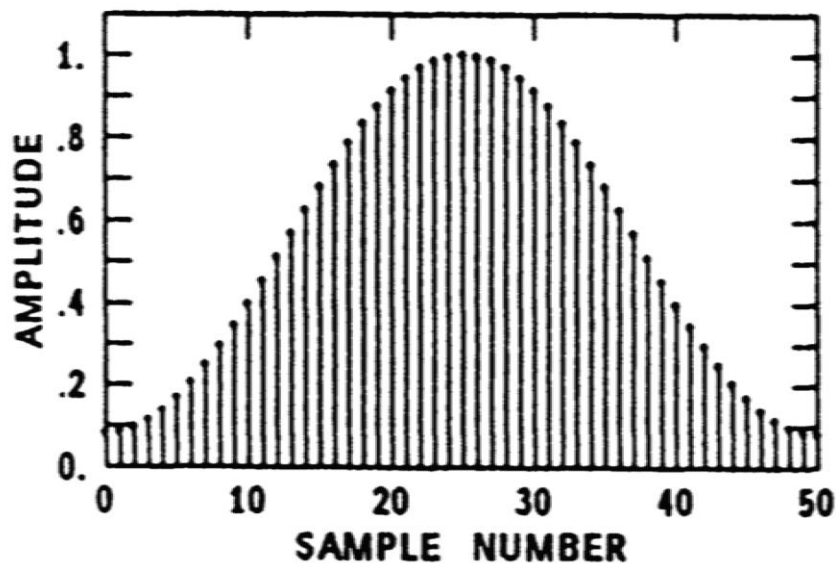
■ Hannovo okno

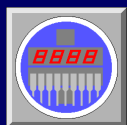




Okná pri vzorkovaní

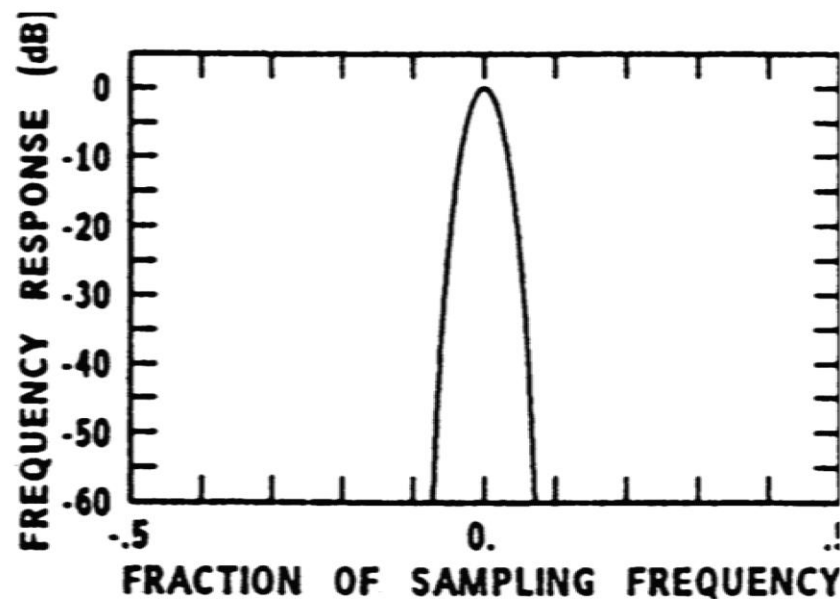
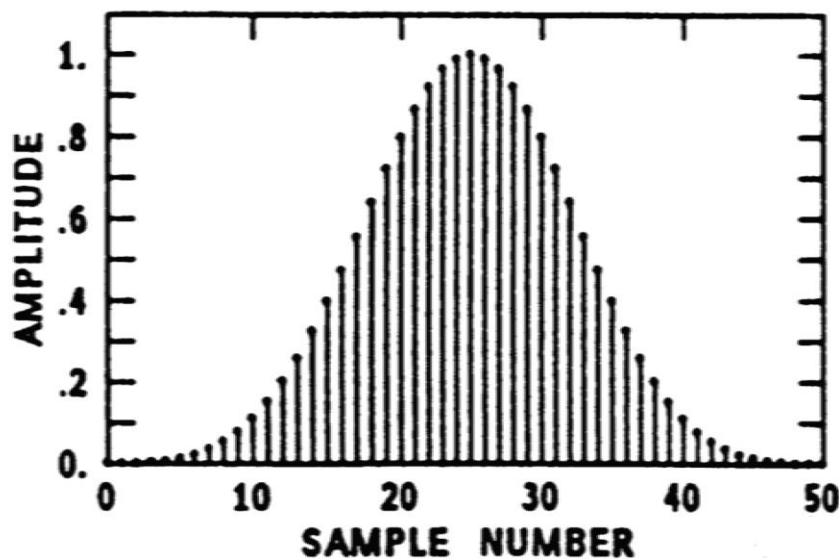
■ Hammingovo okno

