

Poglavje 6

Meritve v časovnem prostoru-osciloskop

Dandanes velja osciloskop za najbolj vsestranski splošni elektronski merilni instrument, ki je na razpolago za znanstveno raziskovanje.

V razvoju elektronskih instrumentov je osciloskop odigral najpomembnejšo vlogo s tem, da je omogočal opazovanje časovnega poteka nekega pojava, obenem z meritvijo njegove velikosti. Čeprav so galvanometri in ostali mehanski instrumenti, zmožni kazati dinamične pojave, obstajali že davno prej, so bili to vendar le instrumenti s počasnim odzivom.

WILLIAM CROOKES je leta 1897 pokazal, da je z magnetom možno odklanjati katodne žarke v elektronski cevi. Že prej pa so s katodnimi žarki izzvali fosforescence na steklenem zaslonu elektronske cevi, področja fosforescence pa so kontrolirali z uporabo oblikovalnih mask. Cev, ki je vsebovala elemente za fokusiranje elektronskega snopa, ki je vpadal na fosforescentno tarčo, je postala znana pod imenom Crookes-ova cev. Ta cev je pozneje dobila ime katodna cev (*Cathode Ray Tube*, CRT).

KARL F. BRAUN je leta 1879 s Crookes-ovo cevjo zgradil napravo, ki je bila prvi predhodnik današnjega osciloskopa.

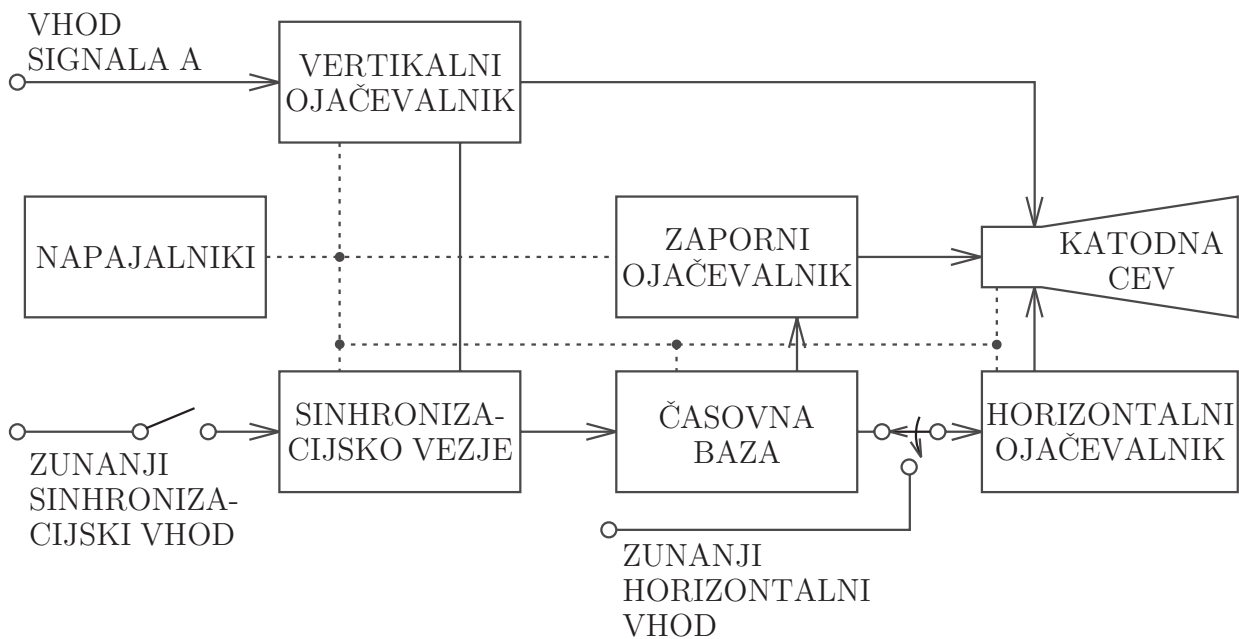
Osciloskop je instrument, ki naj prikaže svetlobni xy graf poljubnega vira električnih signalov, signal x je priključen na vhod horizontalnega odklonskega sistema in signal y na vhod vertikalnega odklonskega sistema. Intenzivnost snopa upravljamo, oziroma moduliramo na vhodu sistema z . V zadnjih letih pa se je definicija osciloskopa spremenila tako, da je ta instrument prvenstveno namenjen za prikaz signalov vertikalne osi (osi y). Današnji laboratorijski osciloskop je torej merilni instrument za analizo električnih signalov v časovnem prostoru.

Funkcija osciloskopa je, da zajame, prikaže in analizira obliko električnega signala v časovnem prostoru. Običajno se osciloskop uporablja le za prvi dve funkciji, analiza signala pa ostane inženirju ali tehniku, le manjši del analize se izvrši s pomočjo nastavitve instrumentovih komand. Nekateri osciloskopi pa so danes že zmožni kompleksnejših analiz podatkov, rezultati so predstavljeni v digitalni obliki, drugi pa so v povezavi z računalnikom zmožni najrazličnejših obdelav podatkov.

6.1 Analogni osciloskop

Osciloskop je sestavljen iz naslednjih glavnih enot:

1. Slikovni del-zaslon (katodna cev)
2. Vertikalni ojačevalnik (obenem s sondo ali pretvornikom za električni signal)
3. Časovna baza
4. Horizontalni ojačevalnik
5. Sinhronizacijsko vezje (da začne vsak prelet v želenem trenutku opazovanega signala)
6. Zaporni ojačevalnik (vklaplja oziroma izklaplja elektronski snop)
7. Napajalniki.



Slika 6.1: Blok shema osciloskopa

Laboratorijske osciloskope klasificiramo na različne načine. Glede na frekvenčni odgovor jih delimo na nizkofrekvenčne (do 10 MHz) in visokofrekvenčne (včasih s časom vzpona pod 1 ns) in vzorčne osciloskope (s katerimi lahko opazujemo periodične signale do 18 GHz).

Glede na karakteristike katodne cevi pa ločimo med osciloskopi s standardnim fosforjem, kjer moramo sliko ohranjati in osciloskopom s spominskim zaslonom, kjer slike določen čas ni treba obnavljati, ker ostane na analogen način shranjena na zaslonu.

6.1.1 Vertikalni sistem

Najpomembnejše lastnosti vertikalnega sistema pri osciloskopu so:

- število kanalov
- odklonski faktor
- rejekcijski faktor
- čas vzpona oziroma mejna frekvenca.

