



Sveučilište u Zagrebu
Fakultet elektrotehnike i računarstva

Osnove elektroničkih mjerenja i instrumentacije



P6 - Osciloskop

Ak.god. 2008/2009

prof.dr.sc. Zoran Stare, prof.dr.sc. Vedran Bilas

Sadržaj predavanja

- Analogni osciloskop
 - Osnovni funkcijski moduli
- Osnove mjerenja osciloskopom
 - Mjerne sonde
- Digitalni osciloskop
 - Osnove izvedbe

Osciloskop - primjena

- Osciloskop vrlo često korišten mjerni instrument
- Glavni alat za analizu električkih signala
- Primarna informacija, vizualizacija promjene amplitude signala u vremenu
- Brzi X-Y pisač (elektronska zraka katodne cijevi)
- Osciloskopi obično imaju na zaslonu katodne cijevi **raster 8** (vertikalno) x **10** (horizontalno)
- Dva pristupa izvedbi
 - analogni
 - digitalni



Analogni i digitalni osciloskop

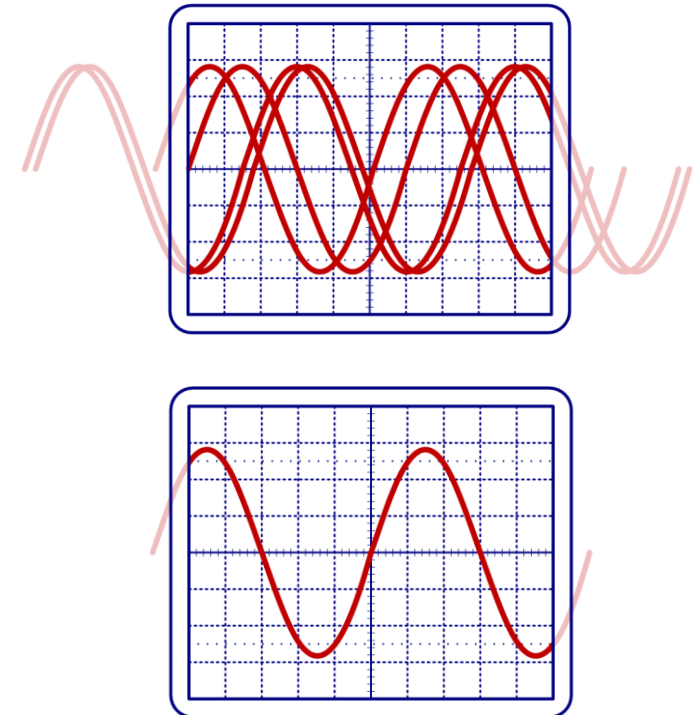
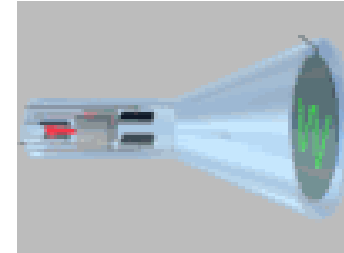
- Analogni osciloskopi još u značajnoj uporabi
 - **Prednost** - jednostavnost koncepta, izvedbe i razumijevanje slike
 - **Problemi** - pamćenje i analiza signala, ispis
 - Tipične pogreške mjerenja reda 2-3%
 - **Frekvencijsko područje** do 100 MHz (1GHz)

- Digitalni osciloskopi
 - **Kompleksniji**, podložni problemu preklapanja spektra (**aliasing**)
 - Mogućnost pohrane, analize, ispisa
 - **Frekvencije otipkavanja** 1-50 GS/s



Analogni (katodni) osciloskop

- Elektronskim snopom katodne cijevi (vakuumaska cijev) upravlja se naponom na otklonskim pločicama
- Dva para otklonskih pločica: **vertikalni pomak zrake** (Y), **horizontalni pomak zrake** (X)
- Promatrani signal otklanja elektronski snop gore-dolje
- Istodobnim otklanjanjem lijevo-desno signalom oblika $X=kt$ dobiva se ispis valnog oblika mjerenog signala
- Potrebno **sinkronizirati Y i X signal** kako bi slika počinjala i završavala na istom mjestu
- X signal (bilo kojeg oblika) se može dovesti izvana za X-Y prikaz



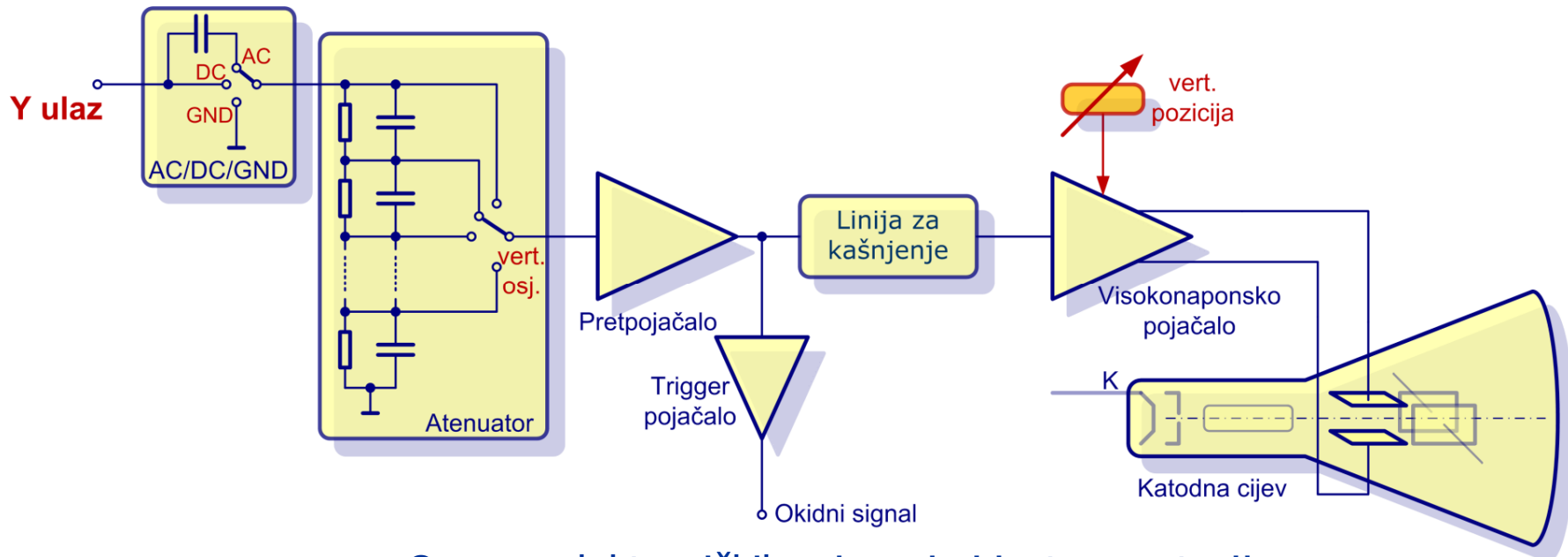
Analogni osciloskop – funkcijski moduli

➤ Funkcijski blokovi analognog osciloskopa

- Vertikalni kanal
- Horizontalni kanal
- Generator vremenske baze
- Sklop za sinkronizaciju
- Katodna cijev
- (Izvor napajanja)

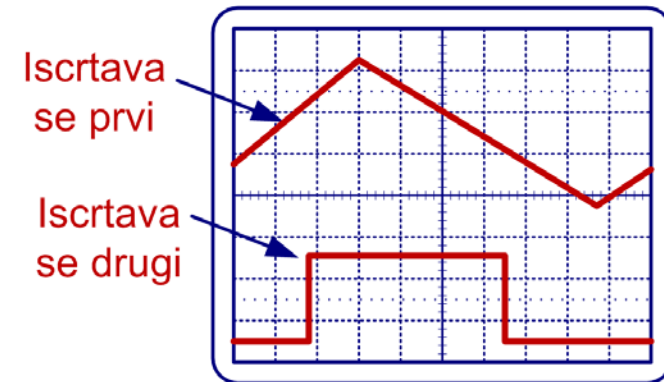
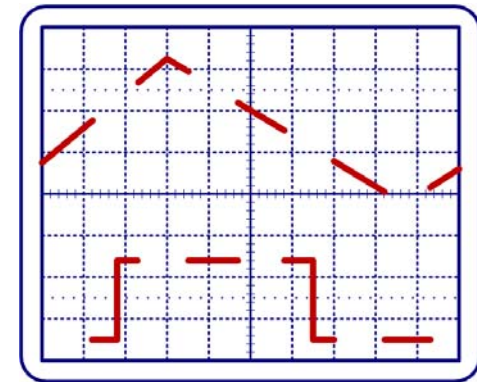
I - Vertikalni kanal – 1

- Mjereni signal (Y)
- **Prilagodba** (atenuacija / pojačanje), **faktor otklona V/dijelu skale**
- Pojačani signal se dovodi na horizontalne otklonske pločice katodne cijevi
- Signal se može spojiti **istosmjernom** (DC) ili izmjeničnom vezom (AC)
- Može se promijeniti polaritet signala (za funkciju zbrajanja ADD)
- Naponu na Y kanalu može se dodavati DC napon kojim se mijenja **vertikalni položaj zrake** (VERTICAL POSITION)