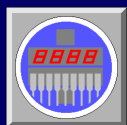




Okná pri vzorkovaní

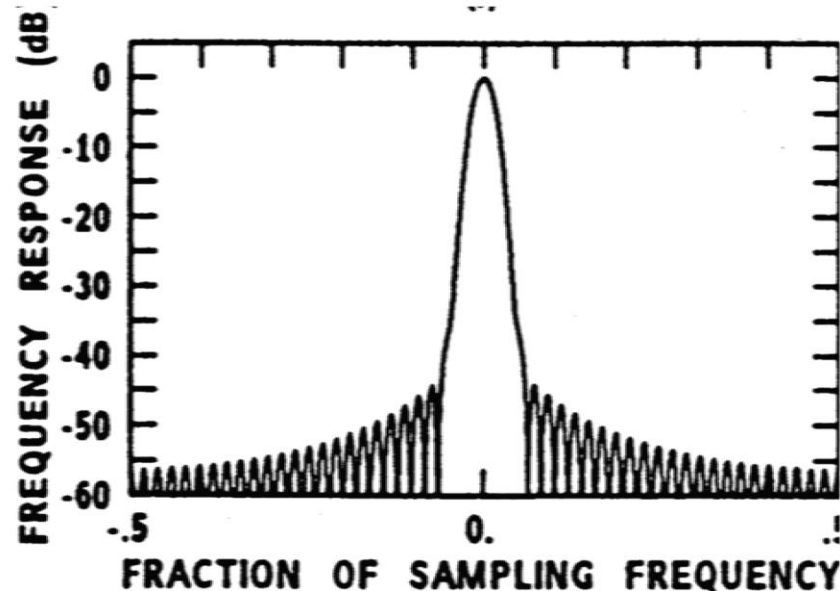
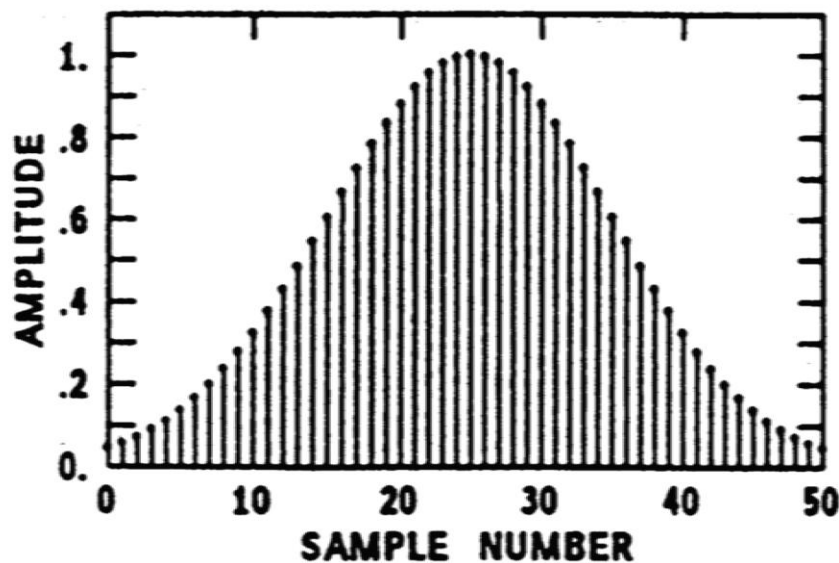
- Nutalovo okno

