

ESF II projekt Západočeské univerzity v Plzni

reg. č. CZ.02.2.69/0.0/0.0/18_056/0013239

Osciloskopy

Přednáška KET/ELM

J. Švarný



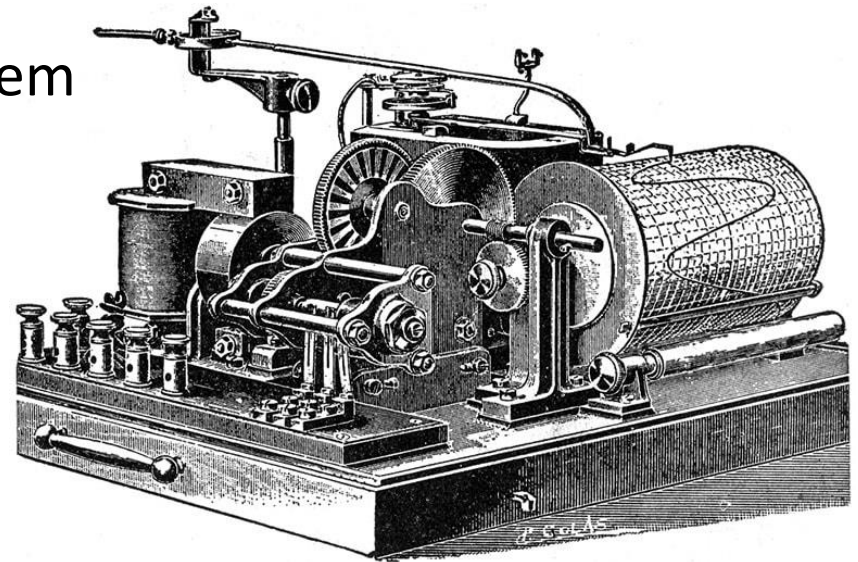
EVROPSKÁ UNIE
Evropské strukturální a investiční fondy
Operační program Výzkum, vývoj a vzdělávání

MŠMT
MINISTERSTVO ŠKOLSTVÍ
MLÁDEŽE A TĚLOVÝCHOVY

Osciloskopy

Obsah

- Analogový osciloskop-vlastnosti
- Obrazovka analogového osciloskopu
- Blokové uspořádání analogového osciloskopu
- Analogový osciloskop-ovládací prvky
- Digitální osciloskop-vlastnosti
- Digitalizace signálu osciloskopem
- Digitální osciloskop typu DSO
- Digitální osciloskop typu DPO
- Digitální osciloskop typu DSA
- Osciloskopické sondy
- Literatura



Hospitalierův "Ondograf" z r. 1902

(https://commons.wikimedia.org/wiki/File:Hospitalier_Ondograph.png)

Analogový osciloskop

Vlastnosti a parametry

Počet kanálů – určuje počet zobrazitelných průběhů

Frekvenční rozsah-pokles o 3 dB

Vstupní napěťové rozsahy
(většinou: 1 mV/d až 5 V/d)

Vstupní impedance
(typ. hodnota: 1 M Ω || 25 pF)

Přesnost zesílení vertikálního kanálu (chyba 3 až 5 %)

Přesnost časové zákl (ch. 3 až 5 %)

Další parametry a vlastnosti
(počet časových základů, režim X-Y, vstup Z, zdroje synchronizace)



Jednokanálový osciloskop AO610



Dvoukanálový osc. OS5100, EZ Digital

Analogový osciloskop

Obrazovka analogového osciloskopu

CRT-Cathode Ray Tube (Braunsche Röhre)

Elektronka převádějící energii elektronového svazku na světelné záření

1897 Karl Ferdinand Braun

Optický indikátor AC proudů – první obrazovka



K. F. Braun (1850-1918)

(https://upload.wikimedia.org/wikipedia/commons/5/55/Ferdinand_Braun.jpg)



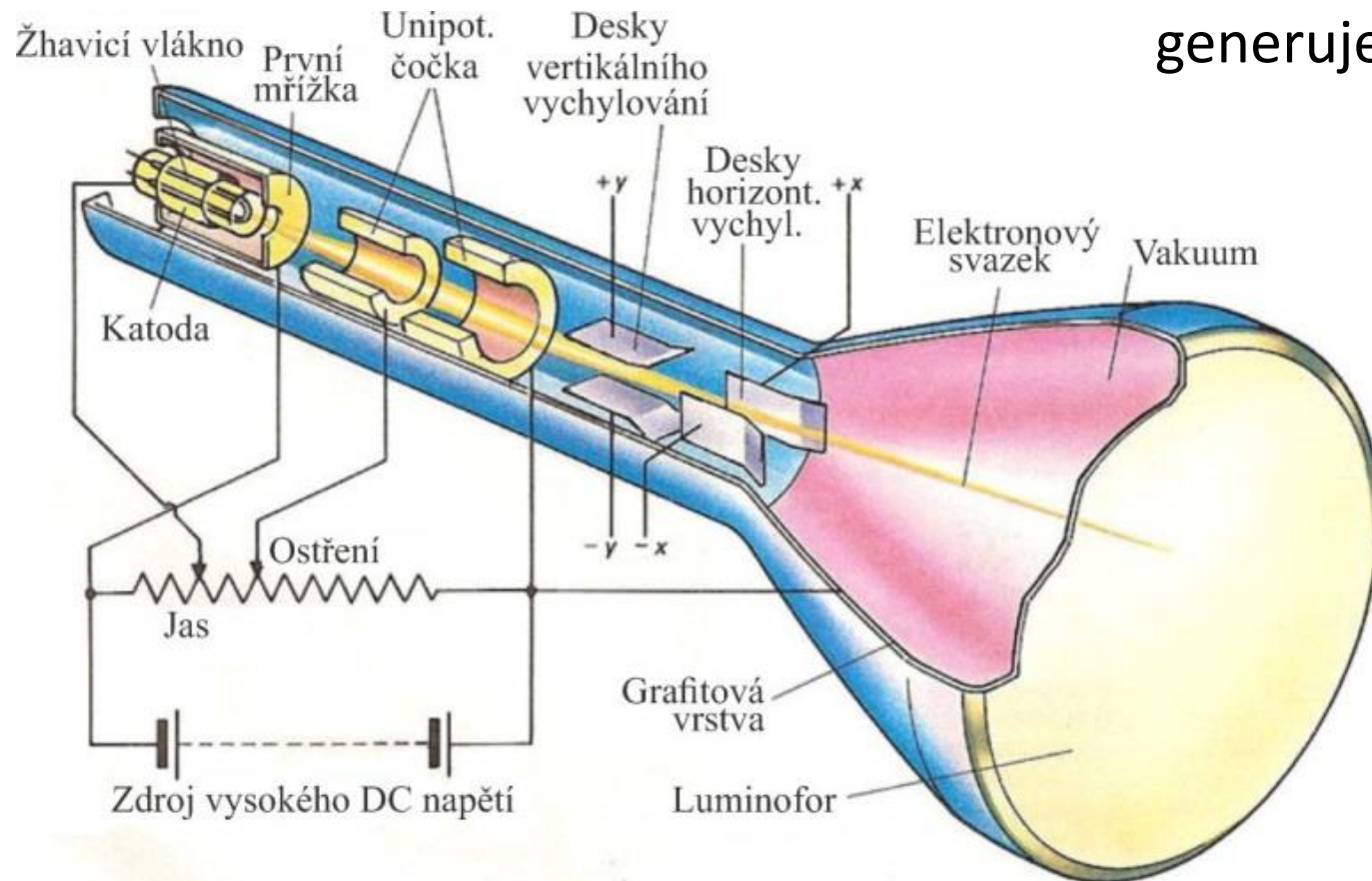
Braunsche Röhre

(převzato z: <https://www.crtsite.com/oscilloscope-crt.html>)

Analogový osciloskop

Obrazovka analogového osciloskopu

- **Elektronová tryska**-generuje a zaostřuje svazek elektronů
- **Vychylovací systém**-elektrostatické vychylování
- **Stínítko s luminoforem**-absorbuje kinetickou energii elektronů a generuje fotony



Analogový osciloskop

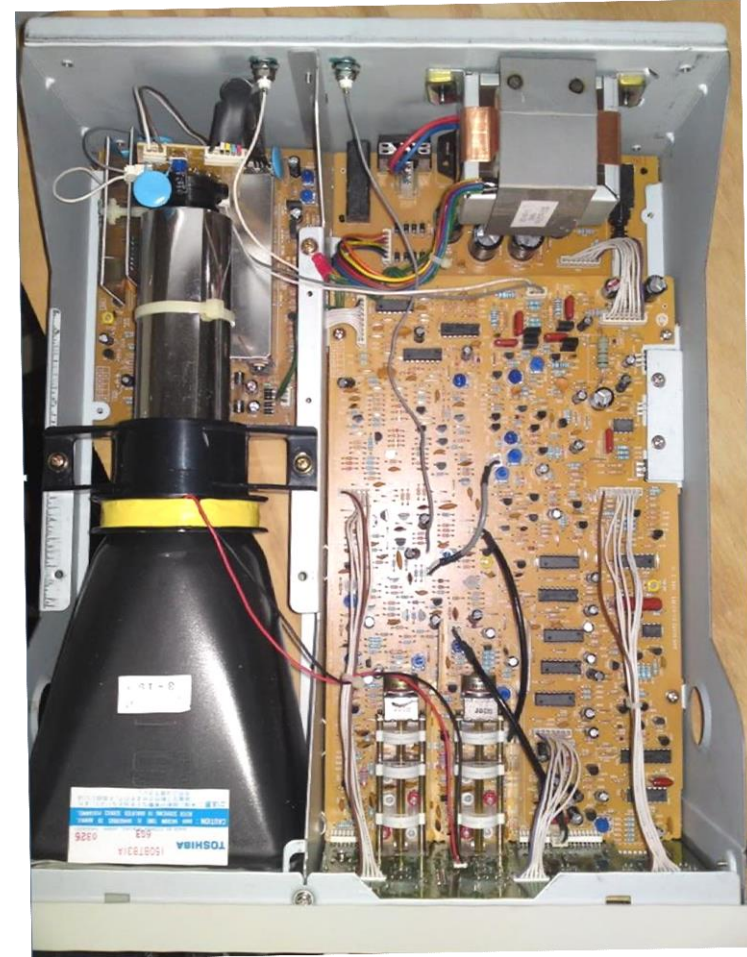
Obrazovka analogového osciloskopu



*Oscilopická obrazovka DG16-1 Philips, 1936
(převzato z: <https://www.crtsite.com/oscilloscope-crt.html>)*