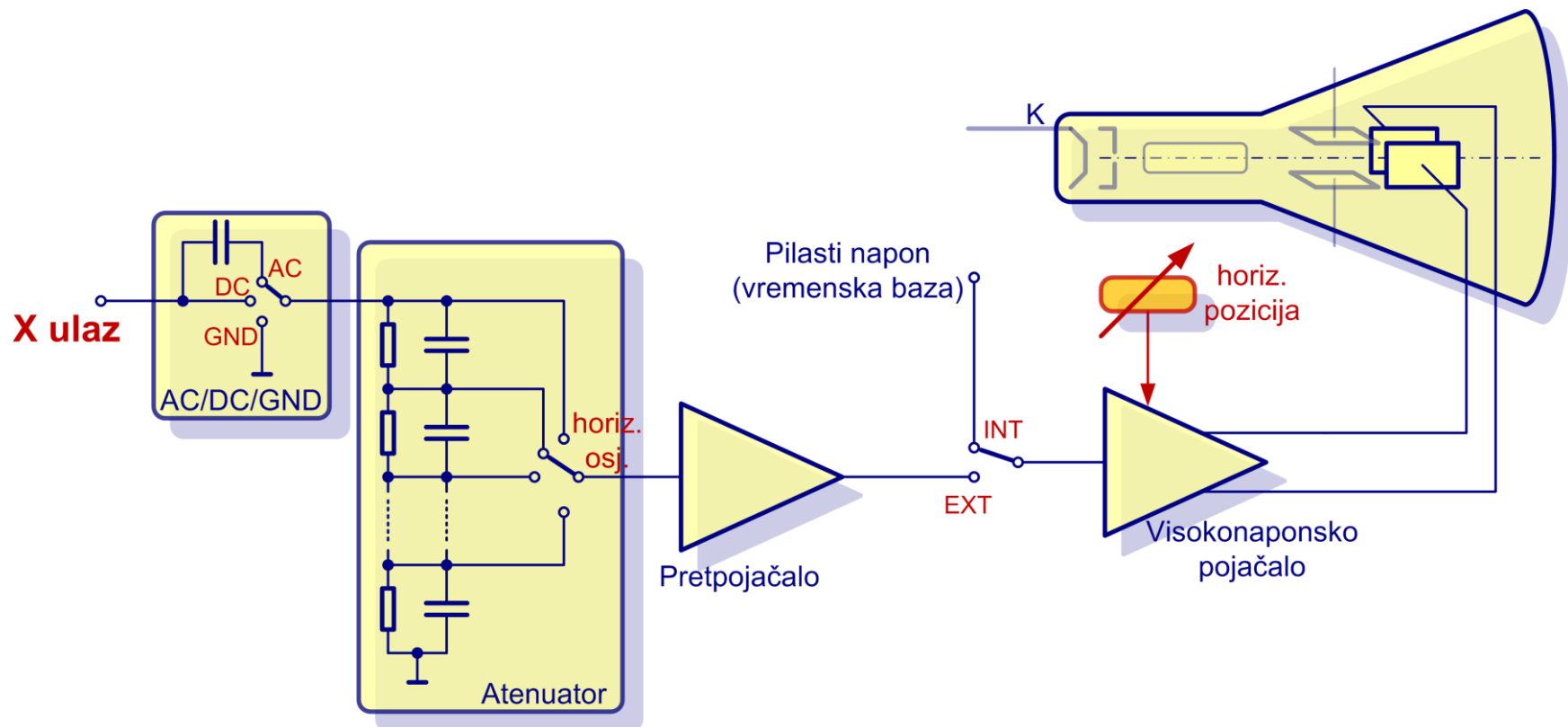
I - Vertikalni kanal – 2

- Osciloskopi često imaju mogućnost prikaza više kanala, 2 (*dual channel*) ili 4
- Način prikaza
 - kanali se međusobno preklapaju i prikazuju (CHOPPER MODE) - niže frekvencije očuvani fazni pomak
 - kanali se prikazuju redom jedan pa drugi (ALTERNATING MODE)



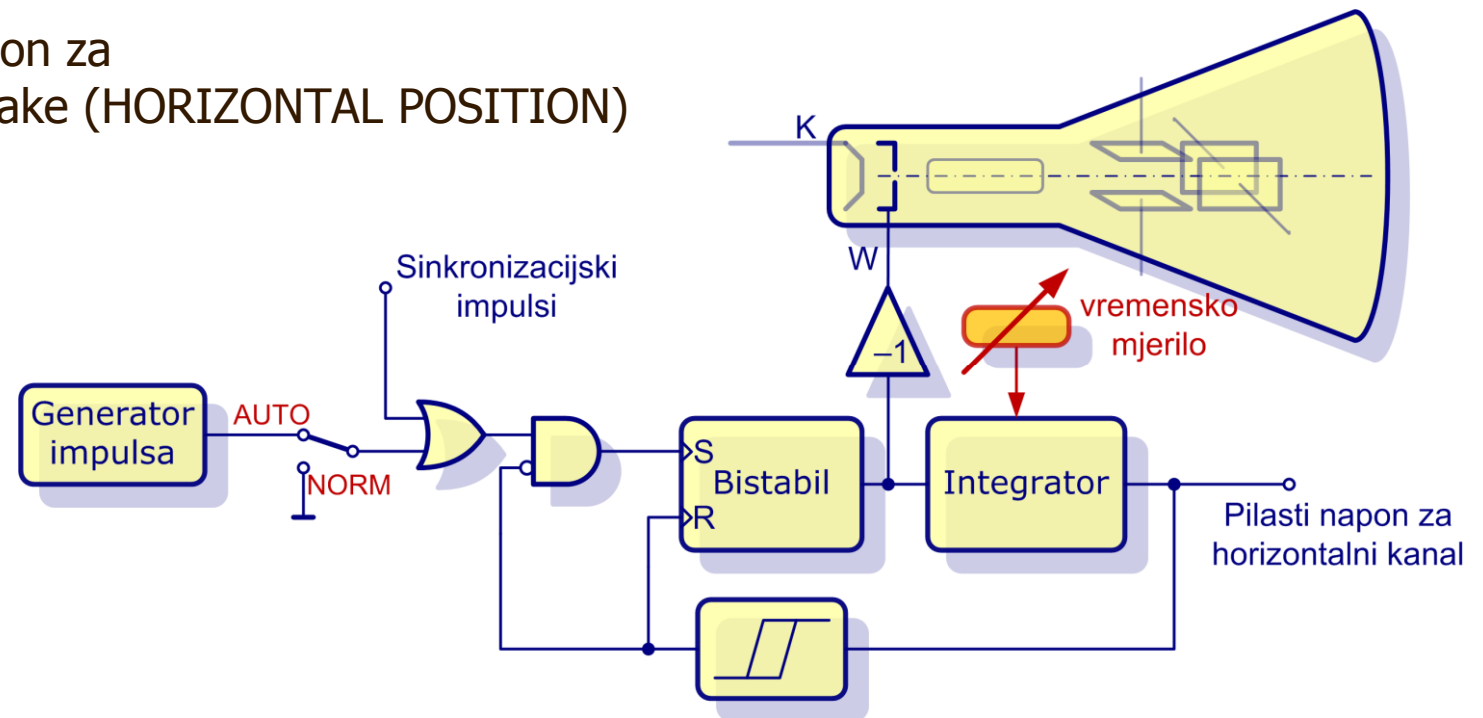
II - Horizontalni kanal

- Signal koji se nakon pojačanja dovodi na vertikalne otklonske pločice katodne cijevi (pomiču zraku lijevo-desno) (X)
- Signal ima **pilasti valni oblik** (iz generatora vremenske baze) za **prikaz** mjenog **signala u vremenu**
- Ili se dovodi bilo koji vanjski signal za XY prikaz



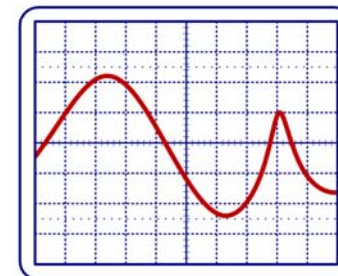
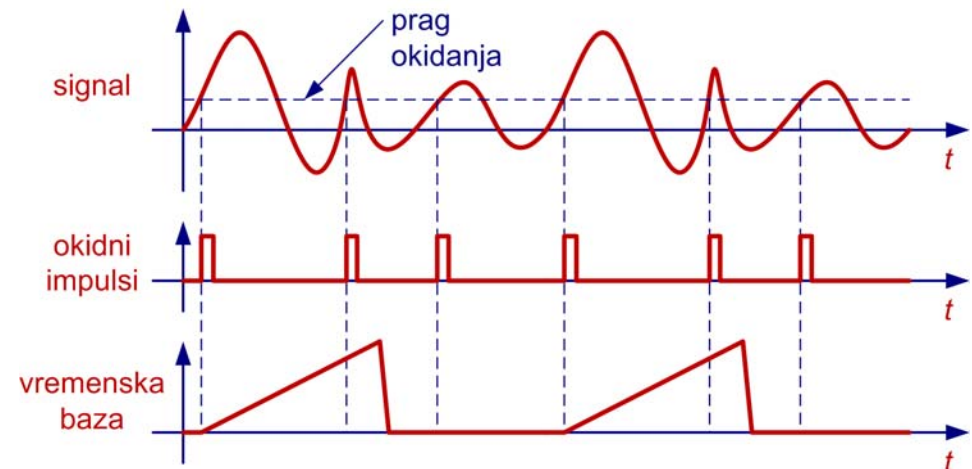
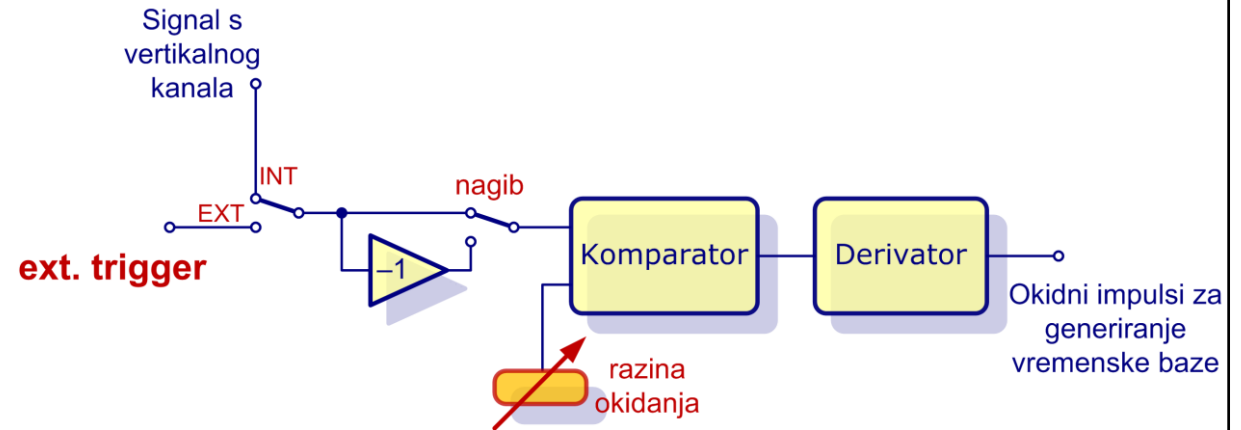
III - Generator vremenske baze