Pri frekvenčnem odgovoru osciloscopa podajo izdelovalci običajno zgornjo frekvenčno mejo, to je frekvenco, pri kateri pada občutljivost osciloscopa za 3 dB pod občutljivost za enosmerni signal. Ker uporabljamo osciloskop zelo pogosto za analizo impulzov, pa je pomembno vedeti čas vzpona osciloscopa in njegov vpliv na opazovani čas vzpona impulza.

Čas vzpona impulza je definiran kot čas, ki je potreben, da se impulz vzpne od 10% do 90% svoje končne vrednosti.

Večina ojačevalnikov za osciloskope je grajena tako, da najmanj popačujejo impulze (prevzpon in zvonjenje je maksimalno 2%). Zvezo med pasovno širino in časom vzpona impulza τ_r lahko zapišemo

$$B = \frac{K}{\tau_r} \quad (6.1)$$

kjer je K konstanta in se giblje med 0.3 in 0.5 (0.35 je za en sam pol ojačevalnika).

Če merimo čase vzpona, ki so blizu času vzpona osciloscopa, nastopi napaka, ki jo moramo kompenzirati. Velja

$$\tau_{rd} = \sqrt{\tau_{rs}^2 + \tau_{r0}^2} \quad (6.2)$$

kjer je

τ_{rd} skupni čas vzpona, ki ga opazujemo na zaslonu osciloscopa

τ_{rs} čas vzpona signala

τ_{r0} čas vzpona osciloscopa.

Torej je čas vzpona signala

$$\tau_{rs} = \sqrt{\tau_{rd}^2 - \tau_{r0}^2}. \quad (6.3)$$

Ponazorimo si s primerom; osciloskop naj ima podan čas vzpona 10 ns, na zaslonu osciloscopa pa opazujemo 18 ns, tedaj je dejanski čas vzpona signala enak 15 ns, če pa bi bil opazovani čas vzpona 13 ns, bi bil čas vzpona signala približno 8.3 ns.

Čeprav je osnovna zgradba pri nizkofrekvenčnih (DC-10 MHz) in visokofrekvenčnih (nad 10 MHz do 500 MHz) v glavnem enaka, pa so nizkofrekvenčni osciloskopi običajno občutljivejši (manjši odklonski faktor), tu so pomembni

- šumni nivo
- plazenje (drift)
- rejekcijski faktor.

Pri visokofrekvenčnih osciloskopih pa je pomembno:

- hitrost pisanja katodne cevi
- majhen čas vzpona
- dober visokofrekvenčni impulzni odziv
- zmožnost hitre sinhronizacije.

Visokofrekvenčni osciloskopi imajo v vertikalnem sistemu še zakasnilno linijo, zato da lahko opazujemo začetni del signala. To je potrebno zaradi zakasnitve med vertikalnim ojačevalnikom in časovno bazo, ki znaša okrog 50 ns.

Tipičen vertikalni ojačevalnik za laboratorijski osciloskop ima napetostno ojačanje 2000, na vhodu pa ima atenuator, ki ima območje do 500:1 ali več.

Če katodna cev zahteva 20 V za delec odklona, lahko s preklapljanjem napetosti delilnika dosežemo vhodne odklonske faktorje od 10 mV na delec do 5 V na delec običajno v zaporedju 1, 2, 5, 10 itd. Ojačanje je lahko precizno nastavljeno z vijačnim potenciometrom, označenim z GAIN CAL.

Zvezno nastavitvev ojačanja omogoča potenciometer, ki je označen z VERNIER.

Tipične točnosti atenuatorja so v območju $\pm 3\%$. Uporabljamo kompenzirani RC napetostni delilnik zato, da dušimo enako pri vseh frekvencah (slika 6.2).

Razmerje med izhodno napetostjo U_o in vhodno napetostjo U_i je dano z

$$\frac{U_o}{U_i} = \frac{Z_2}{Z_1 + Z_2} = \frac{R_2 \cdot (1 + j\omega R_1 C_1)}{R_2 \cdot (1 + j\omega R_1 C_1) + R_1 \cdot (1 + j\omega R_2 C_2)} \quad (6.4)$$