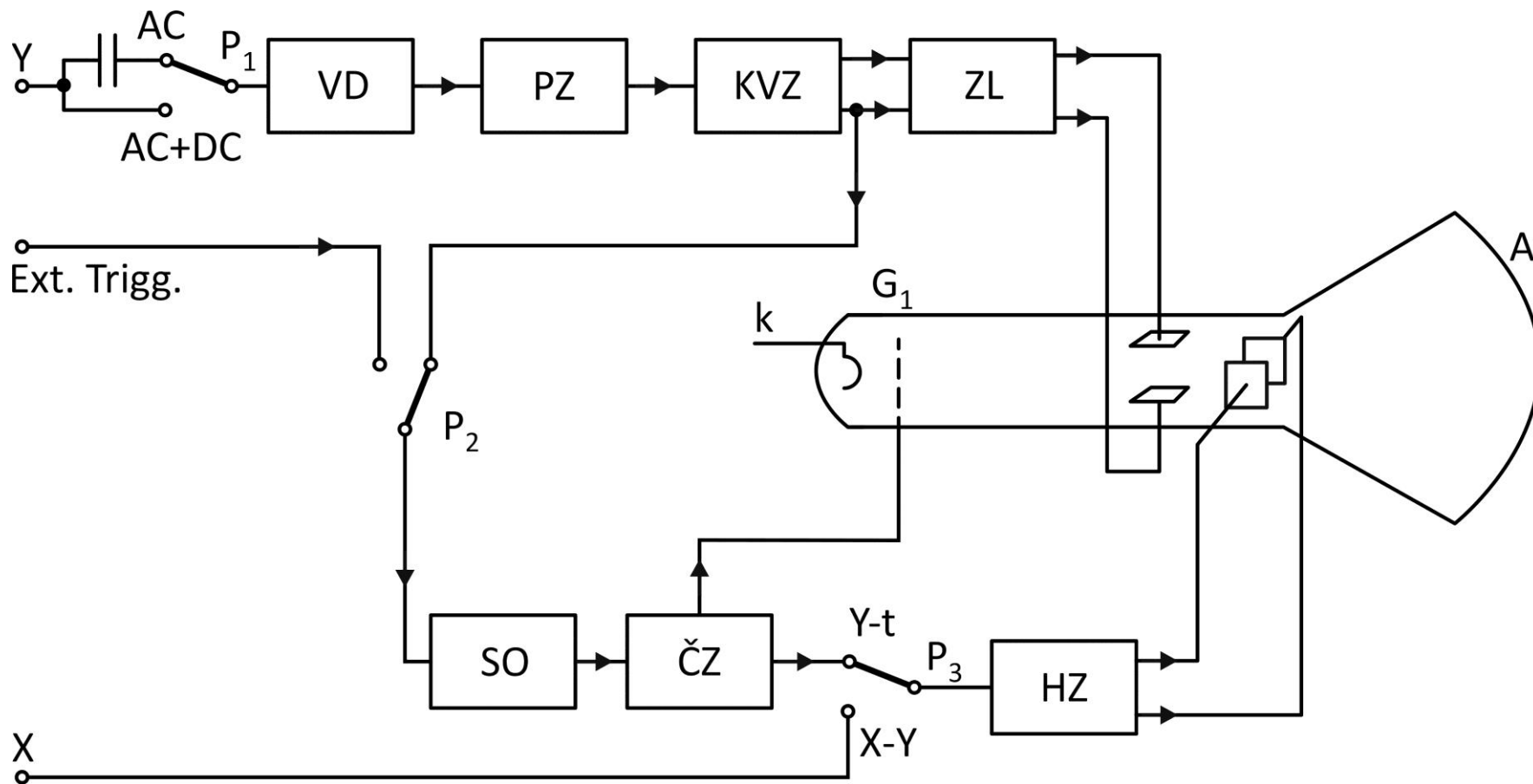
*Obrazovka Tektronix 154-0850-01, osciloskop
Tek2445B (převzato z: <https://www.crtsite.com/oscilloscope-crt.html>)*



*Rozměry analogového
osciloskopu jsou do značné míry
určeny délkou obrazovky*

Analogový osciloskop

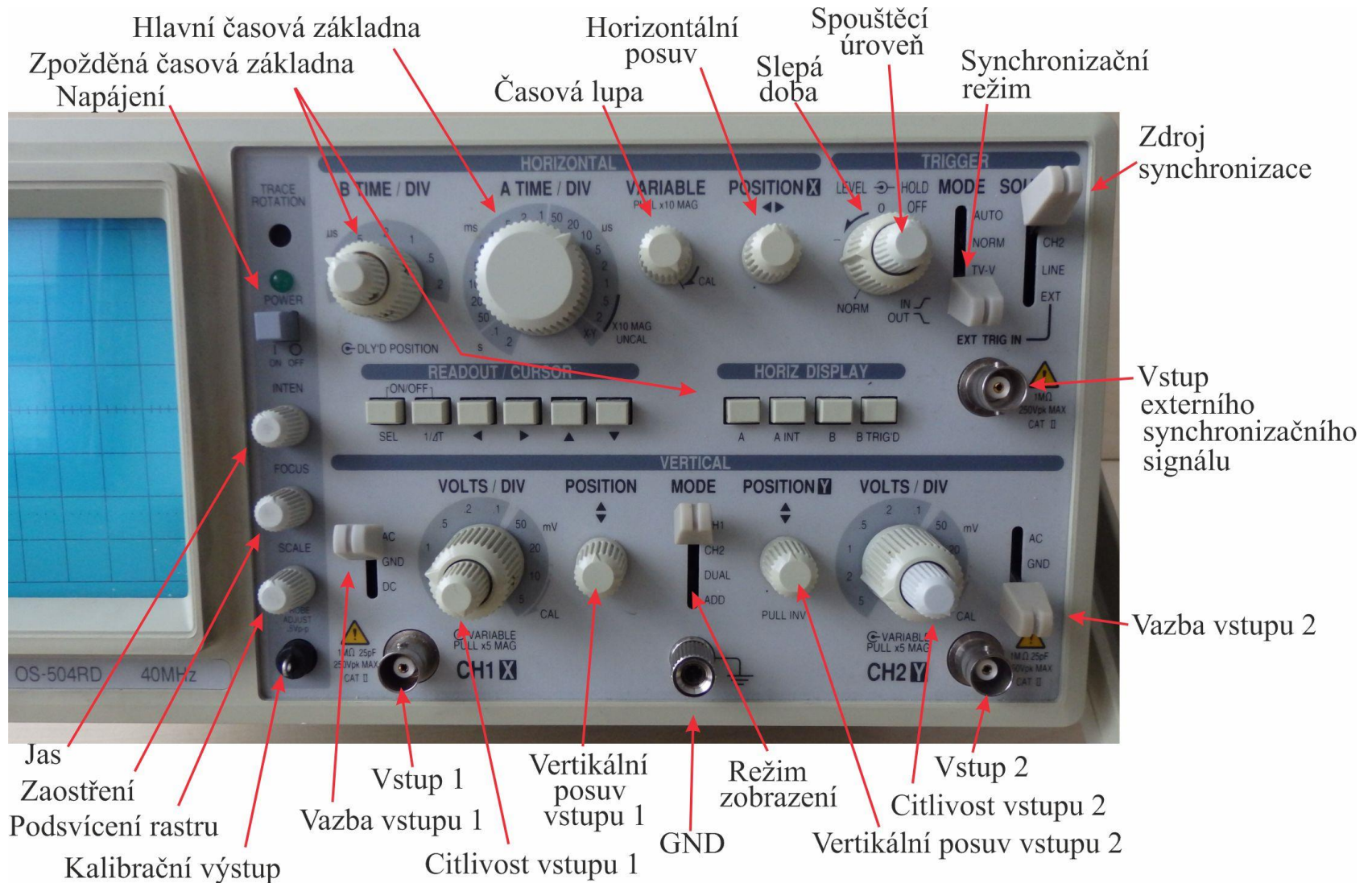
Blokové uspořádání



VD-vstupní dělič, VZ-vertikální zesilovač, PZ-předzesilovač, KVZ-koncový vertikální zesilovač, ZL-zpoždovací linka, SO-spouštěcí obvod, ČZ-časová základna, HZ-horizontální zesilovač