- Sklopovlje koje **generira pilasti napon** za X otklon
- Generira i impuls kojim se na katodnoj cijevi onemogućuje elektronski snop za vrijeme povrata pilastog napona (Wheneltov cilindar)
- **Nagibom** pilastog napona definira se **brzina** kojom elektronski snop prelazi preko zaslona katodne cijevi – **vremensko mjerilo osciloskopa** (TIME BASE), **s/dijelu skale**
- **Amplituda** pilastog napona odgovara naponu potrebnom za puni otklon zrake (do kraja zaslona)
- Odnosom perida signala i brzine vremenske baze određuje se dio signala koji će se prikazati
- Može se dodavati napon za horizontalni pomak zrake (HORIZONTAL POSITION)



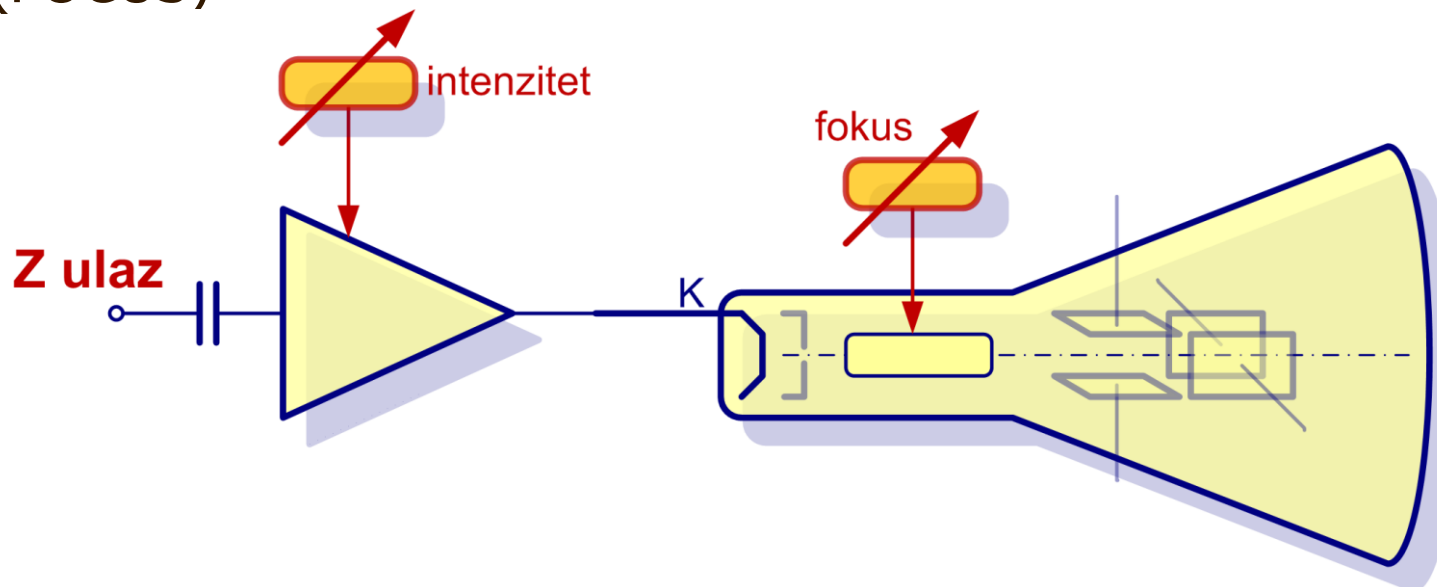
IV - Sklop za sinkronizaciju

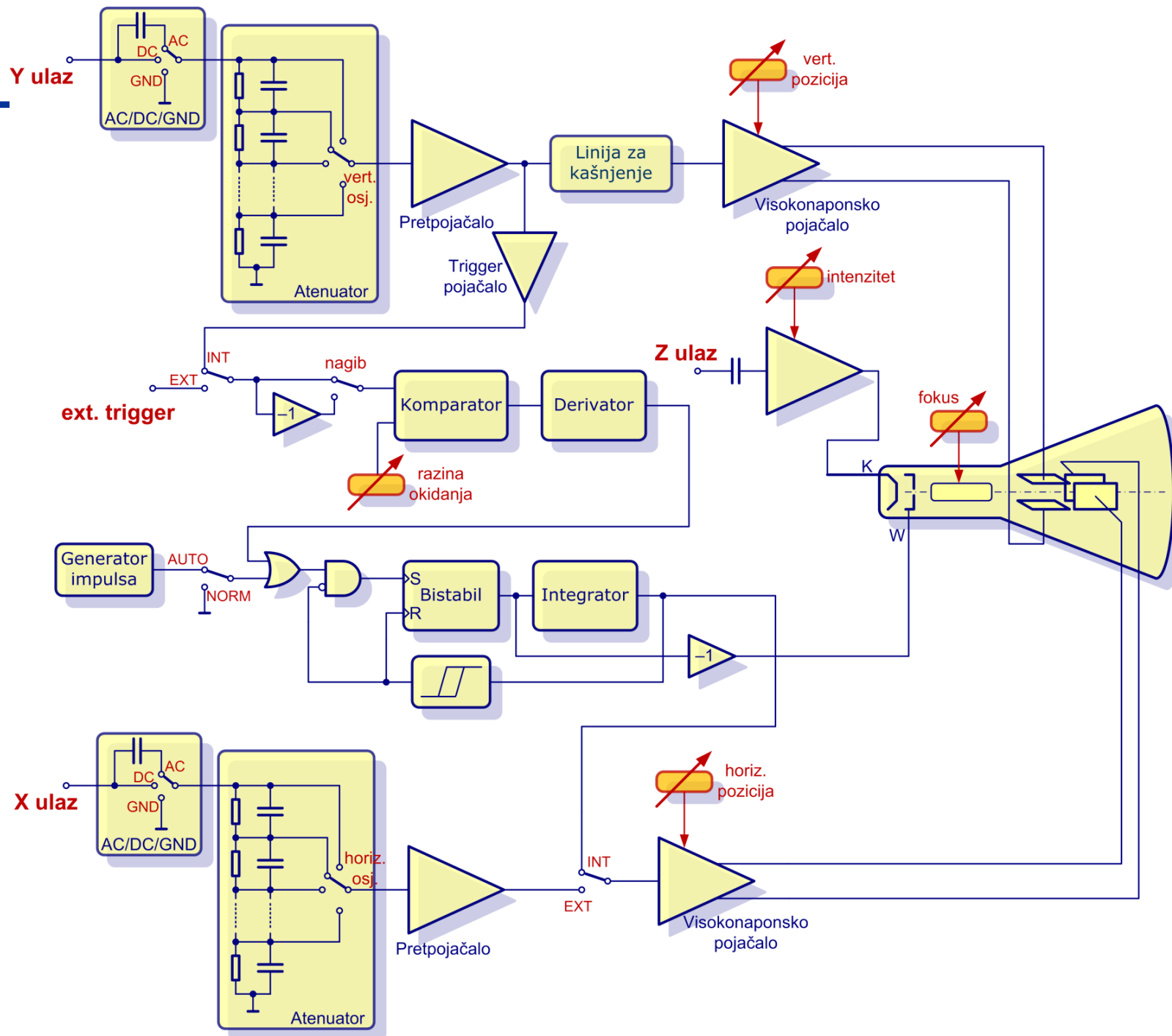
- Generira vremenske signale za sinkronizaciju pilastog napona
- Izvor okidnog signala - (TRIGGER SOURCE)
 - napon vertikalnog kanala (Y) (INTERNAL TRIGGER)
 - vanjski napon priključen na osciloskop (EXTERNAL TRIGGER)
- Razina okidanja (TRIGGER LEVEL)
- Nagib okidnog napona (TRIGGER SLOPE)
- Način okidanja
 - AUTO kada osciloskop okida na signal ili relaksacijski ako je razina okidanja izvan raspona signala
 - NORM kad razina okidanja treba biti unutar raspona signala
 - SINGLE SHOT način rada omogućuje generiranje jednog pilastog napona



V - Katodna cijev

- **Indikator tri informacije**, položaj točke x, y i intenzitet zrake z
- Zaslon katodne cijevi je s unutarnje strane presvučen materijalom na kojemu elektronski snop ostavlja vidljivi trag
- Katodna cijev ograničava frekvencijsko područje analognog osciloskopa
 - **najniža frekvencija** repeticije određena je svijetljenjem zaslona
 - **najviša frekvencija** osciloskopa određena je brzinom ispisivanja katodne cijevi (1GHz), otklonski sustav predstavlja veliki kapacitivni teret izlaznim pojačalima
- Energijom elektrona se može upravljati (INTENSITY), kao i fokusom zrake (FOCUS)