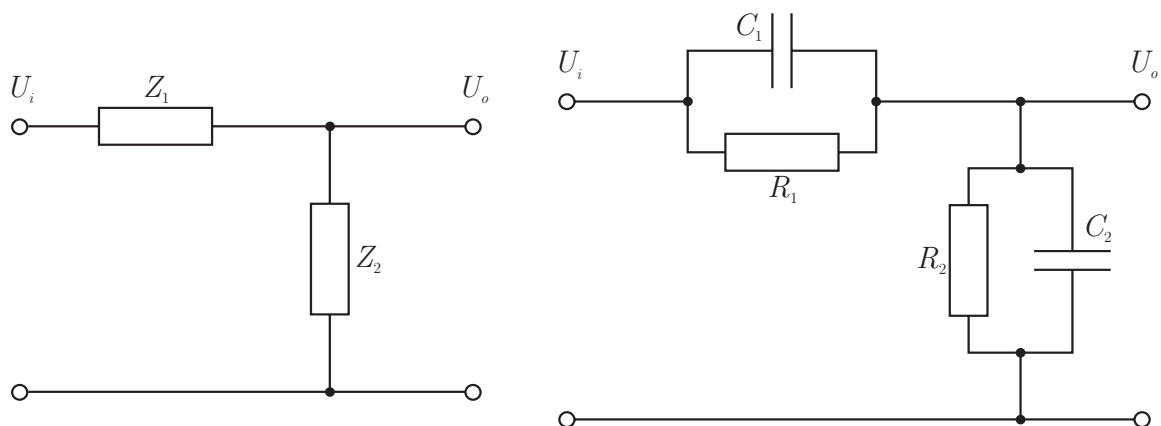
Če izberemo, da

$$R_1 C_1 = R_2 C_2$$

dobimo

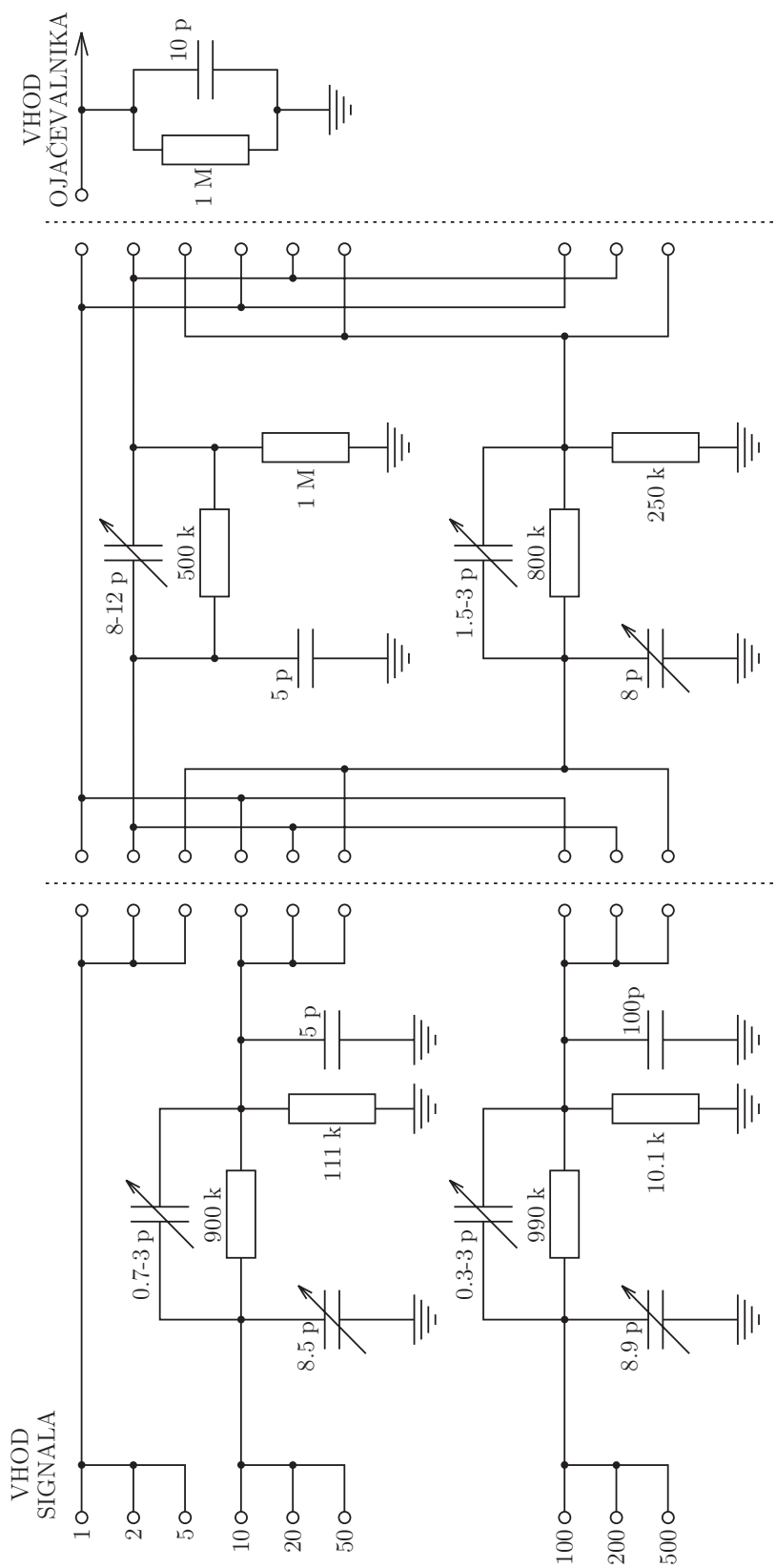
$$\frac{U_o}{U_i} = \frac{R_2}{R_1 + R_2}. \quad (6.5)$$

Vhodna upornost za večino osciloskopov je $1\text{ M}\Omega \pm 1\%$. Vhodna kapacitivnost pa je od 10 pF do 80 pF .



Slika 6.2: Enostopenjski kompenzirani delilnik

Slika 6.3 prikazuje izvedbo napetostnega delilnika, ki deli z 1, 2, 5, 10, 20, 50, 100, 200 in 500. Vhodna upornost je $1\text{ M}\Omega$, vhodna kapacitivnost pa 10 pF na vseh območjih. Nastavljivi kondenzatorji so potrebni za kompenzacijo in nastavitve vhodne kapacitivnosti na vsakem območju.



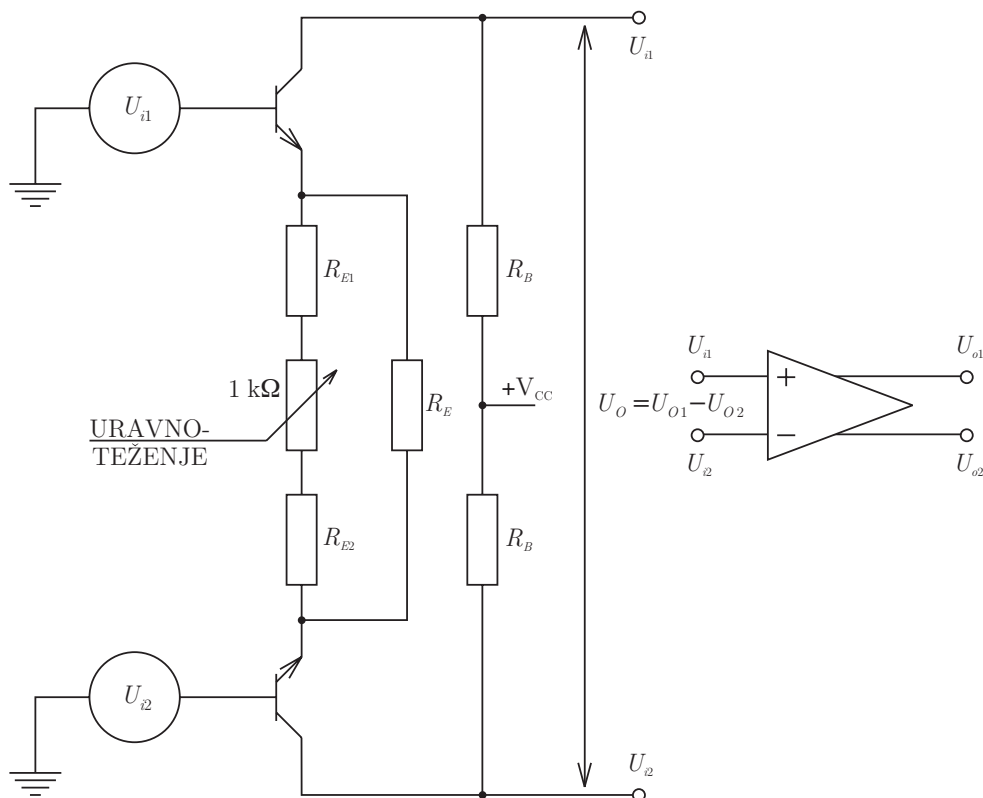
Slika 6.3: Tipična izvedba visokoohmskega napetostnega delilnika