Analogový osciloskop

Ovládací prvky



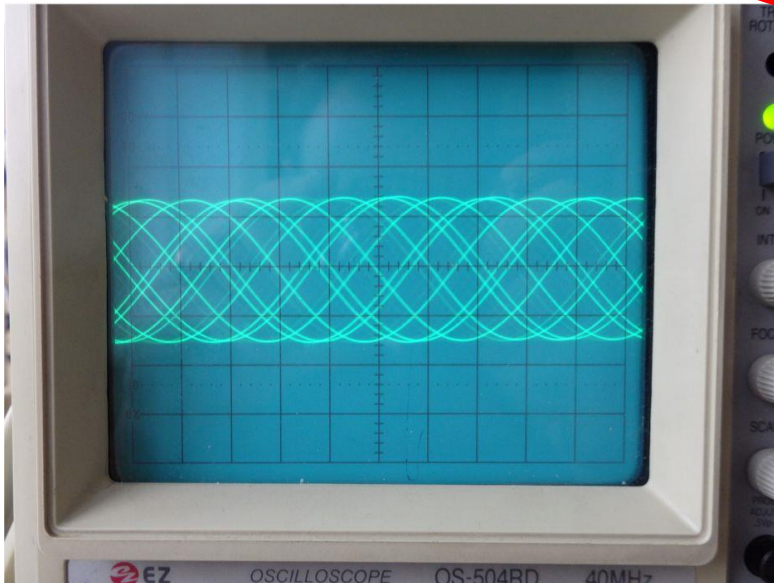
Čelní panel osciloskopu OS-504RD, EZ

Analogový osciloskop

Synchronizace a spouštění

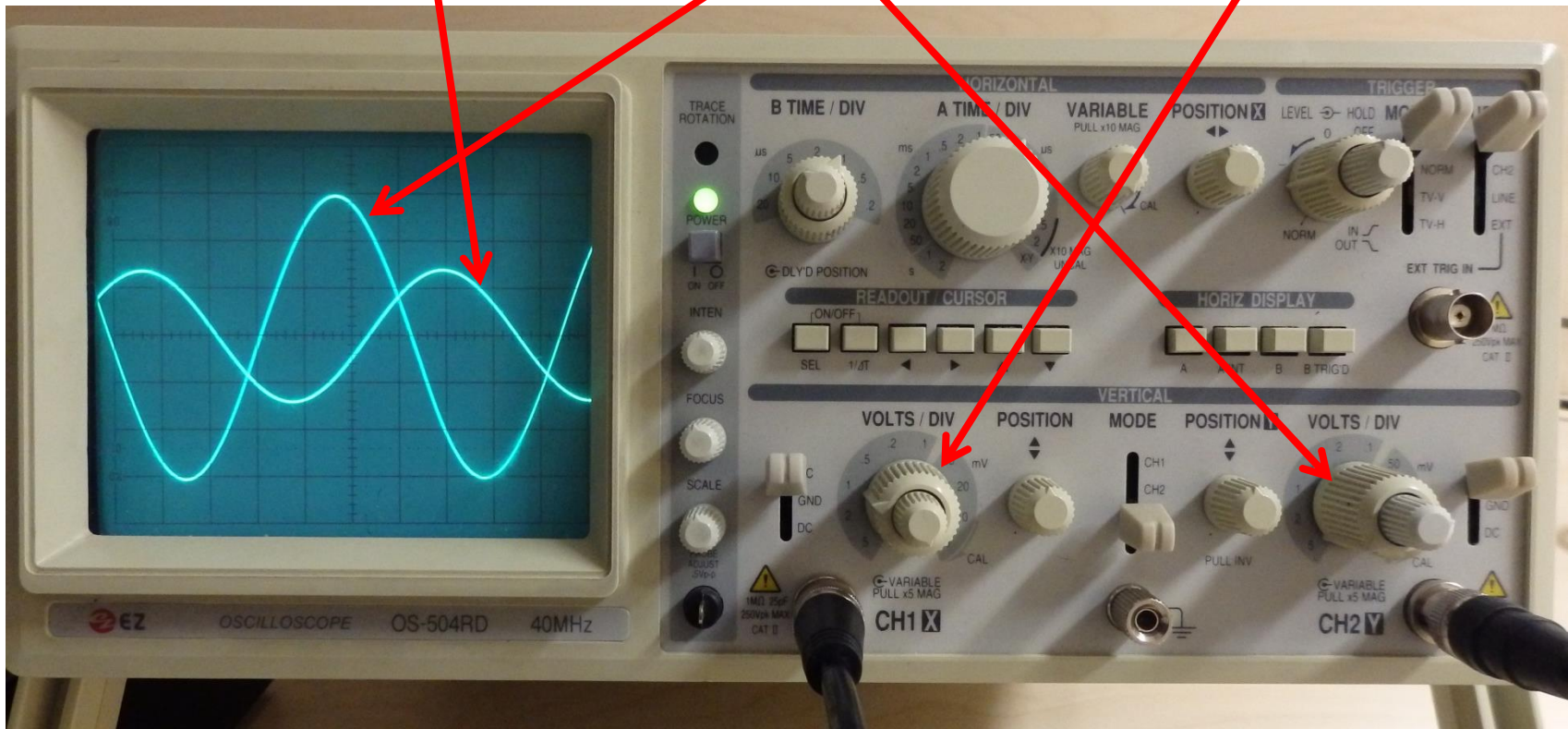
Chod časové základny je nutné synchronizovat s měřeným signálem. Nastavení je třeba hledat v bloku TRIGGER. Je třeba správně volit:

- 1) Zdroj synchronizace
- 2) Režim spouštění
- 2) Spouštěcí úroveň

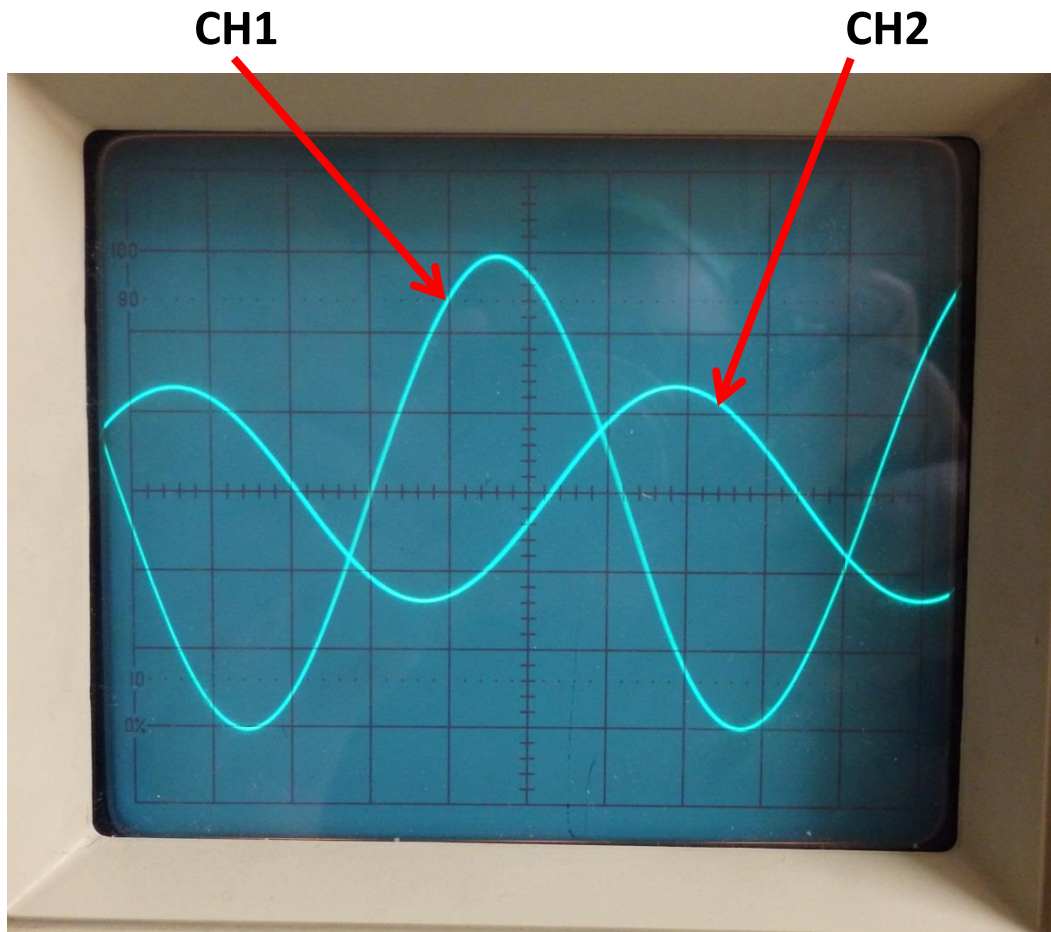


Analogový osciloskop

Příklad: Určete amplitudu, frekvenci a fázový posuv průběhů zobrazených osciloskopem. Citlivost vst. CH1 je $C_{CH1} = 1 \text{ V/div}$, citlivost vstupu CH2 je $C_{CH2} = 5 \text{ V/div}$. Rychlost rozmítání časové základny je $TB = 20 \mu\text{s/div}$.



Analogový osciloskop



$$\varphi = \frac{D_t}{D_T} \cdot 360 = \frac{2,3}{6,3} \cdot 360 \cong \underline{136^\circ}$$

$$U_{m1} = \frac{D_{pp1} \cdot C_{CH1}}{2} =$$
$$= \frac{6 \cdot 1}{2} = \underline{3 \text{ V}}$$

$$U_{m2} = \frac{D_{pp2} \cdot C_{CH2}}{2} =$$
$$= \frac{2,8 \cdot 5}{2} = \underline{7 \text{ V}}$$

$$T = D_T \cdot TB =$$
$$= 6,3 \cdot 20 = \underline{126 \mu\text{s}}$$

$$f = \frac{1}{T} = \frac{1}{126 \cdot 10^{-6}} \cong$$
$$\cong \underline{7,94 \text{ kHz}}$$

Digitální osciloskop

Vlastnosti a parametry

Počet kanálů - obvykle 2 nebo 4

Šířka pásma - až ≈ 10 GHz)

Rychlost vzorkování - až ≈ 1 GSa/s reál., až ≈ 100 GSa/s v ekviv. čase)

Způsob vzorkování – dle typu osc.