Napredne funkcije analognih osciloskopa

- Linije za kašnjenje analognih signala (mogućnost promatranja dijela signala prije okidne točke)
- Promatranje više kanala (*multi beam*)
- HOLD-OFF funkcija, kašnjenje početka pilastog napona
- Primjena dviju vremenskih baza
- Poboljšana amplitudno-frekvencijska karakteristika
- Naknadno ubrzanje elektronskog snopa, povećanje osjetljivosti prikaza (promatranje brzih pojava s niskom repeticijom – impulsa)

Mjerenje osciloskopom - 1

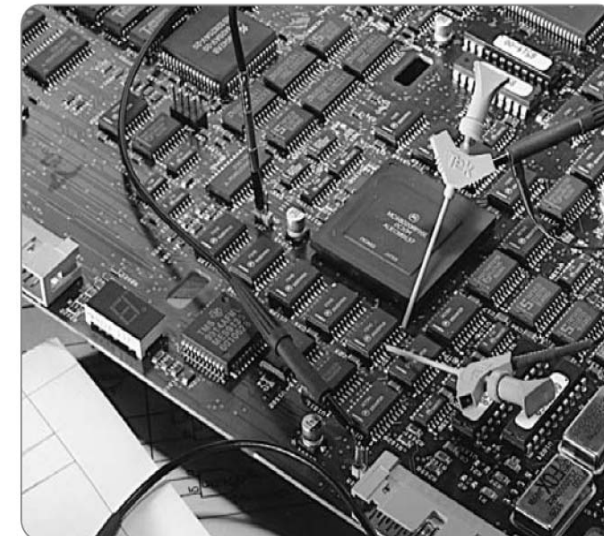
- Amplitude signala i vremenski odnosi na signalima
- Spajanje signala - mjernim sondama
- Asimetrična veza (ulaz osciloskopa je uzemljen, $1M\Omega/30pF$), ograničenja obzirom na impedanciju mjerne sonde i sumjerljivost duljine sonde i valne duljine signala
- Sonde - "pasivne" i "aktivne"
- "Pasivne" sonde - koaksijalni kabel (1X) ili s ugrađenim RC članom
- "Aktivne" sonde - ugrađena pojačala
- Sonde za mjerenje struje (strujna kliješta)



Mjerne sonde

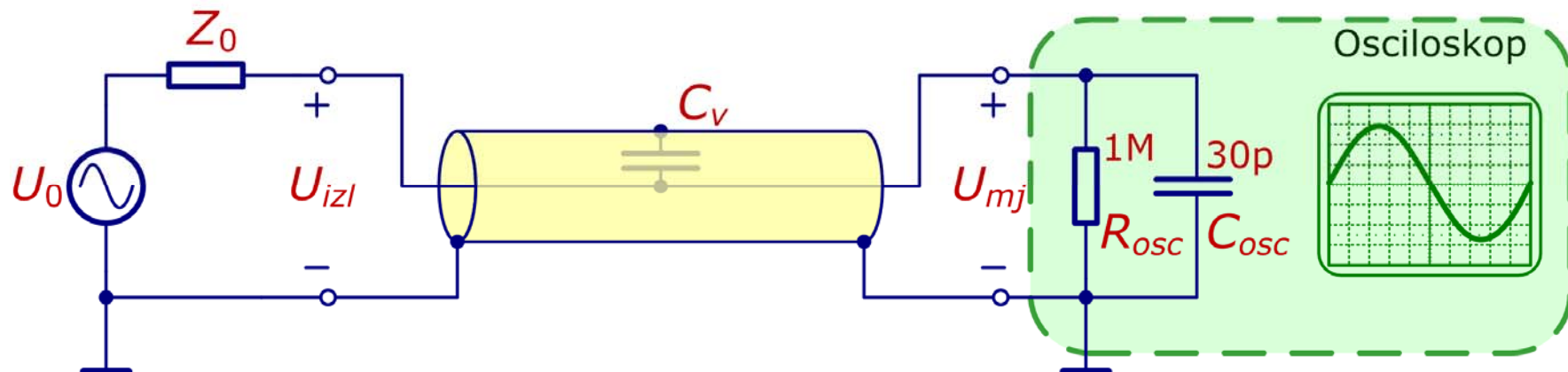
Tipovi mjernih sondi

Strujne sonde	Aktivne	AC DC
	Pasivne	AC
Naponske sonde	Aktivne	Diferencijalne S visokom osjetljivošću S visokom impedancijom
	Pasivne	Djelila S visokom impedancijom Visokonaponske Diferencijalne
Sonde za digitalne signale	Aktivne	Detektori logičkih razina Detektori riječi Logički analizatori
Ostale (specijalne) sonde	Aktivne	Optičke
	Pasivne	Temperaturne Akustičke Sonde za vibracije ...



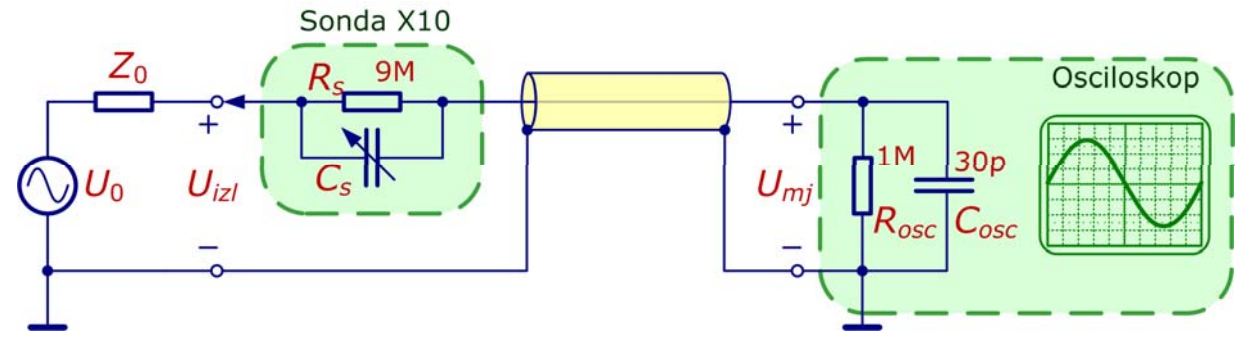
Pasivna mjerna sonda

- Za spajanje se koristi koaksijalni kabel (sonda 1X)
 - Problemi - kapacitet 30-60pF/m, **ruši ulaznu impedanciju**
- Mjerenje na visokim frekvencijama (impedancija kabela 100pF@100MHz, 160Ω) – sustavna pogreška mjerenja – **manji napon i promjena spektra signala**
 - Koristiti kraće (1m) kabele manjih kapaciteta

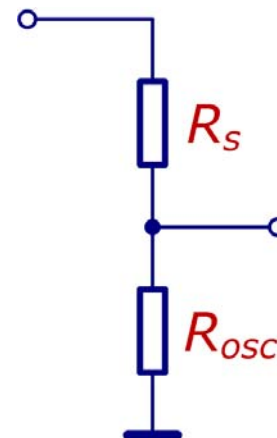


Pasivna sonda – naponsko djelilo

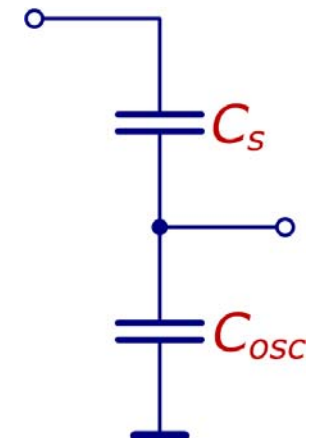
- Povećanje impedancije - spajanjem serijskog otpornika
- Izvodi se **atenuator**, paralelni RC član u sondi i na ulazu osciloskopa (**sonda 10X**)
- Omjer dijeljenja napona treba biti stalan u širokom frekvencijskom rasponu – **kompensacija**
- Nedostatak – (gušenje 10:1) nemogućnost mjerenja malih napona



$$\frac{R_{osc}}{R_s + R_{osc}}$$



$$\frac{C_s}{C_s + C_{osc}}$$



Pasivna sonda - kompenzacija

- Naponsko djelilo: omjer impedancija sonde i ulaza osciloskopa

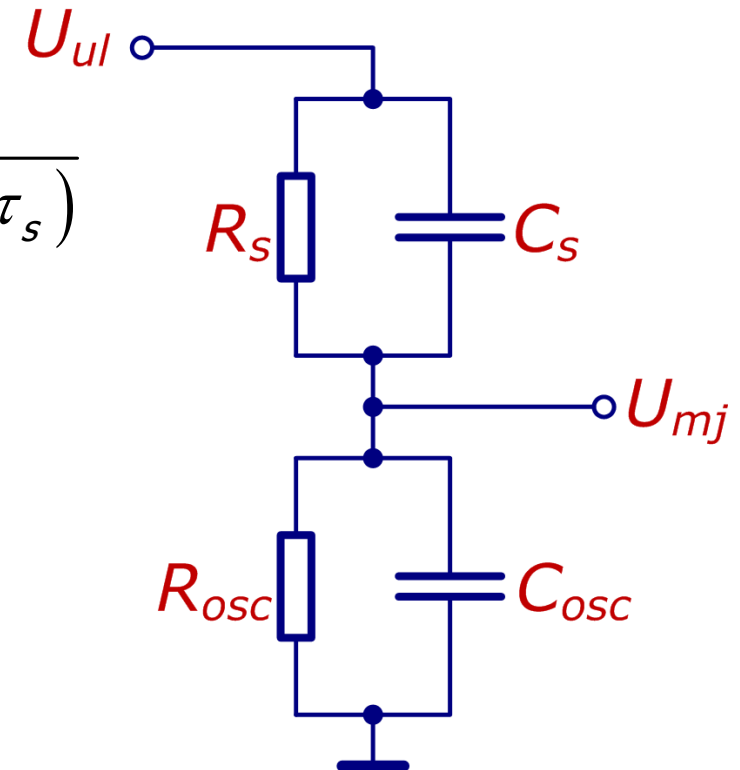
$$\frac{U_{ul}}{U_{mj}} = \frac{Z_{osc}}{Z_s + Z_{osc}} = \frac{R_{osc} (1 + s\tau_s)}{R_s (1 + s\tau_{osc}) + R_{osc} (1 + s\tau_s)}$$