Katodna cev z elektrostatičnim odklonom ima dve plošči za vertikalni odklon, ki sta krmiljeni protitaktno. Vertikalni ojačevalnik mora imeti torej diferencialni oziroma protitaktni izhod, vhod pa je lahko diferencialen oziroma simetričen ali pa tudi nesimetričen (single ended). Slika 6.4 prikazuje diferencialni ojačevalnik s protitaktnim izhodom. Za ta ojačevalnik lahko definiramo protifazno ojačenje A_p , ki je

$$A_p = \frac{U_{o1} - U_{o2}}{U_{i1} + U_{i2}} \quad (6.6)$$

kjer je U_o izhodna napetost, kot je definirana na sliki 6.4, napetost U_{i1} pa je enaka protifazni napetosti U_{i2}

$$U_{i1} = -U_{i2} \quad (6.7)$$



Slika 6.4: Diferencialni ojačevalnik s simetričnim izhodom

Sofazno ojačenje je definirano

$$A_s = \frac{U_{o1} - U_{o2}}{U_i} \quad (6.8)$$

kjer sta napetosti U_{i1} in U_{i2} enaki, v fazi

$$U_i = U_{i1} = U_{i2}. \quad (6.9)$$

Razmerje med protifaznim in sofaznim ojačanjem imenujemo rejekcijski faktor

$$CMRR = 20 \log \left(\frac{A_p}{A_s} \right). \quad (6.10)$$

Ta faktor naj bo za kvalitetne diferencialne ojačevalnike čim večji (80-120 dB).

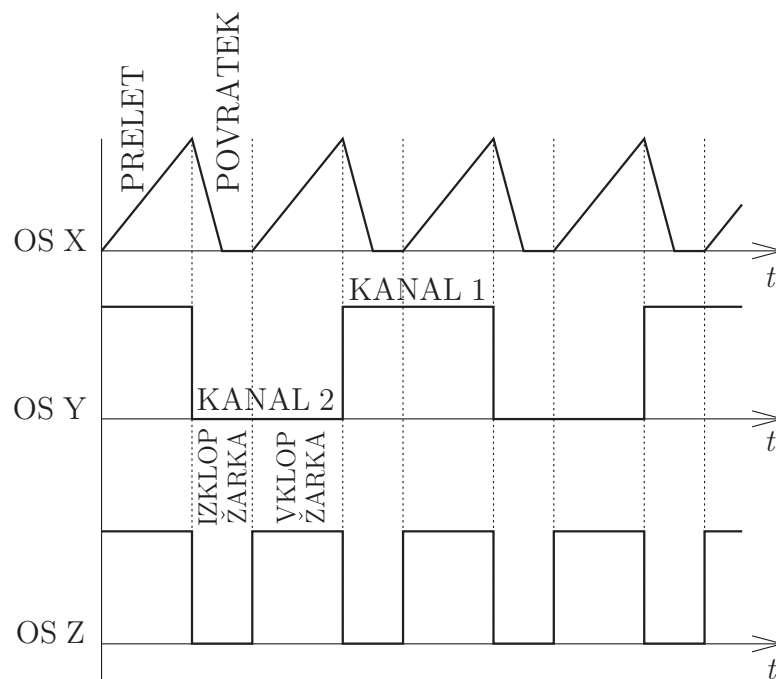
Večkanalni vertikalni sistemi

Večkanalni vertikalni sistemi so zelo koristni, saj omogočajo istočasno opazovanje in primerjanje več signalov. Običajno je horizontalna časovna skala enala za vse kanale, nastavitve za amplitudo in pozicijo pa so ločene za posamezne kanale.

Za istočasni prikaz dveh kanalov uporabljamo dva načina časovnega multipleksa

- izmenjalni (Alternate) in
- sekalni (Chopped).

Razmere pri izmenjalnem načinu prikazuje slika 6.5. Pri tem načinu se oba vertikalna ojačevalnika izmenjujeta tako, da se prikaže na zaslonu najprej slika kanala 1 v času celotnega preleta žarka, za drugi prelet žarka pa se vključi kanal 2.



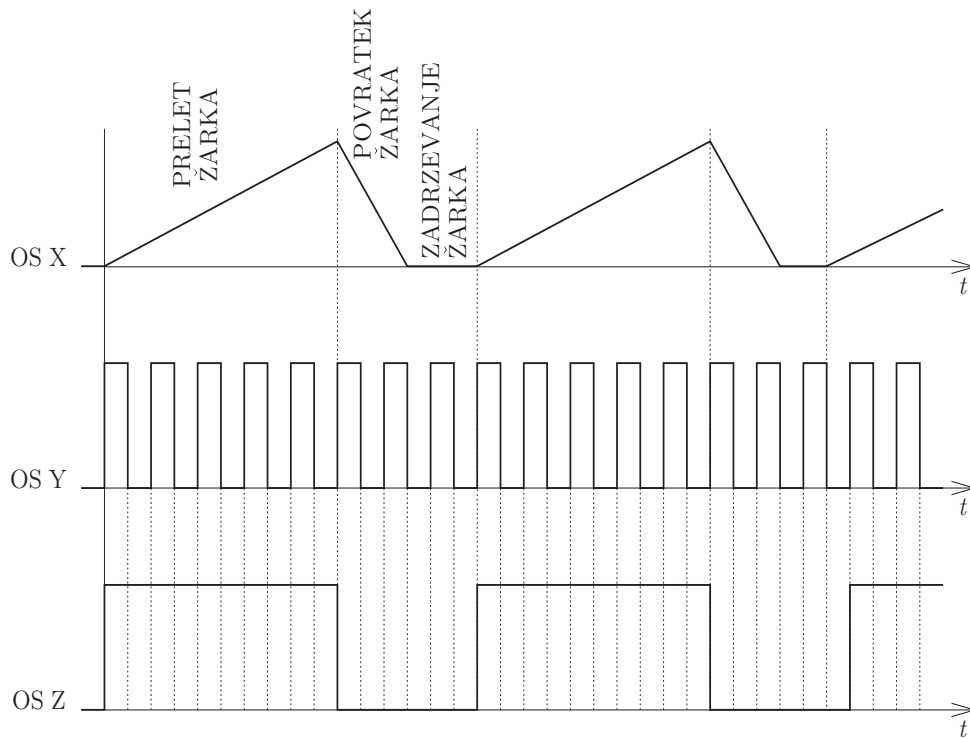
Slika 6.5: Razmere za dvokanalni ojačevalnik v izmenjevalnem načinu

Razumljivo je, da bomo izmenjalni način uporabili za opazovanje visokofrekvenčnih pojavov, kjer je ponavljanje slike večje od 50 na sekundo, tako, da dobimo vtis, da sta oba kanala istočasno vključena in da slika miruje.