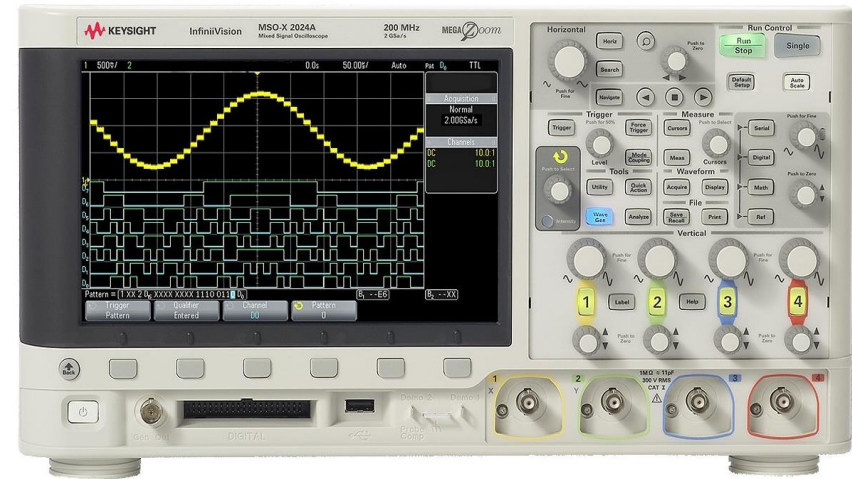
Hloubka paměti - ≈ 1 MSa/kanál

Rozlišení vertikální osy – dle ADC, obvykle 8-11 bitů

Přesnost vertikál. osy – do 1 %

Přesnost horizont. osy – do 0,1 %

Vstupní impedance - typická hodnota: $1\text{ M}\Omega \parallel 10\text{-}15\text{ pF}$



MSOX2014A (Keysight)

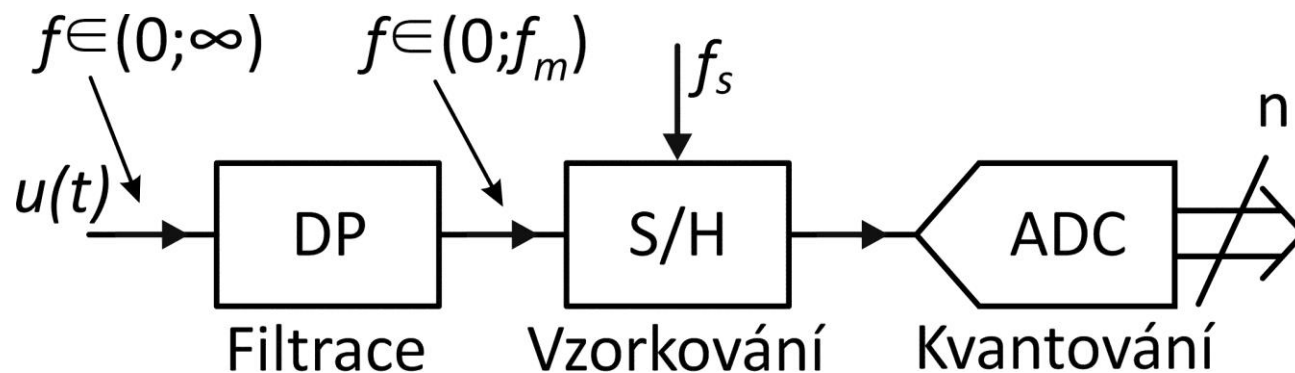
Další parametry a funkce - (X-Y režim, pretriggering, různé způsoby synchronizace, filtrace, FFT, LA, matematické operace, zobrazení parametrů, ukládání/přenos dat, dálkové ovládání, různá rozhraní RS232/USB/GPIB...)

Digitální osciloskop

Digitalizace signálu osciloskopem

Převedení spojitého signálu na posloupnost ekvidistantních číselných hodnot nesoucích informaci o okamžité hodnotě signálu.

- **Filtrace**- omezení šířky pásma digitalizovaného signálu shora (nezbytné pro splnění tzv. vzorkovacího teorému)
- **Vzorkování**-diskretizace spojitého signálu
- **Kvantování**-přiřazení číselných hodnot daným úrovním vzorků



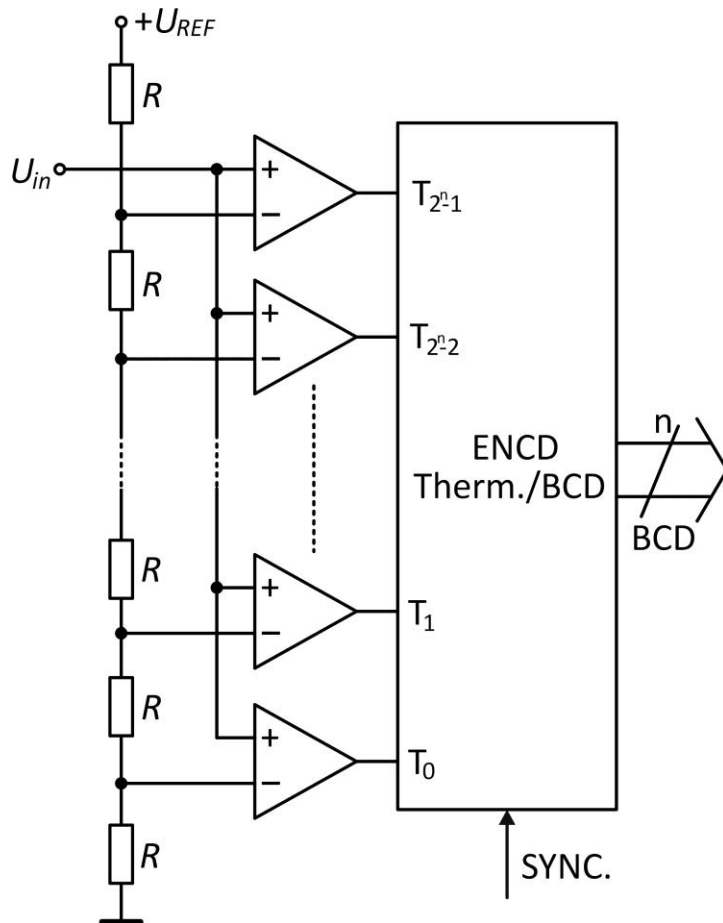
Digitální osciloskop

Digitalizace, kvantování

Osciloskop kvantuje paralelním převodníkem (**Flash converter**)

Pro n -bitů výstupního kódu je třeba $2^n - 1$ komparátorů !

Výstup komparátorů – “teploměřový kód“, nutno překódovat na BCD



Thermometer Code							Binary Code			Dec.
T6	T5	T4	T3	T2	T1	T0	B2	B1	B0	D
0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0
0	0	0	0	0	0	1	0	0	1	1
0	0	0	0	0	1	1	0	1	0	2
0	0	0	0	1	1	1	0	1	1	3
0	0	0	1	1	1	1	1	0	0	4
0	0	1	1	1	1	1	1	0	1	5
0	1	1	1	1	1	1	1	1	0	6
1	1	1	1	1	1	1	1	1	1	7

Thermometer/BDC code ($n=3$)

Digitální osciloskop

Digitalizace, vzorkování

Vzorkovací teorém

Nyquistovo-Shannonovo kritérium

$$f_s \geq 2f_m$$

f_s ...vzorkovací kmitočet

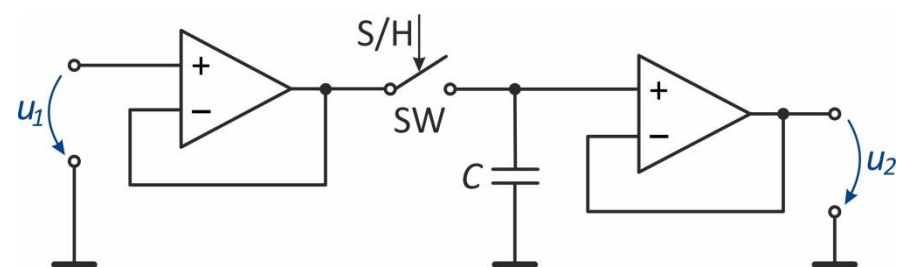
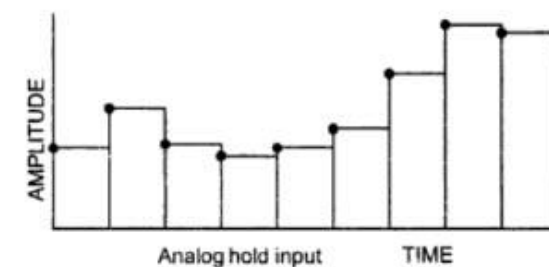
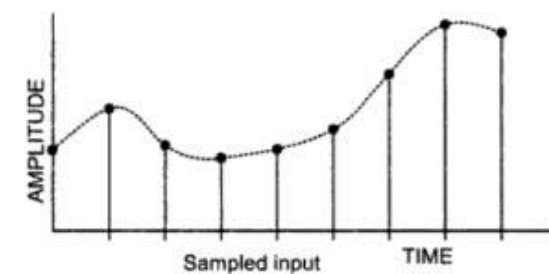
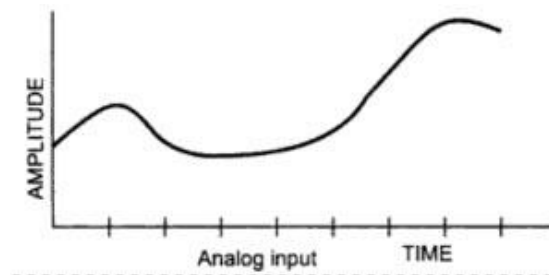
f_m ...maximální kmitočet spektra



Harry Nyquist
(1889-1976)



Claude Shannon
(1916-2001)