- Za

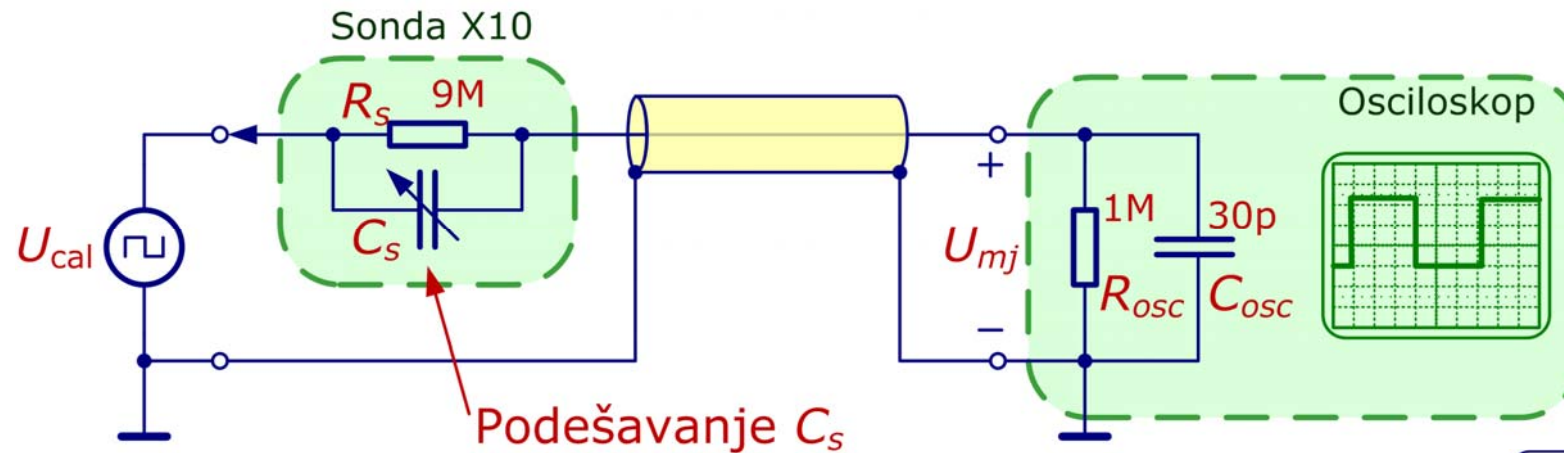
$$\tau_s = R_s C_s = \tau_{osc} = R_{osc} C_{osc}$$

$$\frac{U_{ul}}{U_{mj}} = \frac{R_{osc}}{R_s + R_{osc}}$$

- Namješta se vrijednost kondenzatora u "glavi" mjerne sonde (za svaku sondu i kanal osciloskopa)



Pasivna sonda - kompenzacija

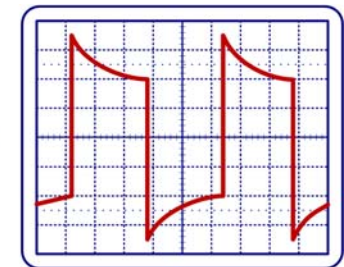


➤ Kompenzacija se očituje (i provjerava) na valnom obliku pravokutnog napona

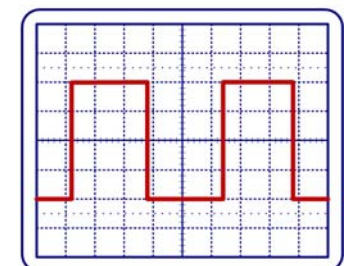
- $\tau_s < \tau_{osc}$ podkompenzorano,
- $\tau_s > \tau_{osc}$ nadkompenzirano

➤ Ukupni C je reda 12pF za 10X sonde, 3pF za 100X sonde ($R_{ul} = 10M\Omega$)

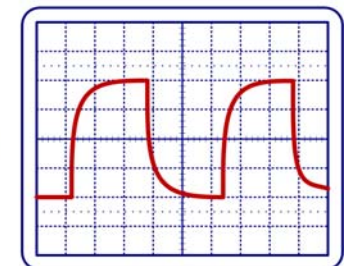
nadkompenzirano



kompenzirano



podkompenzirano

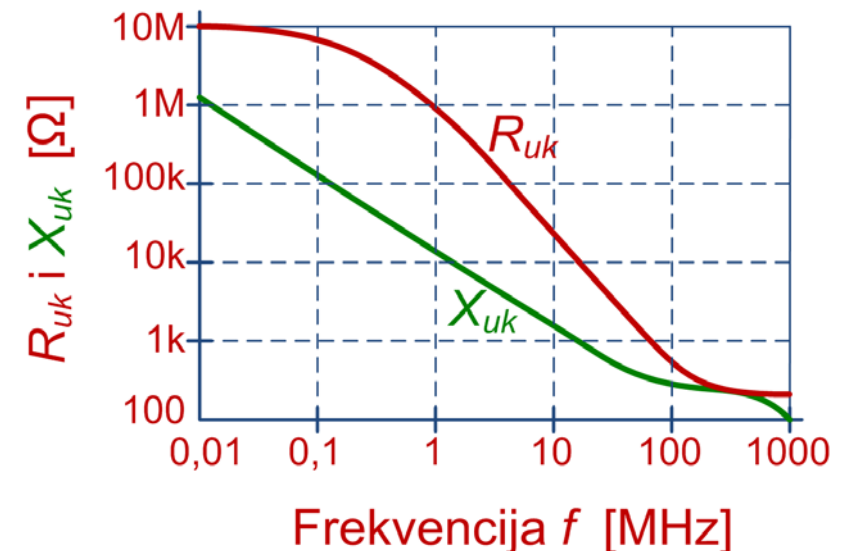
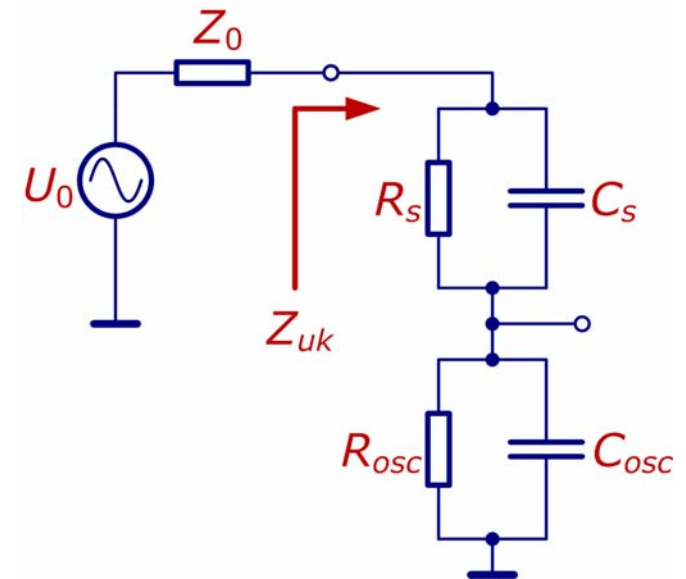


10X sonda - ulazna impedancija

- Impedancija se sastoji od serijskog spoja paralelnih RC članova sonde i ulaza osciloskopa

$$\begin{aligned}
 Z_{uk} &= Z_s + Z_{osc} \\
 &= \frac{R_s + R_{osc}}{1 + \omega^2 \tau^2} - j\omega \frac{(R_s + R_{osc}) \tau}{1 + \omega^2 \tau^2} \\
 &= R_{uk}(\omega) - jX_{uk}(\omega)
 \end{aligned}$$

- Impedancija pada s frekvencijom



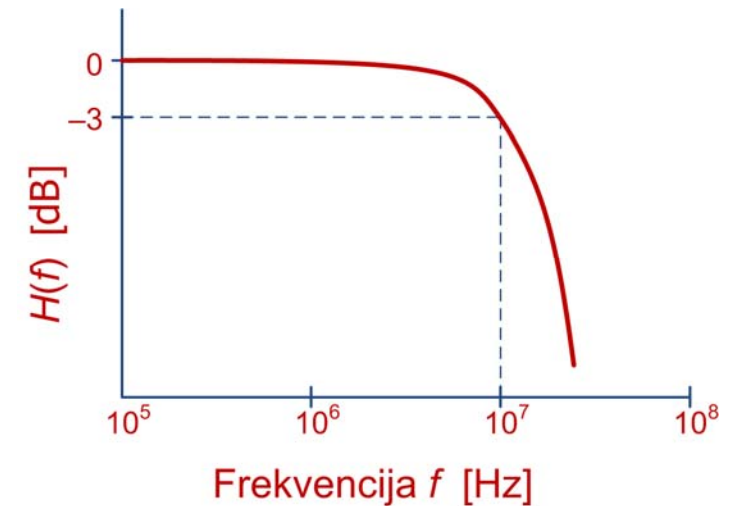
Mjerenje vremenskih parametara

- Mjerni sustav treba imati "glatku" amplitudno-frekvencijsku karakteristiku (Gaussovu), bez nadvišenja u odzivu na skokovitu pobudu
- Veza vremena porasta i granične frekvencije