Kadar pa želimo opazovati počasne pojave in uporabljamo majhne hitrosti preleta žarka, uporabljamo metodo sekanja. V tem načinu se prvi in drugi kanal izmenjujeta v kratkih časovnih presledkih. Časovne razmere pri takem delovanju prikazuje slika 6.6.

Dvokanalni osiloskopi nudijo še naslednje možnosti kombiniranja kanalov *A* in *B*

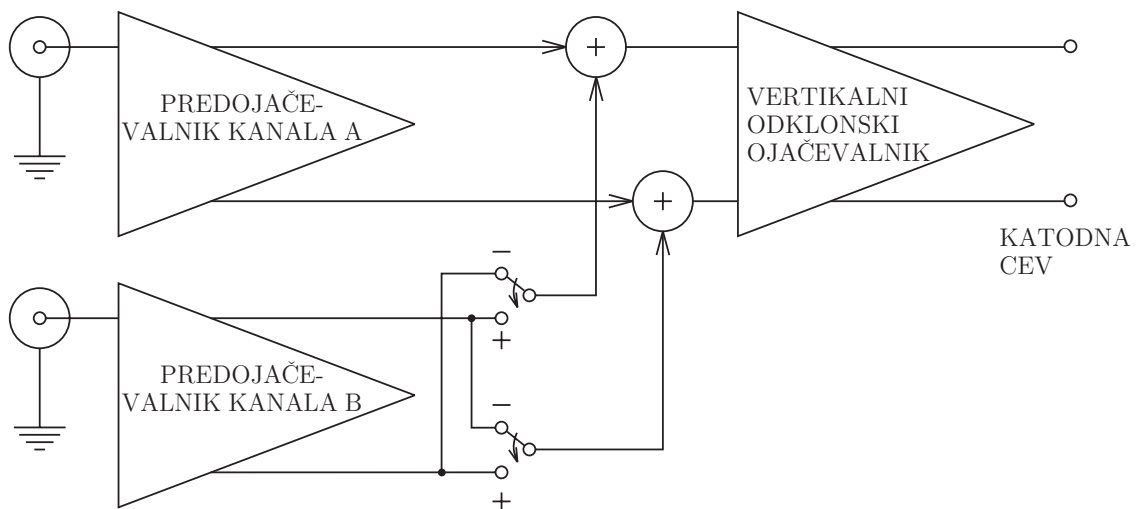
- samo kanal *A* (channel *A*)



Slika 6.6: Razmere za dvokanalni ojačevalnik pri razsekanem delovanju

- samo kanal B (channel B)
- oba kanala izmenično (Alternate)
- oba kanala sekano (Chop)
- vsota obeh kanalov (A+B)

Seštevanje in odštevanje obeh kanalov izvedemo s pretikalom, kot kaže slika 6.7.



Slika 6.7: Seštevanje in odštevanje kanalov A in B

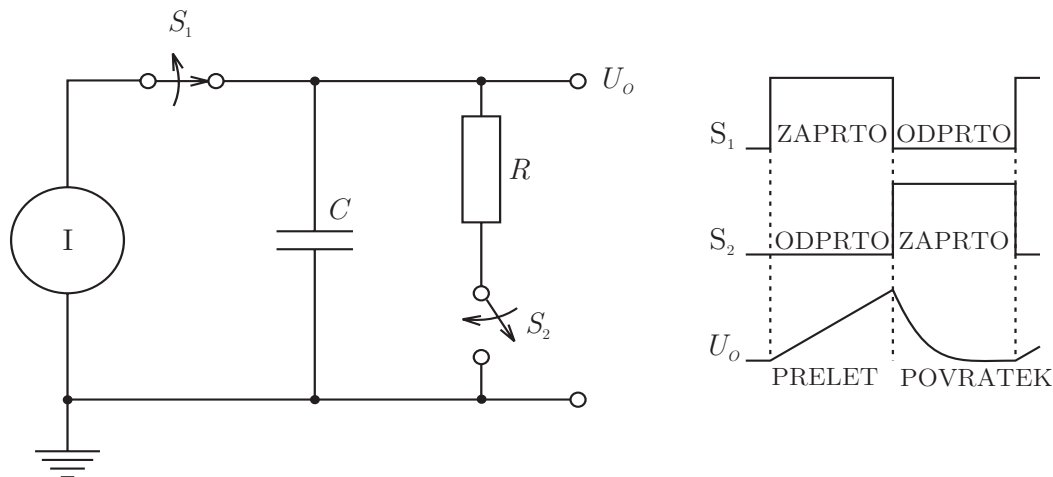
6.1.2 Horizontalni sistem

Časovna baza

Za časovno bazo potrebujemo generator napetosti, ki linearno narašča s časom. Tako žagasto napetost vodimo na horizontalni odklonski sistem katodne cevi.

Dobra časovna baza pokriva območje od 10 ns na delec do 5 ns na delec, s točnostjo boljšo od 3% in linearnostjo boljšo od 1%. S povečanjem ojačanja horizontalnega ojačevalnika s faktorjem 10 taka časovna baza doseže 1 ns na delec.

Vezje na sliki 6.8 generira žagasto napetost, ki je priključena diferencialno na odklonske plošče katodne cevi. Ko napetost linearno narašča, se kondenzator polni s konstantnim tokom in se pomika žarek od leve proti desni strani zaslona. Zaporni ojačevalnik vključi svetlobo žarka v času preleta žarka. V času povratka žarka, ko se kondenzator prazni, pa zaporni ojačevalnik izključi svetlobo žarka.