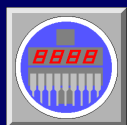




Okná pri vzorkovaní

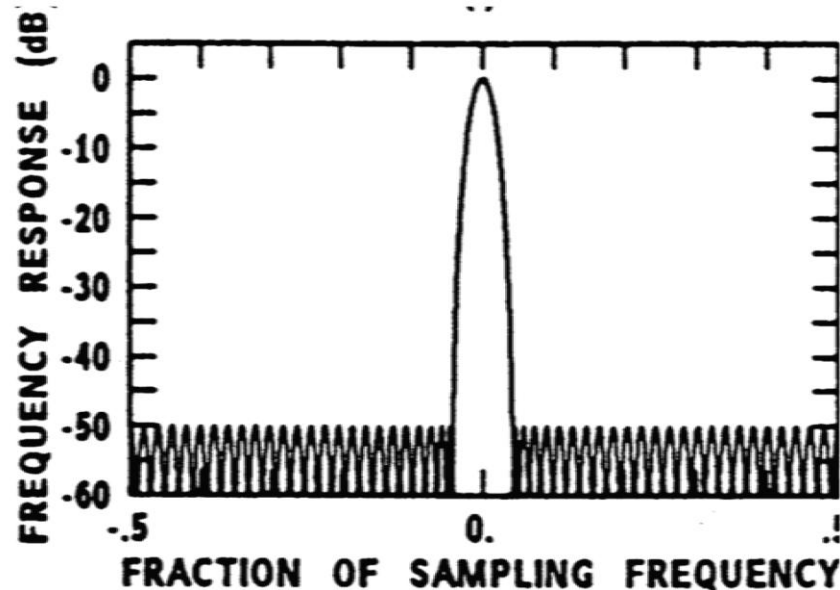
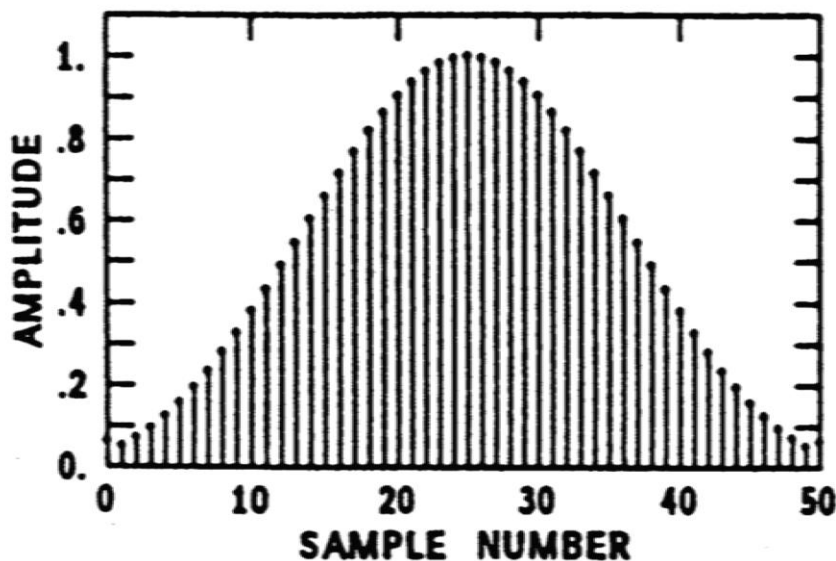
■ Gaussovo okno

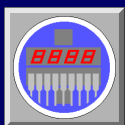




Okná pri vzorkovaní

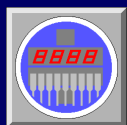
- Čebyševovo okno





Okná pri vzorkovaní

Názov okna	Úroveň najvyššieho postranného laloka	Asymptotický pokles postranných lalokov	Ekvivalentná šírka pásma
Pravouhlé	-13,3 dB	-6 dB/oktáva	1,00
Bartlettovo	-26,5 dB	-12 dB/oktáva	1,33
Hannovo	-31,5 dB	-18 dB/oktáva	1,50
Hammingovo	-43 dB	-6 dB/oktáva	1,36
Nuttalovo ($r=3$)	-98 dB	-6 dB/oktáva	1,80
Gaussovo	-42 dB	-6 dB/oktáva	1,39
Čebyševovo	-50 dB	0 dB/oktáva	1,39



Literatúra

- [1] Uhlíř, J., Sovka P.: Číslicové zpracování signálů. Vydavatelství ČVUT, Praha, 1995.
- [2] Marple, S. L., Jr.: Digital Spectral Analysis. Prentice Hall. Inc., New Jersey, 1987.
- [3] Kotuliaková, J., Rozinaj, G.: Číslicové spracovanie signálov I. Vydavateľstvo FABER, Bratislava, 1996.