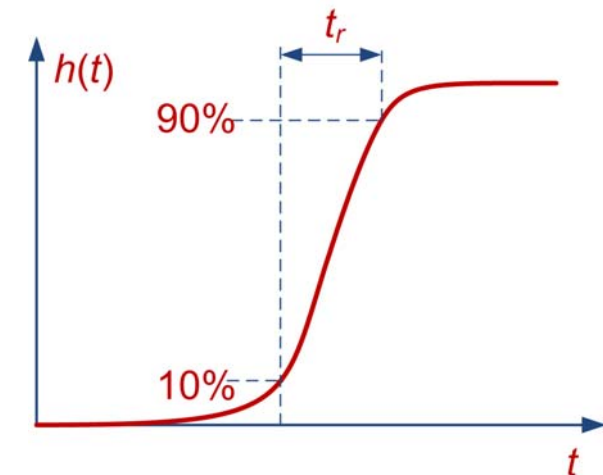
$$t_r = \frac{0,35}{f_g}$$

- Sonda ima deklarirano frekvencijsko područje (10X, 400MHz), i deklariran t_r
- Ukupno vrijeme porasta t_r kod mjerenja određeno vremenima porasta izvora, sonde i osciloskopa

$$t_r = \sqrt{t_{r,iz}^2 + t_{r,s}^2 + t_{r,osc}^2}$$



$$H(f) = e^{-0,3466 \left(\frac{f}{f_g} \right)^2}$$



Aktivna mjerna sonda

- Smanjenje utjecaja sonde - skraćivanje spojnih vodova – **smještanje pojačala signala u vrh mjerne sonde**
- Transformacija impedancije
 - $Z_{ul} = 1M || 2pF$
- Široko frekvencijsko područje
- Ograničen raspon mjenog napona
- Potrebno izvesti napajanje
- Problem prenaponske zaštite
- Visoka cijena (reda osciloskopa)
- Na VF se korsite osciloskopi s ulaznim otporom 50Ω
 - Sonde i kabeli - linije



Sonde za mjerenje struje

- Strujne "sonde", **strujna klijesta**
- **Strujni transformator**
 - područje 100Hz-10MHz
 - ne mjeri DC struju, materijal jezgre može biti zasićen DC strujom kroz isti vod
- **Hallova sonda**
 - za DC i AC područje (100kHz)
- Često se kombiniraju oba načina mjerenja u istoj sondi



Digitalni osciloskopi

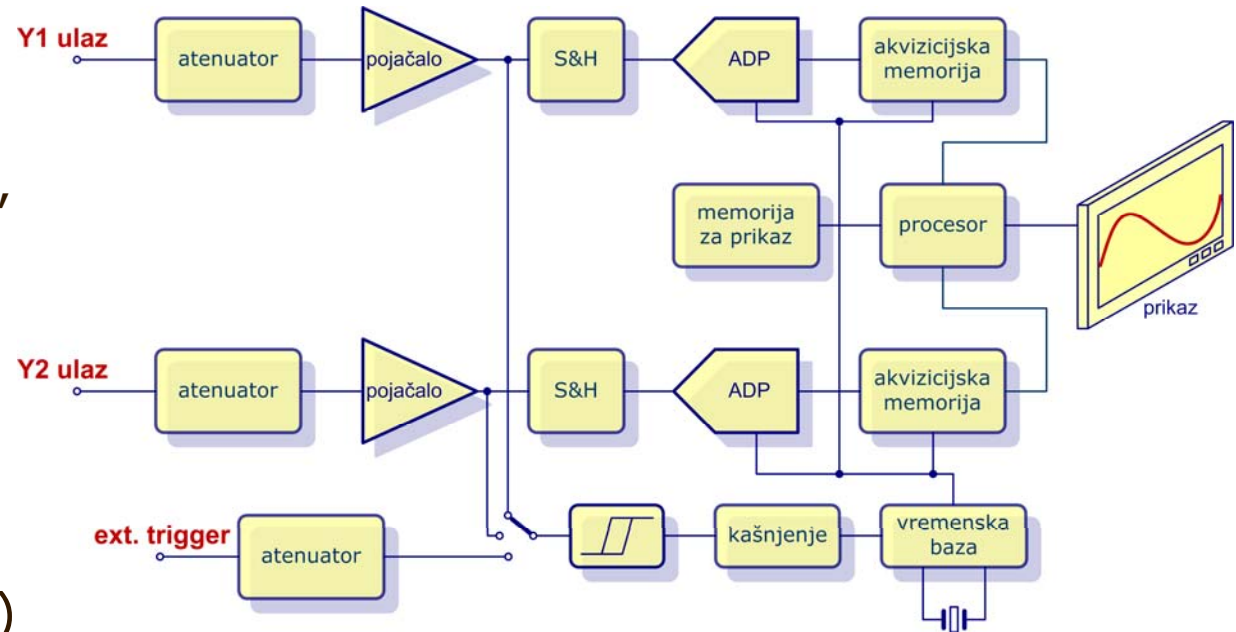
➤ Podjela digitalnih osciloskopa

- Osciloskopi s digitalnim pamćenjem (*Digital Storage Oscilloscope* - DSO)
 - Uzimanje uzoraka u stvarnom vremenu (*Real time sampling*)
 - Slučajno uzimanje uzoraka (*Random equivalent time sampling, Random repetitive sampling*)
- "*Sampling*" osciloskopi (*Digital Sampling Oscilloscope*)
 - Sekvencijalno uzimanje uzoraka (*Sequential equivalent time sampling, Sequential repetitive sampling*)

Osciloskop s digitalnim pamćenjem

➤ Y kanal

- Ulazni krug (atenuator, predpojačalo)
- Digitalizacija
 - Učestalost uzimanja uzoraka (*sampling rate*), uniformno uzorkovanje
 - razlučivost (8 bita tipično)
- Akvizicijska memorija
- Rekonstrukcija valnog oblika
- Pokaznik (CRT, LCD, TFT)

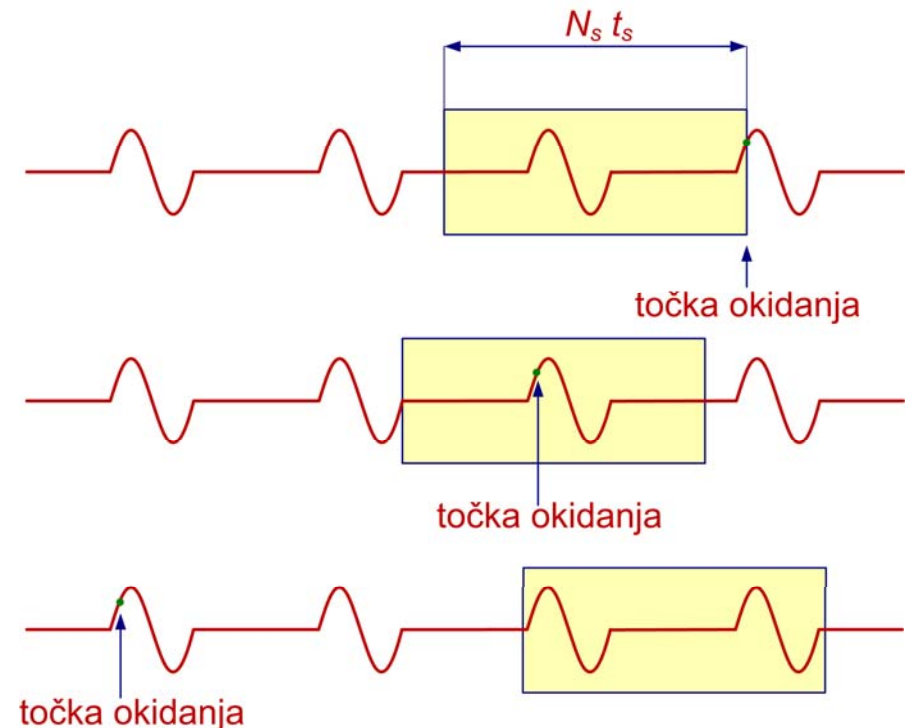
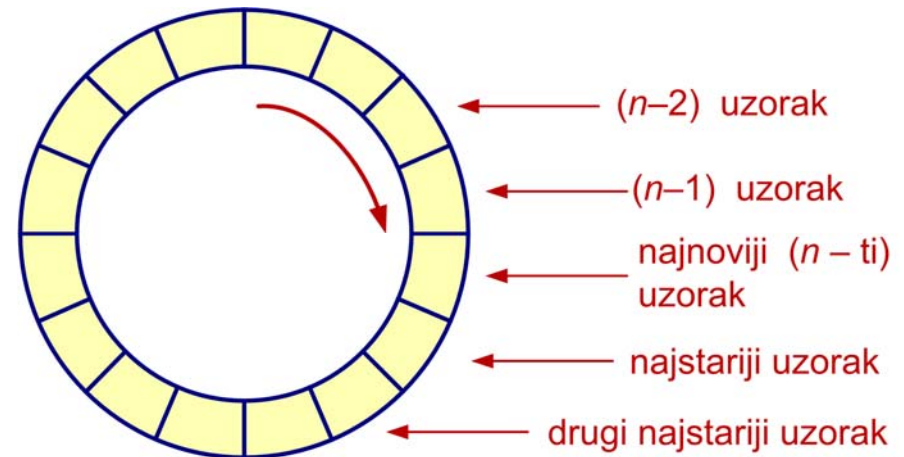