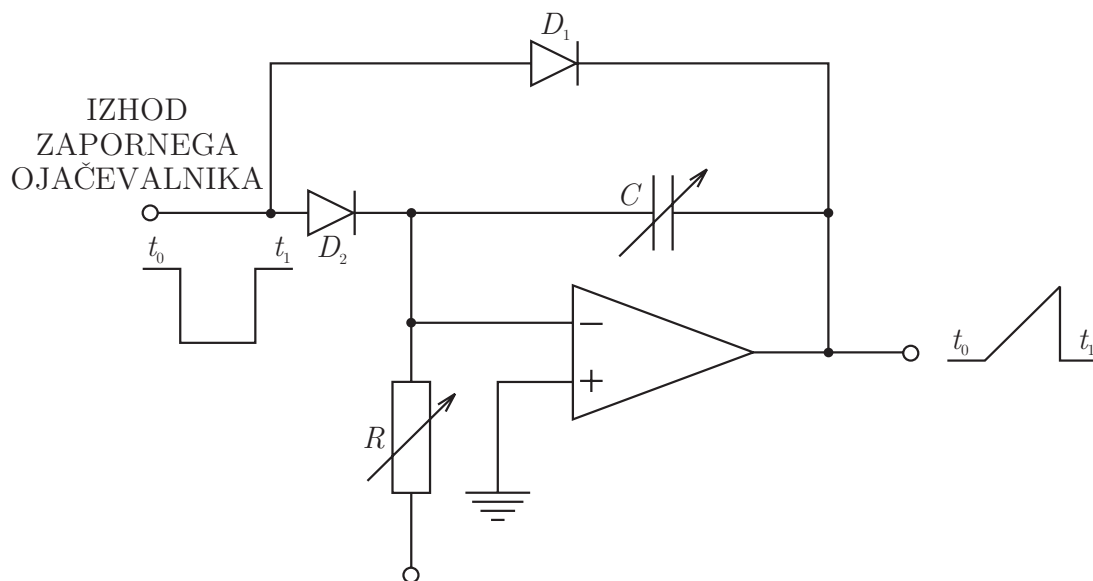
Slika 6.8: Vezje za generacijo žagaste napetosti

Za generacijo žagaste napeosti uporabimo Millerjev integrator, ki pretvarja stopničasto funkcijo v žagasto. Slika 6.9 shematsko prikazuje izvedbo Millerjevega integratorja.

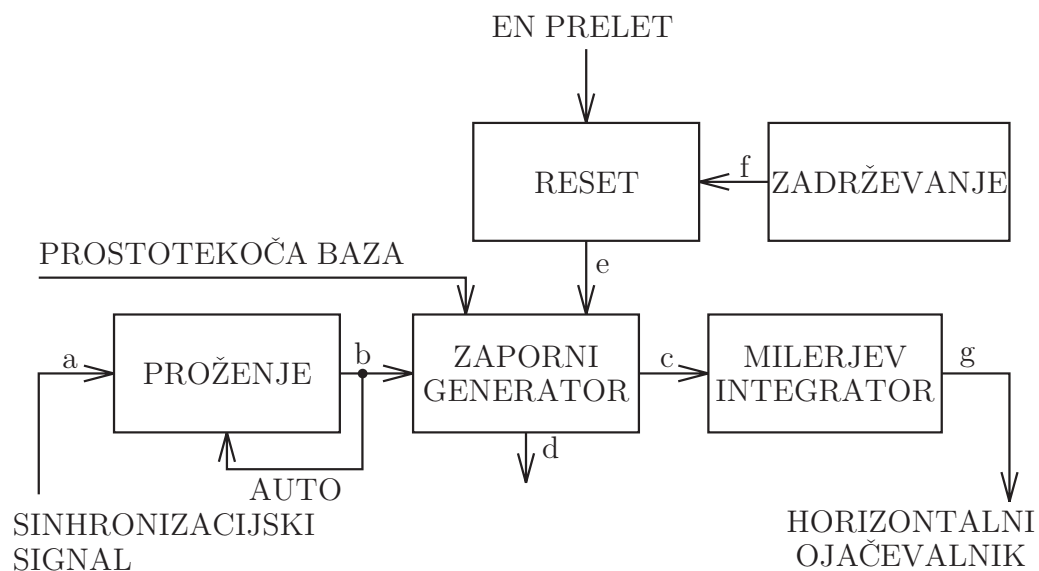
Najpomembnejše elemente časovne baze prikazuje slika 6.10. Enota za proženje generira sinhronizacijske impulze tako, da iz vertikalnega ojačevalnika ali pa iz zunanjšega izvora vodi napetost na komparator, ki mu lahko spreminjamo nivo proženja.

Sinhronizacijski impulzi prožijo zaporni generator (gate generator) s katerim krmilimo Millerjev integrator. Ko je prelet končan, se sproži Schmittov trigger, ki vrne zaporni generator v začetno stanje po preteku zadrževalnega časa (Hold off).

Običajno vključuje vezje še enoto, imenovano Auto, ki po preletu določenega časa po preletu avtomatsko generira sinhronizacijski signal, če ni bilo nobenega signala iz vertikalnega ojačevalnika ali iz zunanjšega sinhronizacijskega vhoda. Ta čas je običajno 20 ms. Tak način riše ničelno linijo na zaslonu osciloskopa, če ni vertikalnega signala.