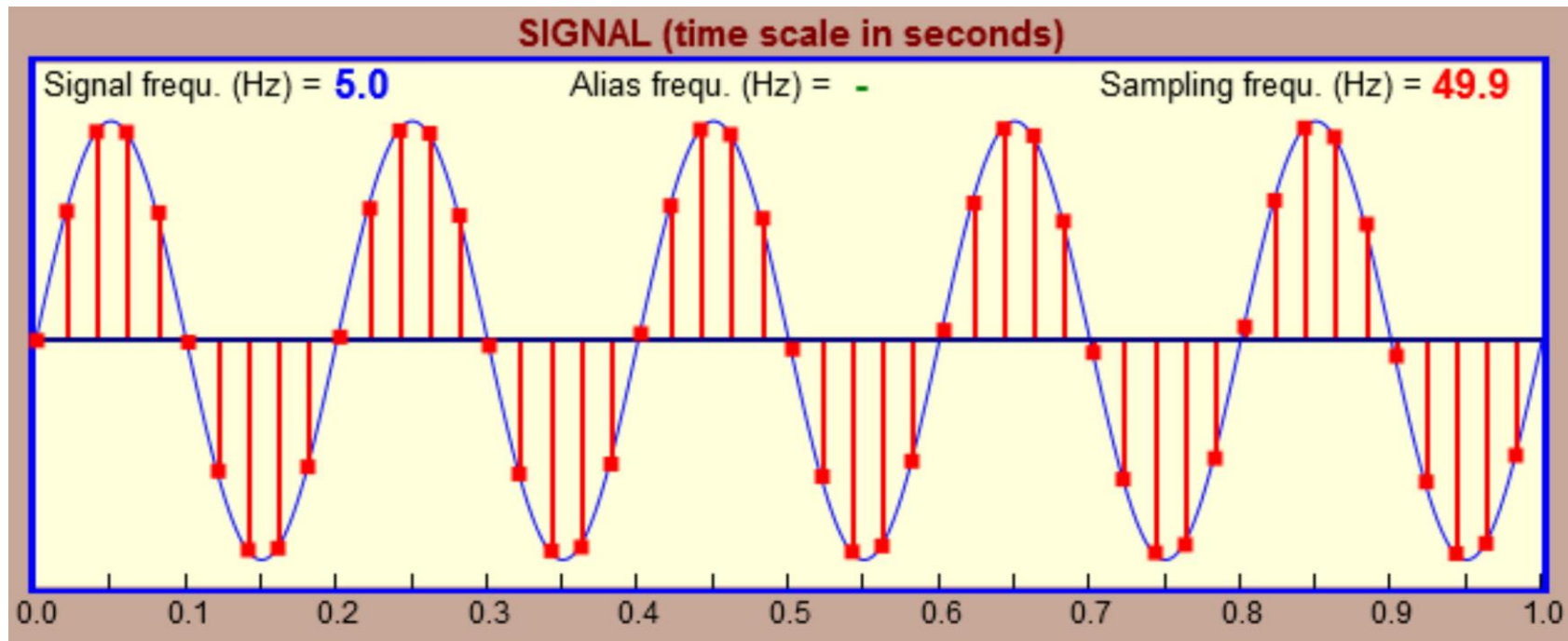
Vzorkovací obvod – princip

Pozn.: v osciloskopu – diodové vzorkovací můstky, viz dále

Digitální osciloskop

Digitalizace, vzorkování

Příklad: Vzorkování sinusového průběhu o frekvenci 5 Hz vzorkovací frekvencí 50 Hz.



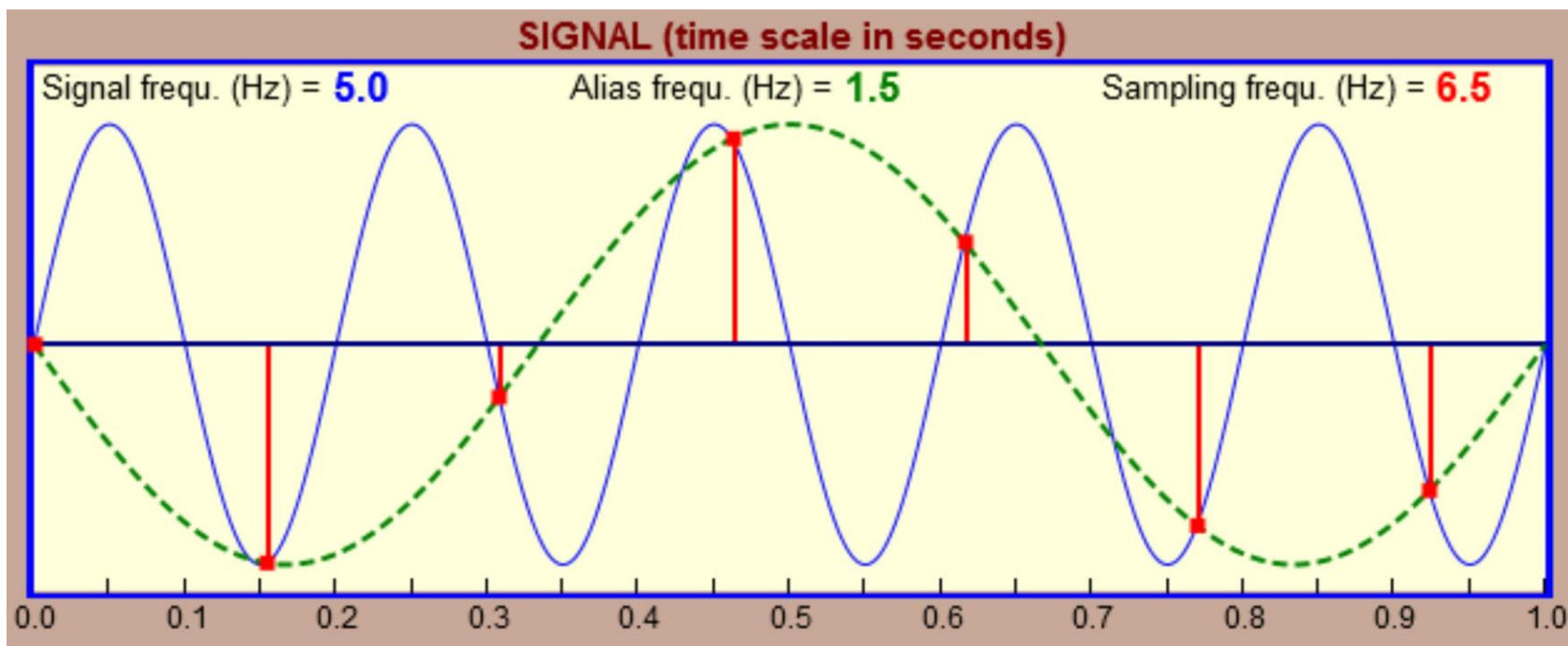
Správně navzorkovaný signál (upraveno z: http://195.134.76.37/applets/Applet_Index2.htm)

Při rekonstrukci navzorkovaného signálu obdržíme obraz, který odpovídá vstupu vzorkovacího obvodu (vzorkovací teorém byl dodržen).

Digitální osciloskop

Digitalizace, vzorkování

Příklad: Vzorkování sinusového průběhu o frekvenci 5 Hz vzorkovací frekvencí 6,5 Hz.



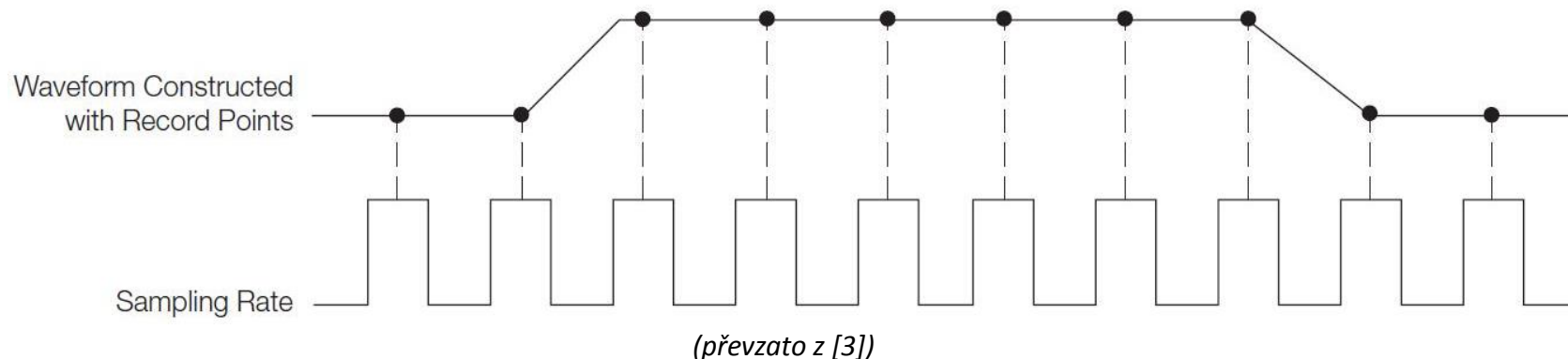
Nesprávně navzorkovaný signál (upraveno z: http://195.134.76.37/applets/Applet_Index2.htm)

Při rekonstrukci navzorkovaného signálu obdržíme falešný obraz (vzorkovací teorém nebyl dodržen – vzniká tzv. **aliasing efekt**). Aliasing je nutné vyloučit omezením spektra vzorkovaného signálu.

Digitální osciloskop

Digitalizace, vzorkování v reálném čase

(Real time sampling mode)



Vzorkování a A/D převod jednotlivých vzorků musí probíhat tak rychle, aby byl splněn vzorkovací teorém.

Vlastnosti:

- Extrémní nároky na rychlost A/D převodu

- Reálně dosažitelná rychlost ≈ 1 GSa/s max. (Flash ADC)
- Pro záznam signálů s mezním kmitočtem cca 1 GHz
- Umožňuje tzv. pretriggering
- Jediný způsob vzorkování neperiodických dějů

Digitální osciloskop

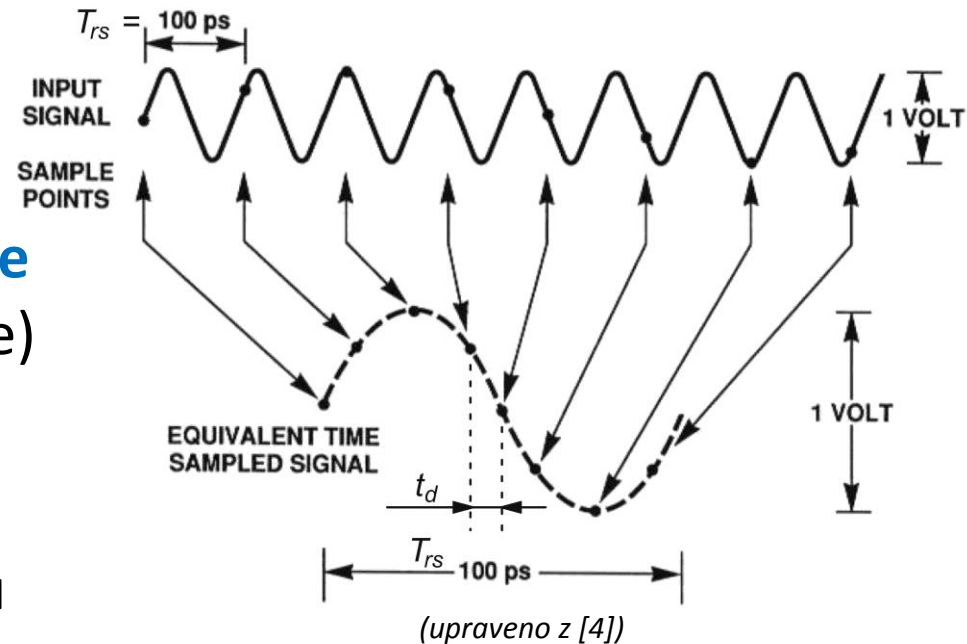
Digitalizace, ekvidistantní vzorkování v ekvivalentním čase (Equivalent time sampling mode)

Vzorky jsou postupně sbírány v průběhu několika period signálu. V každé periodě signálu je odebrán jeden vzorek.