➤ X kanal

- detekcija uvjeta okidanja
- sinkrono upravljanje uzimanjem uzoraka i prikazom

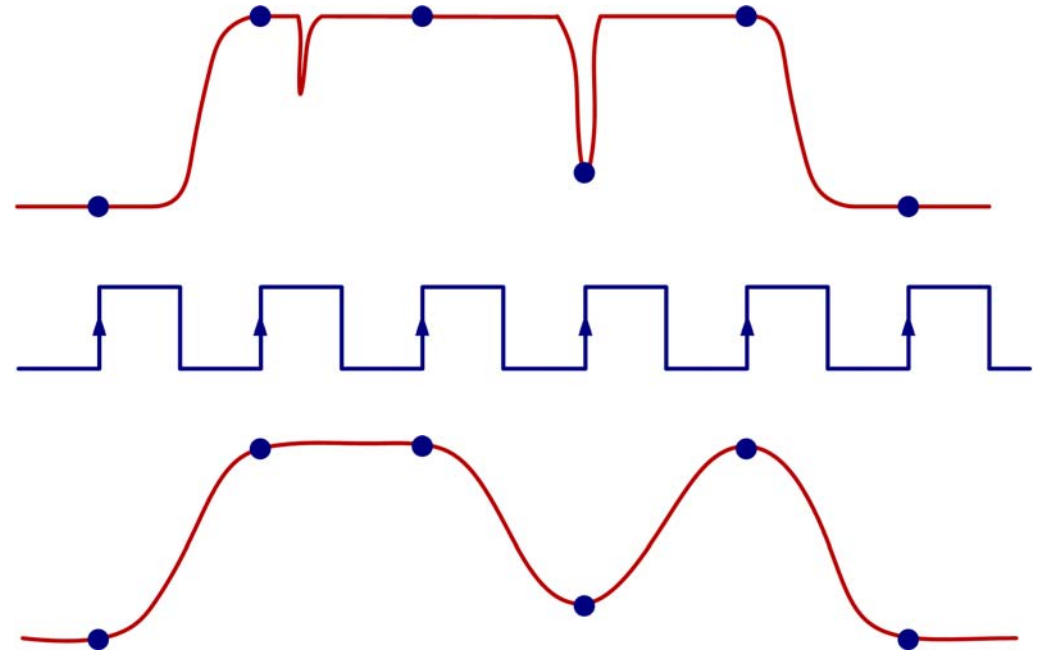
Akvizijska memorija

- Organizacija – cirkularno polje (*circular buffer*)
- Podaci se **upisuju** u memoriju kontinuirano frekvencijom uzorkovanja do ispunjenja uvjeta okidanja (zapis trajanja $N_s t_s$)
- Prestanak upisivanja u memoriju se može pomaknuti u odnosu na okidni uvjet – *pre/post trigger*
- Slijedi **ispis** iz memorije za prikaz valnog oblika
- **Veličina memorije**



Uzimanje uzoraka u stvarnom vremenu

- Svi uzorci svih kanala se uzimaju ispunjenjem uvjeta okidanja
- Valni oblici svih prikazanih kanala dobiveni su u istom ciklusu
- Može se zabilježiti **nerepetitivni** tranzijent
- Moguće promatranje signala prije ispunjenja okidnih uvjeta
- Najveći zahtjevi za izvedbu osciloskopa
 - visoke frekvencije uzorkovanja
 - velike brzine rada memorije
 - veliki kapaciteti memorije

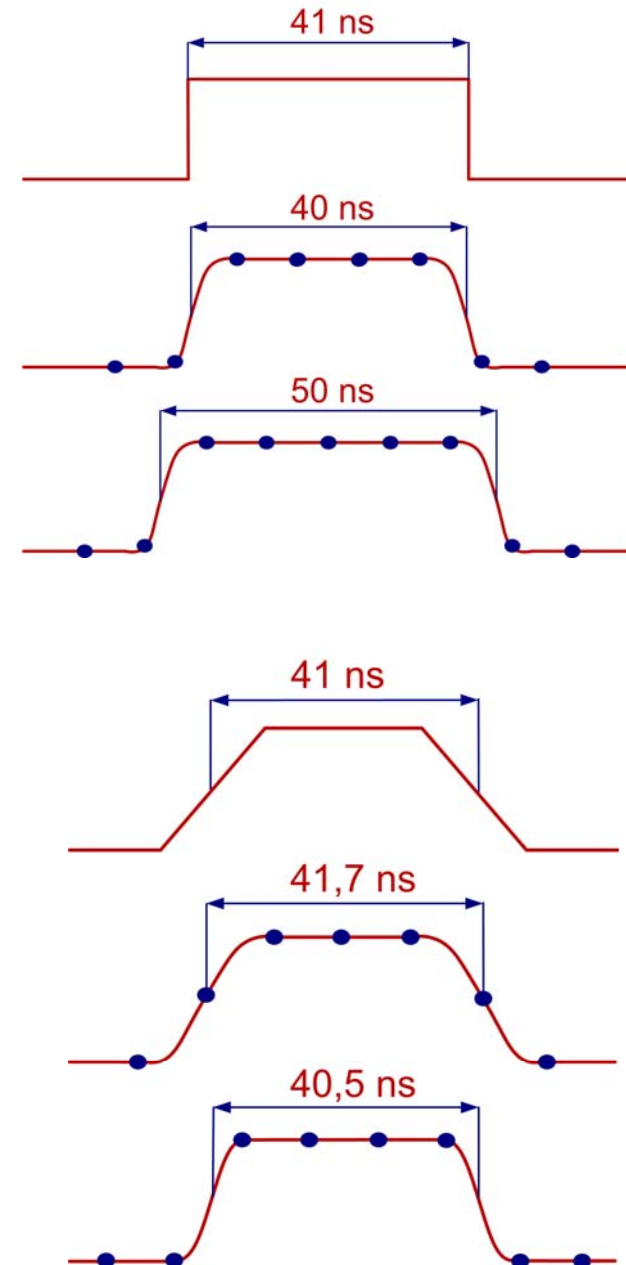


Uzimanje uzoraka u stvarnom vremenu

- Odnos frekvencije uzorkovanja i širine spektra mjerenog signala
 - Nyquistov teorem, $f_s > 2f_m$
 - Uzorkovanje signala viših frekvencija od $2f_m$ dovodi do preklapanja spektara (aliasing)
 - Tipično f_s 4-10 puta viša od f_m
- Rekonstrukcija valnog oblika za iscrtavanje - zahtjevana matematička operacija (neizvedivo u stvarnom vremenu)
- Širinu pojasa signala ograničavaju pojačala Y kanala osciloskopa
- Vrlo zahtjevan kompromis – brzi pad prijenosne funkcije za bolje gušenje viših f / postizanje "Gaussove" karakteristike
- Osciloskop s digitalnim pamćenjem ima istitravanje u odzivu na skokovitu pobudu

Uzimanje uzoraka u stvarnom vremenu

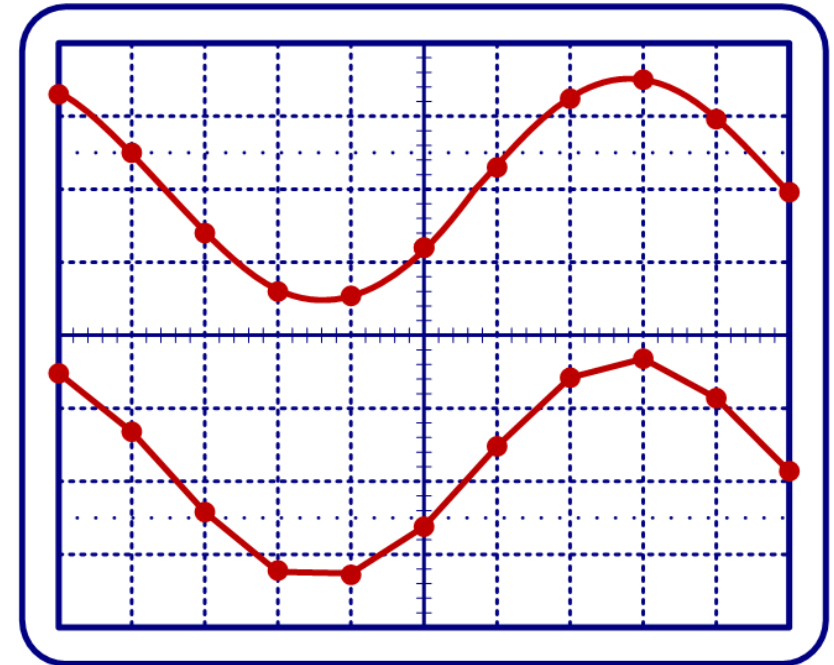
- Aliasing u vremenskoj domeni (prepoznati)
- Otipkavanje impulsa
- Ovisi o valnom obliku impulsa
- Rekonstruirani impuls – cjelobrojni višekratnik vremena uzorkovanja
- Usrednjavanje rezultata više mjerenja
- DSO - ograničenje frekvencijskog pojasa na $f_s/4$, može rekonstruirati vrijeme u tranzijentima unutar $\pm 0,15t_s$



Uzimanje uzoraka u stvarnom vremenu

➤ Rekonstrukcija valnog oblika

- **težinska suma** (8) najbližih uzoraka
- dobivanje interpolirane vrijednosti u uniformnim podintervalima između dvaju uzoraka
- ovisi o brzini uzorkovanja, vremenskoj bazi, i razlučivosti prikaza
- obično je potrebno 20-50 interpolacijskih točaka
- izvedba u obliku digitalnog filtra
- linearna interpolacija, $\sin x/x$ interpolacija