Slika 6.9: Generator žagaste napetosti

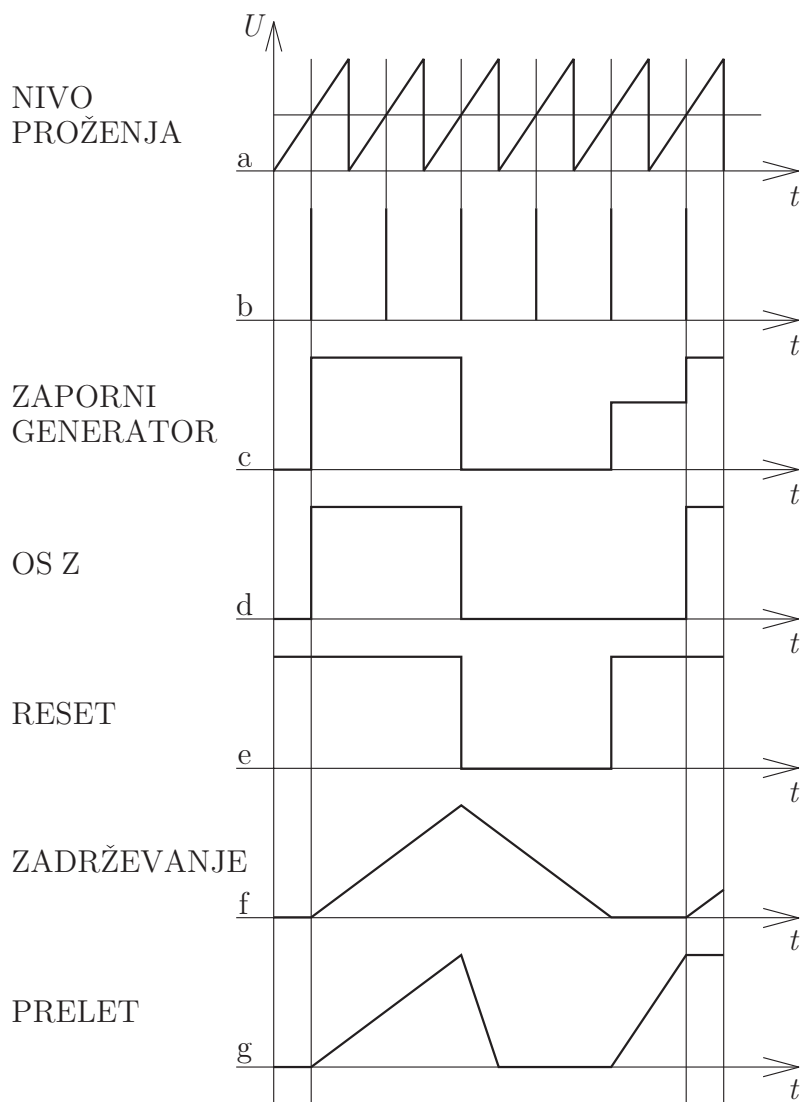


Slika 6.10: Blok shema časovne baze

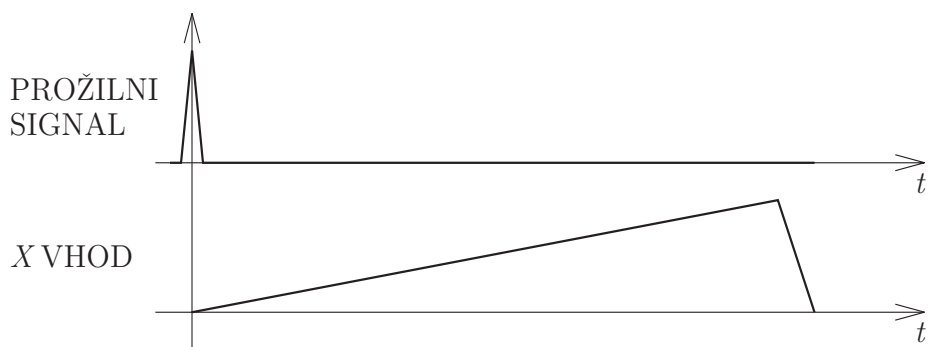
Načini preletov

Načine preletov lahko opredelimo na:

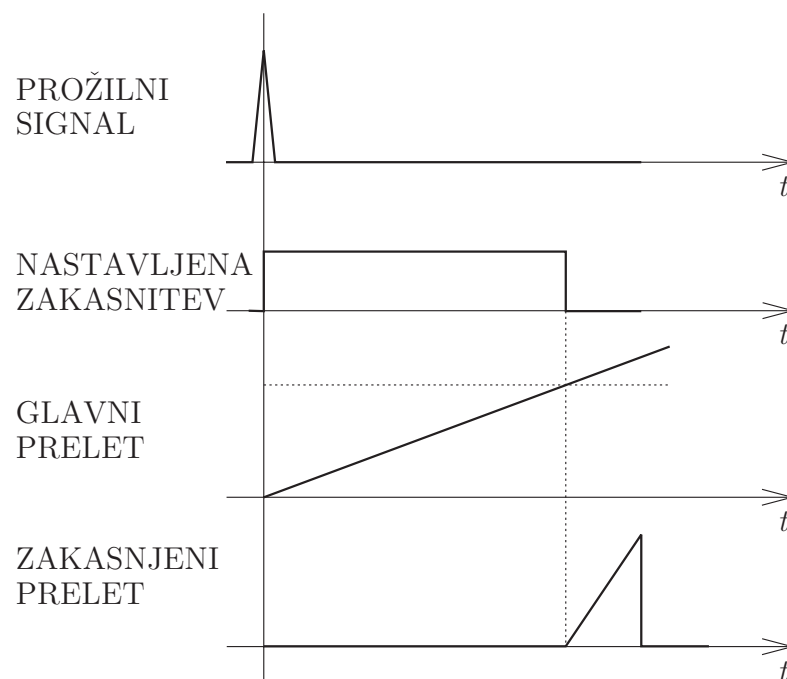
- ena časovna baza (slika 6.12)
- dve časovni bazi; zakasnjena način
 - časovna zakasnitev (delay sweep), slika 6.13



Slika 6.11: Časovni poteki v posameznih točkah časovne baze

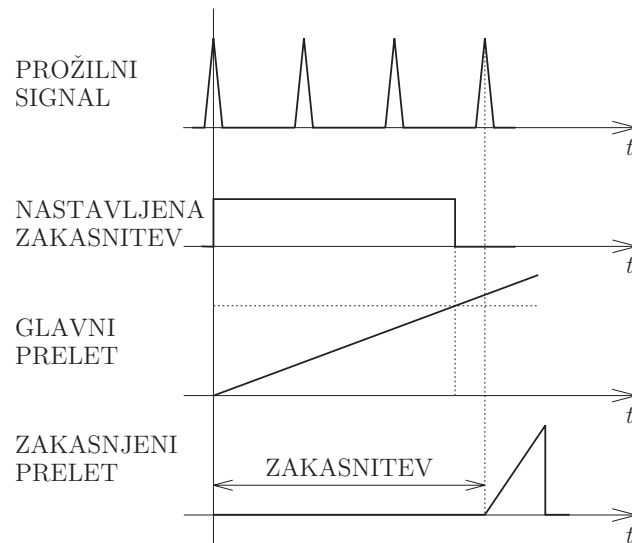


Slika 6.12: Potek žagaste napetosti za eno časovno bazo



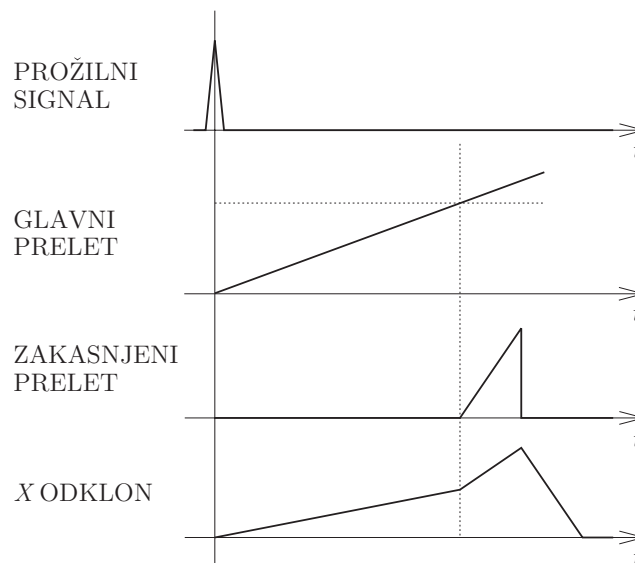
Slika 6.13: Potek žagastih napetosti za glavno in zakasnjeno časovno bazo