V každém vzorkovacím cyklu se počátek vzorkování zpozdí o nepatrný interval t_d . Tento posuv je konstantní.

Ekvivalentní vzork. frekvence f_{es} :

$$\left(f_{es} = \frac{1}{t_d}\right) \gg \left(f_{rs} = \frac{1}{T_{rs}}\right)$$



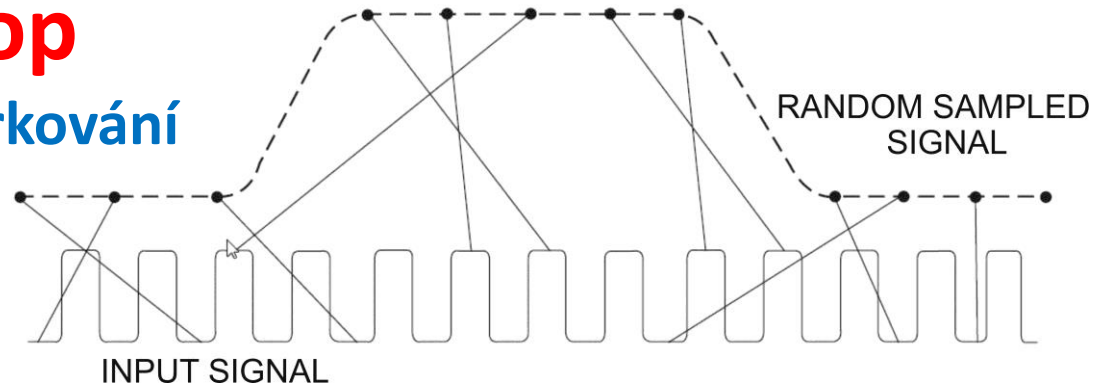
Vlastnosti:

- Nižší nároky na rychlost ADC než u reálného vzorkování
- Ekvivalentní rychlost vzorkování 10 až 100 GSa/s
- Pro signály až do ≈ 100 GHz
- Jen pro periodické děje
- Náročné na čas

Digitální osciloskop

Digitalizace, náhodné vzorkování v ekvivalentním čase

(Random sampling mode)



Vzorky jsou postupně sbírány v průběhu několika period signálu. Počátek vzorkování se vždy zpozdí o interval t_d . Délka intervalu t_d je určována generátorem náhodných čísel.

Opět platí:

$$f_{se} \gg f_{sr}$$

f_{se} ...ekvivalentní vzork. frekv.

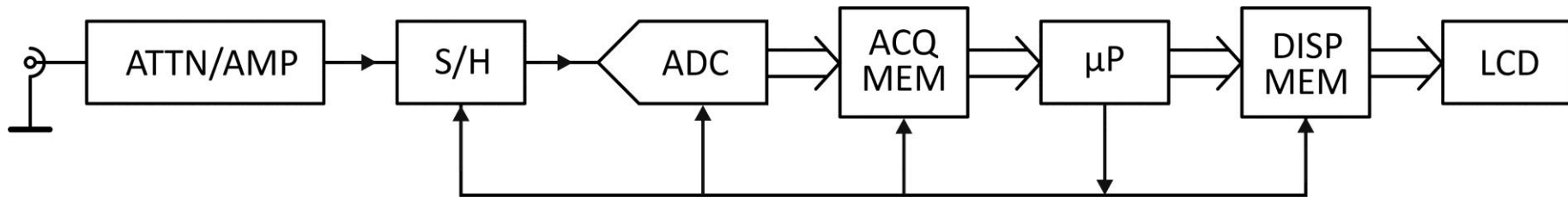
f_{sr} ...reálná vzork. frekvence

Vlastnosti:

- Nižší nároky na rychlost ADC než u reálného vzorkování
- Ekvivalentní rychlost vzorkování 10 až 100 GSa/s
- Pro signály až do ≈ 100 GHz
- Jen pro periodické děje
- Náročné na čas
- Méně přesné než ekvidistantní vzorkování

Digitální osciloskop

DSO (Digital Storage Oscilloscope)



ATTN/AMP-atenuátor/zesilovač, S/H-vzorkovací obvod, ADC-A/D převodník, ACQ MEM-paměť dat, μ P-mikropočítač, DISP MEM paměť displeje, LCD-displej

Zjednodušené blokové uspořádání DSO s jedním vstupem

Pro více vstupů - dvě varianty:

- Každý vstup má samostatný ATTN/AMP - S/H blok. Kanály jsou multiplexovány na vstup jednoho ADC
- Každý vstup je řešen samostatným řetězcem ATTN/AMP, S/H, ADC.

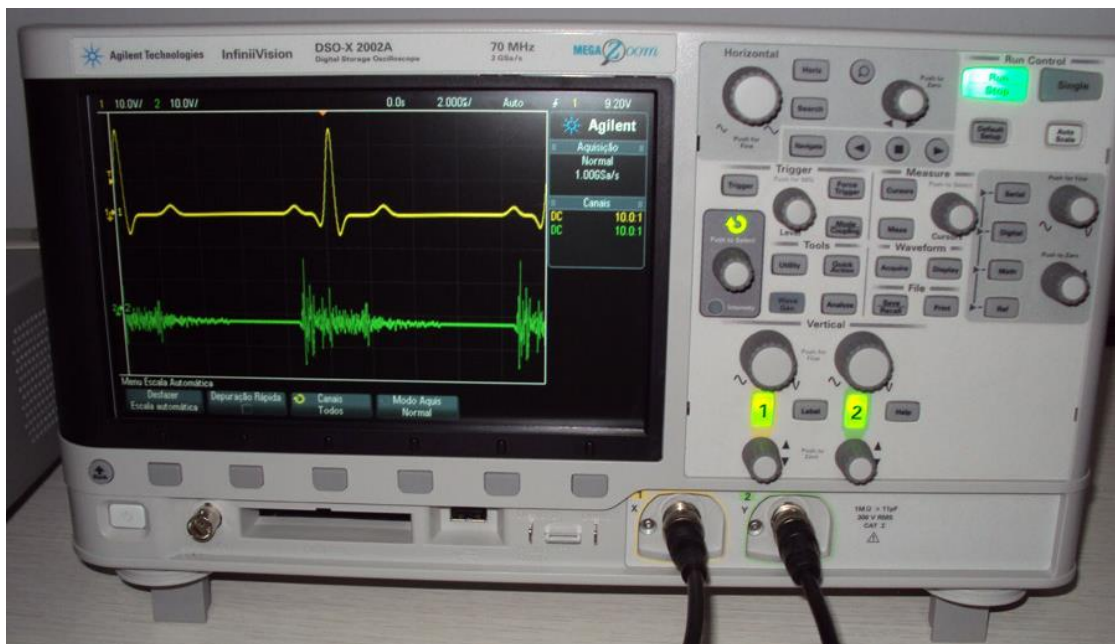
Vlastnosti:

- Ekonomická varianta osc.
- Sériové zpracování informace (nahrát-zpracovat-zobrazit) dlouhá slepá doba
- Vzorkování – v reálném čase
- Vhodné pro sledování periodických i neperiod. dějů

Digitální osciloskop

DSO (Digital Storage Oscilloscope)

Příklad: DSOX-2002A, Keysight



Osciloskop DSO-X-2002A (Keysight)

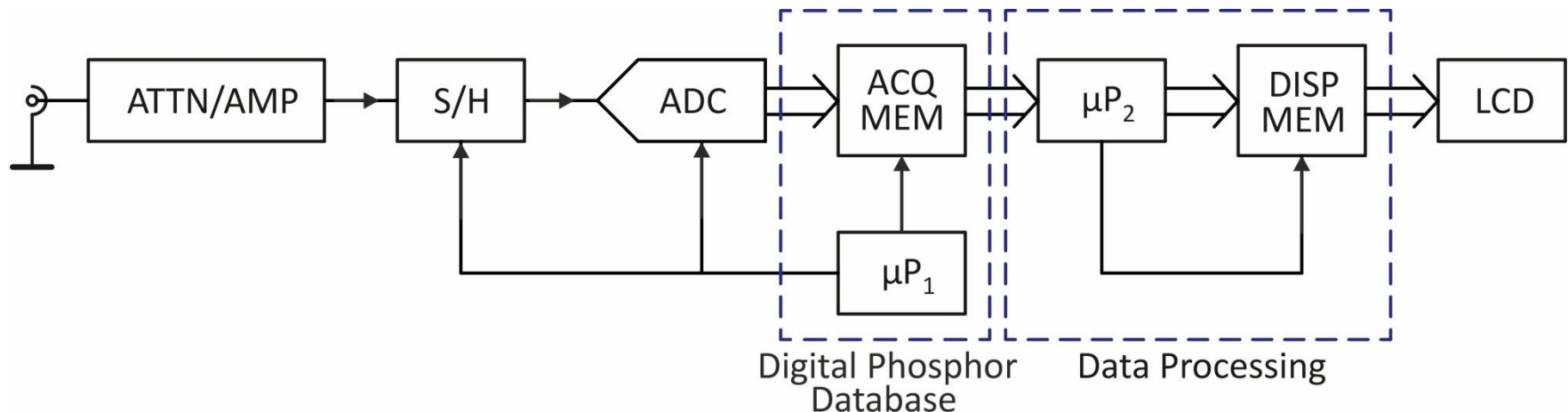
(Převzato z: <http://www.php.com.br/engenharia/item/91-osciloscopio-agilent-dso-x-2002a-70mhz-2gsa-s.html>)

Vlastnosti:

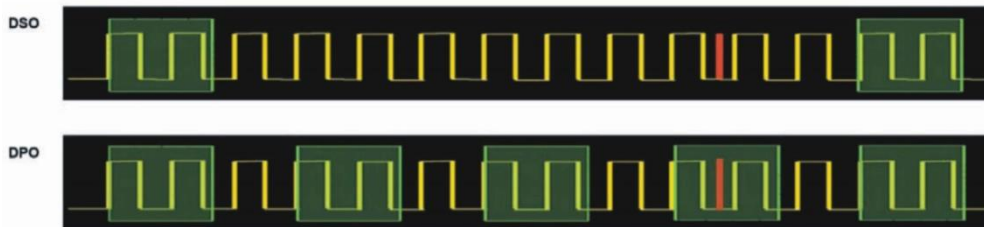
- 2 vstupy (imp. 1 M Ω || 11 pF)
- 70/100/200 MHz BW
- 1 MSa/kanál
- 2 GSa/s max.
- Disp. 8,5 palce
- 8 bit vert. rozlišení
- 1 mV/div až 5 V/div
- Analyzátor: CAN, LIN, I2C, SPI...
- USB komunikace
- Vnitřní generátor a čítač (opt.)