Uzimanje uzoraka u stvarnom vremenu

➤ Rizik od pojave aliasinga

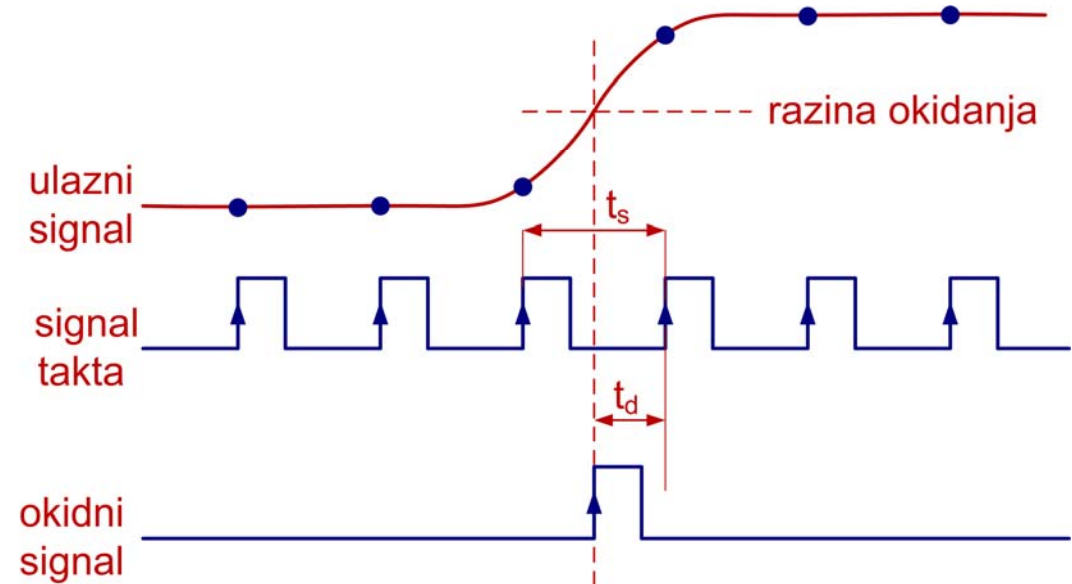
- spore vremenske baze, niska frekvencija uzorkovanja
- dulje uzorkovanje signala s brzim promjenama
- spori signali frekvencije bliske višekratniku frekvencije uzorkovanja

Uzimanje uzoraka u stvarnom vremenu

- Mogućnosti izbjegavanja aliasinga - *Peak detection*
- ADP uzima uzorke visokom frekvencijom neovisno o vremenskoj bazi
- Uzorci se zapisuju u dva registra, za najmanju i najveću vrijednost, nakon usporedbe s prethodno zapisanim
- U memoriju se upisuju nižom (efektivnom) frekvencijom uzorkovanja (određena vremenskom bazom)
 - zapisuju se za 2 podatka svaki efektivni uzorak
- Prikazuju se minimum i maksimum za svaki efektivni uzorak i povezuju vertikalnom crtom

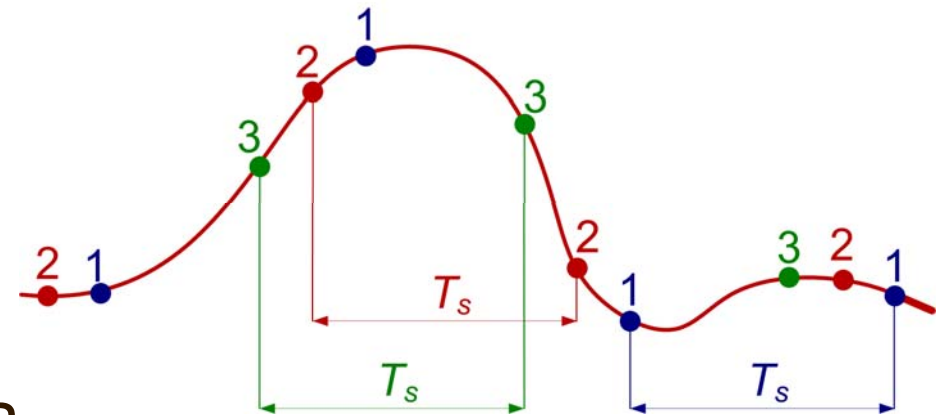
Uzimanje uzoraka u stvarnom vremenu

- *Trigger interpolation*
- DSO uzorkovanje sinkronizirano s referentnim oscilatorom
- Pojava okidnog uvjeta nije sinkrona s generatorom takta
- *Trigger interpolator* treba izmjeriti vrijeme između okidnog impulsa do uzimanja sljedećeg uzorka u svakom ciklusu
- Uzorkovanje prestaje sa sljedećim uzorkom ili drugim cijelim brojem uzoraka koji se može namjestiti kašnjenjem (*pretrigger*)
- Vrijeme se mjeri unutar nekoliko % najkraće vremenske baze osciloskopa



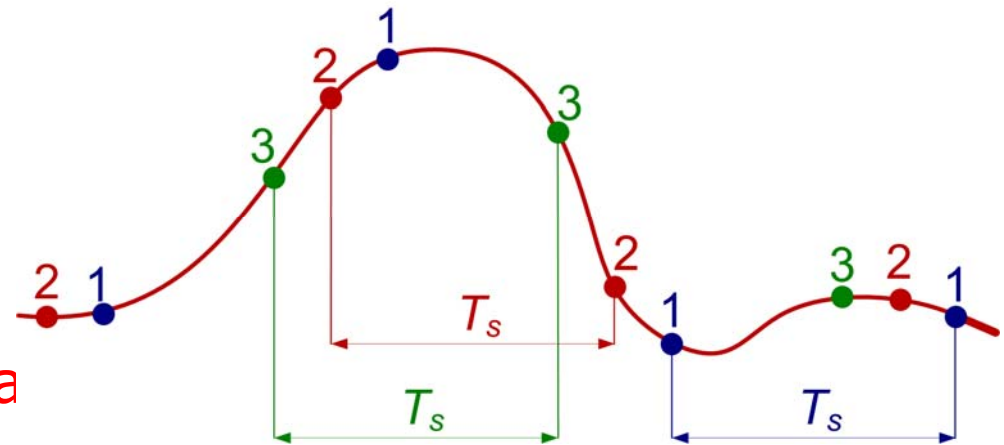
Slučajno uzimanje uzoraka - 1

- Glavno ograničenje uzorkovanja u stvarnom vremenu – ograničenje spektra signala na $f_s/4$
- Proširenje spektra moguće uz visoku cijenu bržeg ADP i memorije
- Kako povećati f_m bez podizanja f_s ?
- Slučajno uzimanje uzorka – uz uvjet signali su repetitivni i može se ostvariti vrlo stabilno generiranje okidnog impulsa



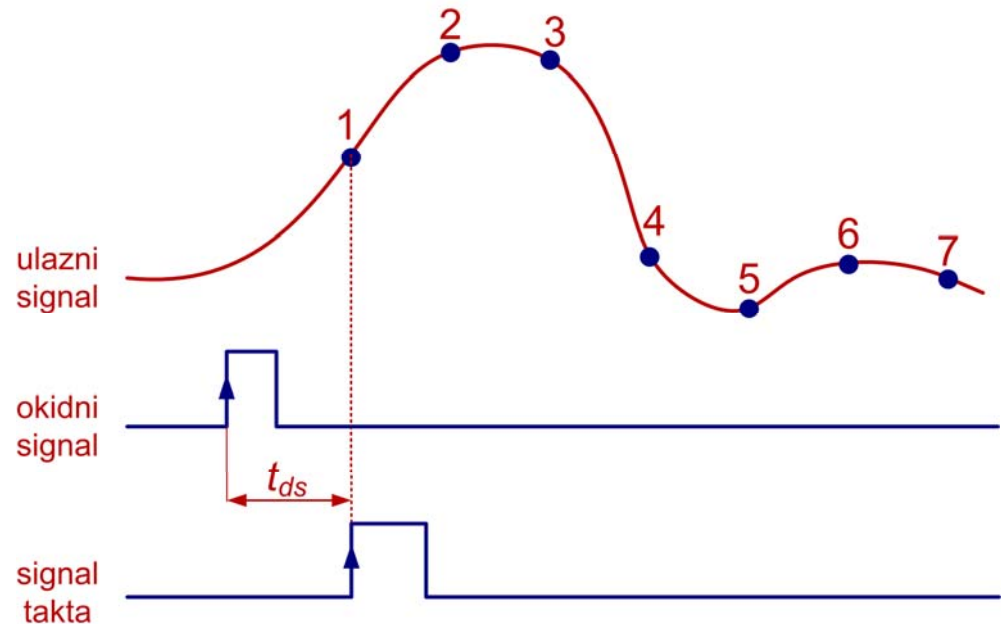
Slučajno uzimanje uzoraka – 2

- Ponavljaju se ciklusi uzorkovanja u stvarnom vremenu
- U svakom ciklusu generira se **slučajni vremenski pomak između okidnog impulsa i generatora takta za uzorkovanje**
- Uzima se jedan ili više uzoraka po periodu signala
- Uzorci se pohranjuju u memoriji
- Svaki **uzorak se prikazuje kao točka na zaslonu mjerenjem vremena od okidnog impulsa, bez interpolacije**
- Efektivna brzina uzorkovanja **ovisi o točnosti mjerenja vremena *trigger interpolatora* (razlučivost $\sim 10\text{ps}$)**



“Sampling” osciloskopi

- Sekvencijalno uzimanje uzoraka
- Uzima se **jedan uzorak nakon ispunjenja okidnog uvjeta s točno definiranim vremenskim pomakom**
 - Lakše generirati kratke intervale, nego ih mjeriti (**razlučivost $\sim 10\text{fs}$**)
- U sljedećem ciklusu uzorkovanja vrijeme se produljuje za mali korak
- Uzorkovanje se ponavlja do iscrtavanja cijelog valnog oblika



Sekvencijalno uzimanje uzoraka

- **Efektivno vrijeme uzorkovanja** odgovara vremenskom inkrementu između uzoraka
- Pomak mora biti pozitivan, **nema mogućnosti ostvarivanja pretriggera**
- Najbrži osciloskopi, do 50GHz
- Sklop za uzimanje uzoraka na ulazu (mogućnosti pojačala)
- Smanjeno dinamičko područje (1V tipično)
- Osjetljiv na prenapon