Digitální osciloskop

DPO (Digital Phosphor Oscilloscope)



Zjednodušené blokové uspořádání DPO s jedním vstupem



DSO a DPO - délka tzv. slepé doby

- Imitace hloubky obrazu zvýrazněním četnosti výskytu opakovaných dějů (jako u analogového osc.)
- Vzorkování – v reálném čase nebo v ekvivalentním čase
- Pro periodické i neperiod. děje

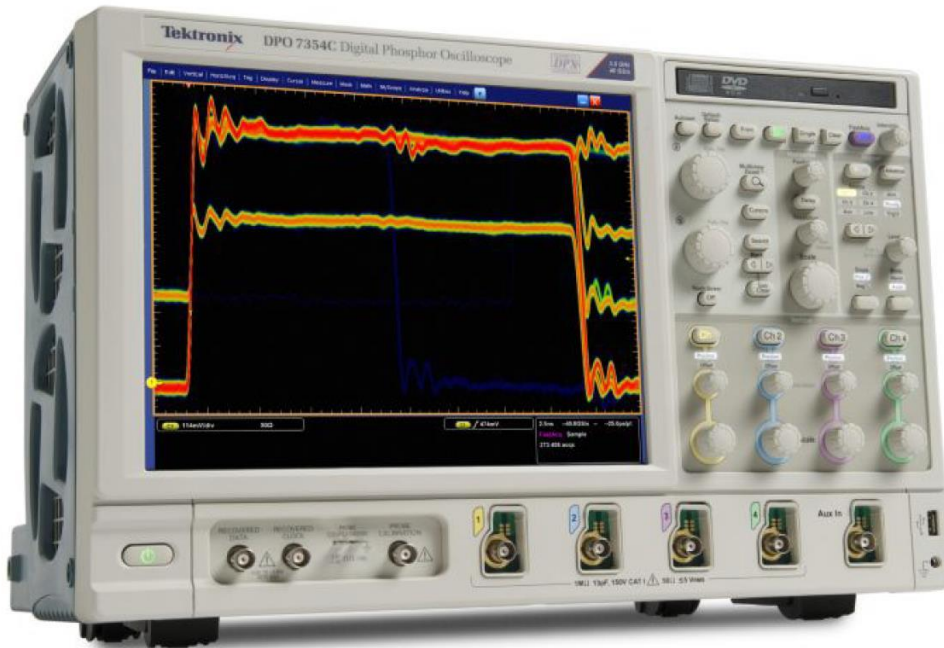
Vlastnosti:

- Lepší varianta dig. osciloskopu
- Sběr a zpracování informace probíhá paralelně

Digitální osciloskop

DPO (Digital Phosphor Oscilloscope)

Příklad: DPO7354C, Tektronix



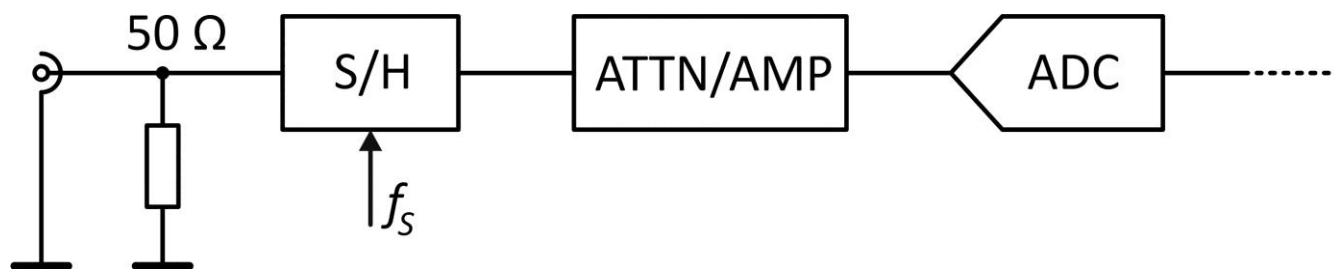
(Převzato z [6])

Vlastnosti:

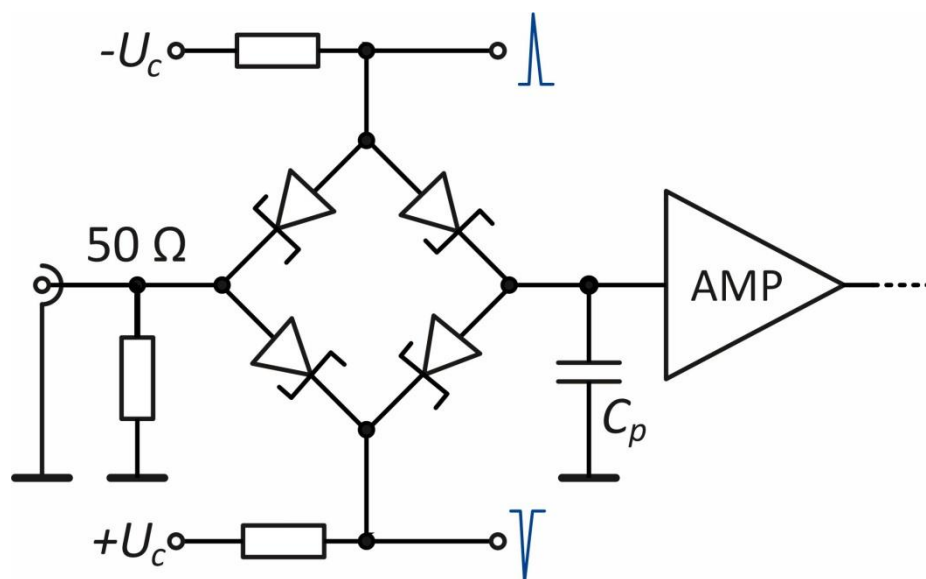
- 4 vstupy
(1 M Ω || 13 pF) nebo 50 Ω
- 2,5 GHz BW
- 40/20/10 GSa/s (1, 2, 3-4 ch)
- až 500 MSa
- >250000 wfms/s
- 1mV/div až 10 V/div (1 M Ω)
- 1mV/div až 1 V/div (50 Ω)
- Rozlišení: 11 bit vert.
- Display: 12,1 palce
- Analyzátor: CAN, LIN, I2C, SPI...

Digitální osciloskop

DSA (Digital Sampling Oscilloscope)



Zjednodušené blokové schéma vstupní části DSA osciloskopu



Diodový vzorkovač DSA osciloskopu

Vlastnosti:

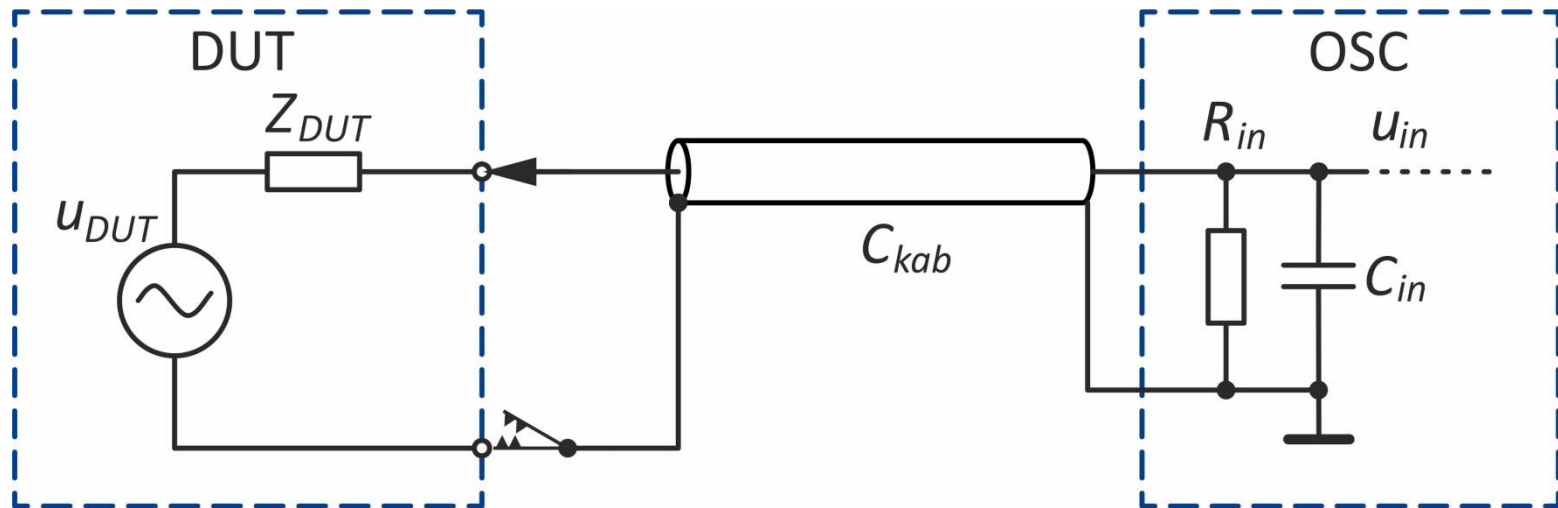
- Pro signály o velmi vysokých kmitočtech (až ≈ 100 GHz)
- Pouze pro periodické děje
- Vzorkování – v ekviv. čase
- Vstupní impedance 50Ω
- Malá dynamika vstupu (typ. 1 mV až 1 V)
- Nízká napěťová odolnost vstupu (typ. 3 V_{pp})

Osciloskopické sondy

Význam: Přivedení signálu na vstup osc. s minimálním zkreslením

Pasivní sonda 1:1

Pouze coax. kabel + měřicí hrot



Typické hodnoty:

$$R_{in} = 1 \text{ M}\Omega$$

$$C_{in} = 7 \text{ až } 30 \text{ pF}$$

$$C_{kab} = 50 \text{ pF/m (dle typu kabelu)}$$

$$Z_{DUT} (R_{DUT}) \dots ?$$

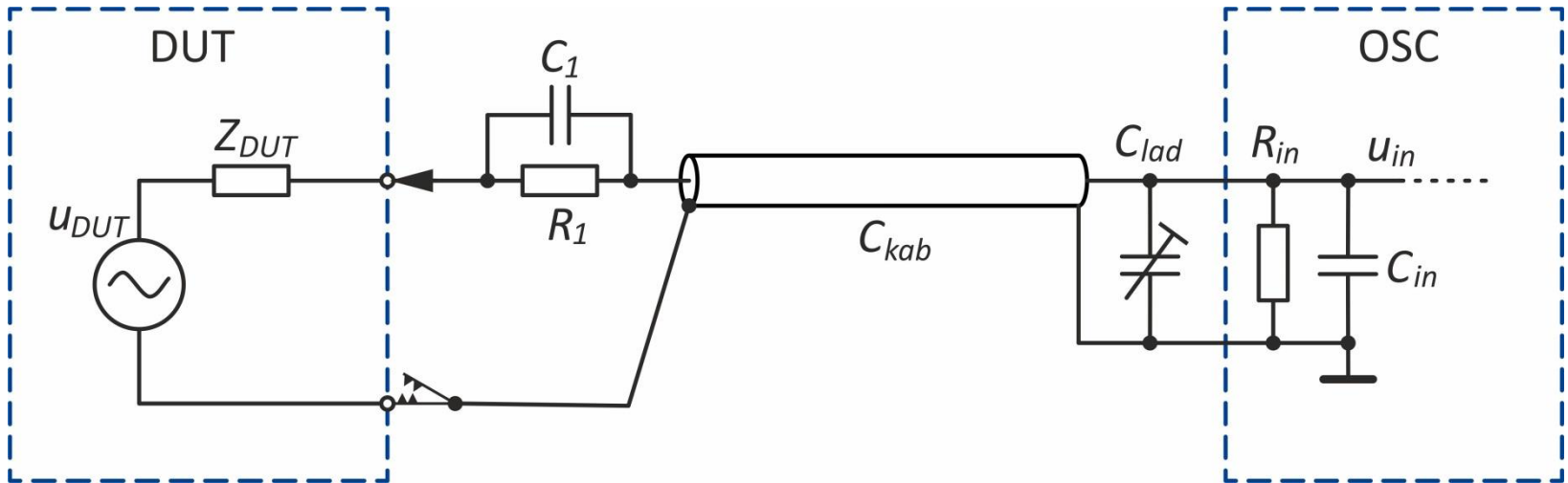
Vlastnosti:

- Velké zatížení DUT (1 M Ω || cca 100 pF)
- Frekvenční závislost
- Použitelné jen pro nf měření

Osciloskopické sondy

Pasivní vysokoimpedanční sonda 10:1

Součást standardní výbavy většiny osciloskopů



Typické hodnoty:

$$R_{in} = 1 \text{ M}\Omega$$

$$C_{in} = 7 \text{ až } 30 \text{ pF}$$

$$C_{kab} = 50 \text{ pF/m}$$

$$R_1 = 9 \cdot R_{in} = 9 \text{ M}\Omega$$

$$C_1 = C_2/9 \cong 10 \text{ pF}$$

$$(C_2 = C_{in} + C_{lad} + C_{kab})$$

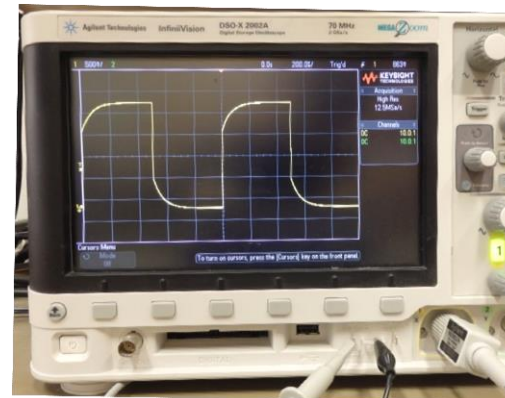
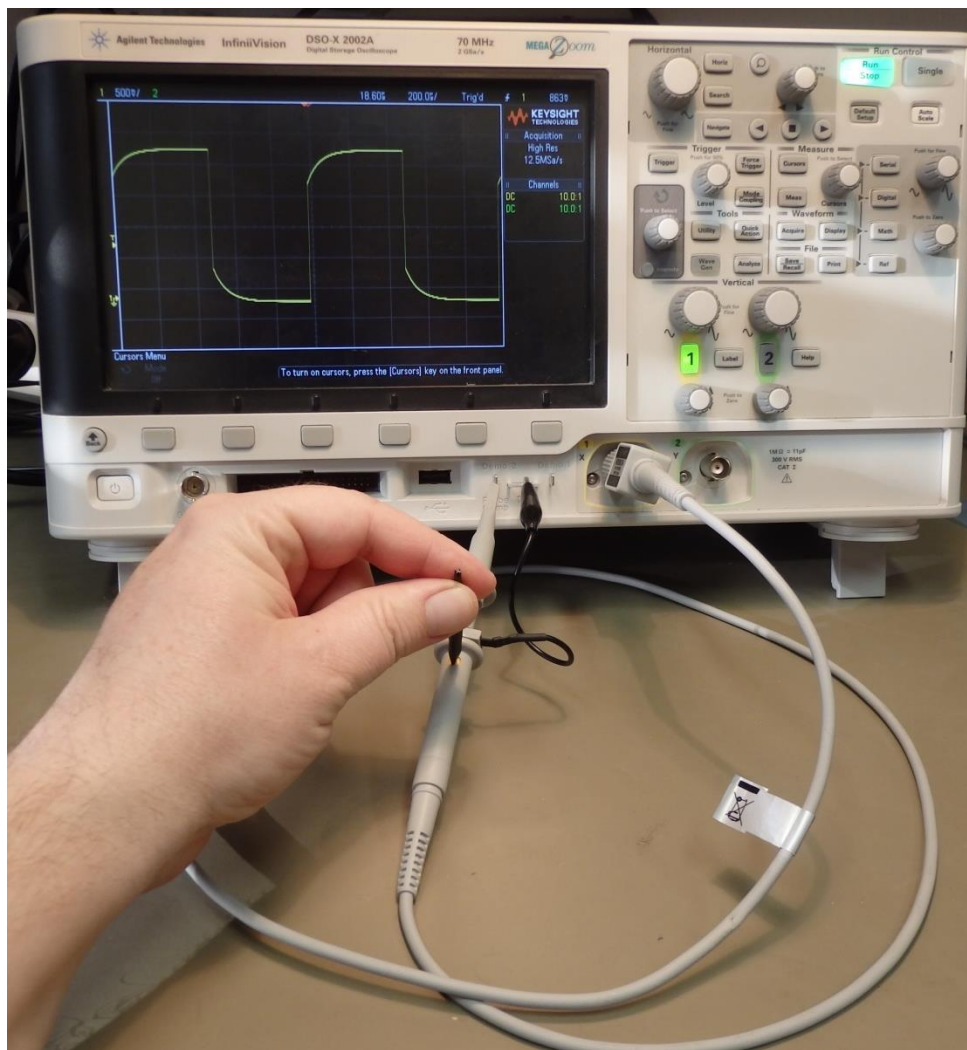
Vlastnosti:

- Snížení vstupní citlivosti 10x
- Zvýšení napěťové odolnosti vstupu
- Snížení vst. kapacity (menší zatížení DUT)
- Použitelné do cca ≈ 100 MHz
- Frekvenční nezávislost dělicího poměru (při $R_1 C_1 = R_{in} C_2$)

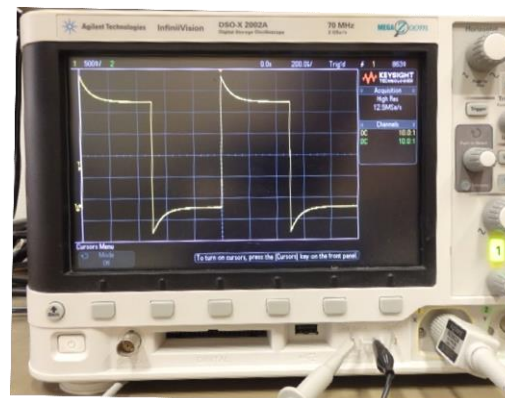
Osciloskopické sondy

Pasivní vysokoimpedanční sonda 10:1

Postup při kompenzaci sondy



Sonda nedokompenzována



Sonda překompenzována



Sonda vykompenzována

Osciloskopické sondy

Aktivní sondy

- Zesilovač v hlavici sondy, přizpůsobené vedení pro přenos signálu
- kapacitní zatížení DUT <1 pF typ.
- Měření na velmi vysokých kmitočtech (≈ 1 GHz a více)
- Měření signálů s velmi strmými hranami

Diferenciální sondy

- Rozdílový (přístrojový) zesilovač v hlavici sondy
- Měření rozdílu napětí s velkou souhlasnou složkou, až ≈ 100 V_{CM}
- Použitelné do ≈ 10 MHz

Proudové sondy

- V hlavici sondy: proudový transformátor se snímacím rezistorem na sekundární straně popř. Hallova sonda nebo kombinace obou.
- Zobrazení průběhu proudu osciloskopem
- Frekvenční rozsah silně závisí na konstrukci a provedení

Literatura

- [1] Haasz V.: Elektrická měření – přístroje a metody, ČVUT 2018.
- [2] Analog Devices: Linear Design Seminar, 1995, www.analog.com
- [3] Tektronix: XYZs of Oscilloscopes, Application Note, www.tektronix.com
- [4] Tektronix: Sampling Oscilloscope Techniques, Application Note, 47W-7209, www.tektronix.com
- [5] Keysight: InfiniiVision 2000 X-Series Oscilloscopes, Data Sheet, www.keysight.com
- [6] Tektronix: Digital Phosphor Oscilloscopes, DPO7000 Data Sheet, www.tektronix.com
- [7] Keysight: N28xxA/B Passive Probes, Data Sheet, www.keysight.com