– zakasnitev proženja (triggerable after delay interval), slika 6.14



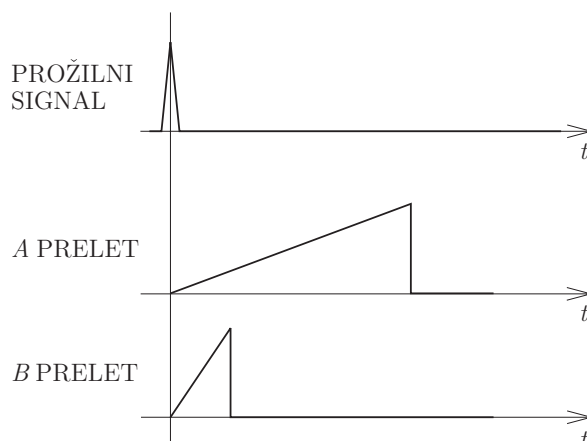
Slika 6.14: Potek žagastih napetosti za glavno in zakasnjeno časovno bazo s proženjem

- dve časovni bazi; mešalni način (mixed sweep), slika 6.15



Slika 6.15: Potek žagaste napetosti za mešani način

- dve časovni bazi; preklopni način, slika 6.16

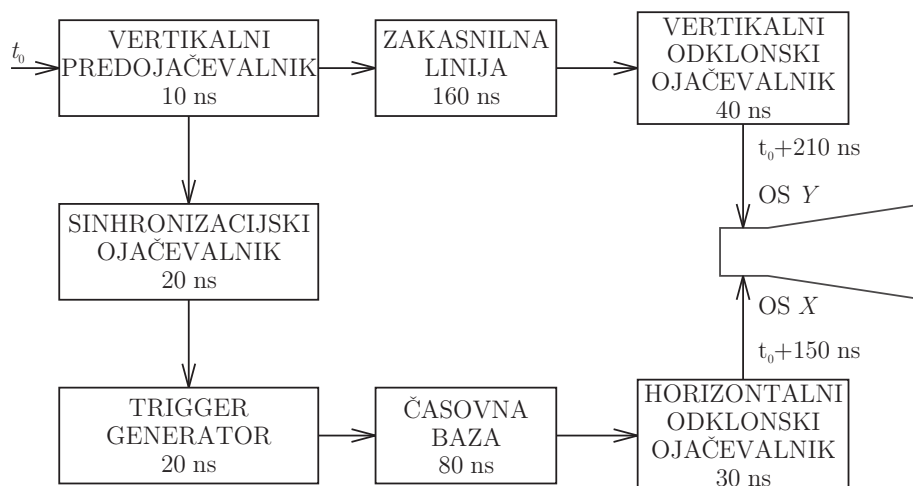


Slika 6.16: Preleta obeh časovnih baz

6.1.3 Zakasnilna linija

Namen zakasnilne linije je, da zakasni vertikalni signal za toliko časa, da se sproži horizontalni prelet žarka.

Na sliki 6.17 so navedeni tipični zakasnilni časi posameznih enot osciloscopa.

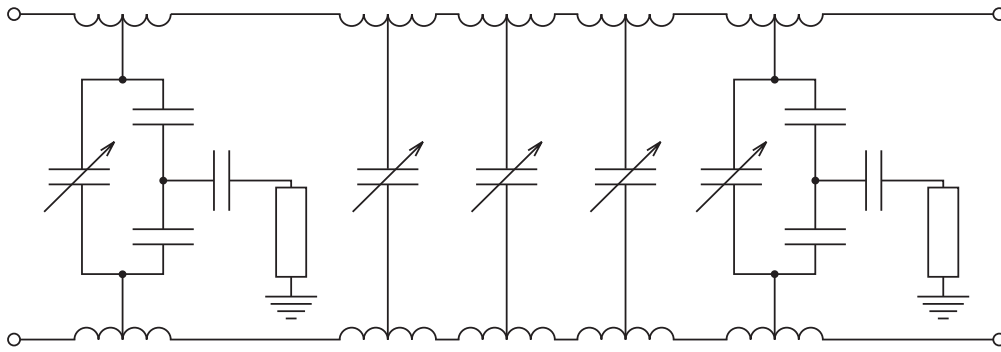


Slika 6.17: Zakasnitev posameznih enot osciloscopa

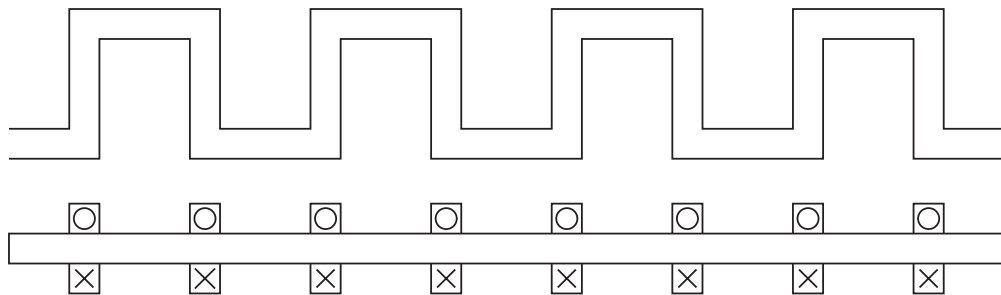
Prve zakasnilne linije so bile zgrajene iz koncentriranih elementov, kot kaže slika 6.18.

Dandanes se zakasnilna linija izvede kar na tiskanem vezju, kar prikazuje slika 6.19.

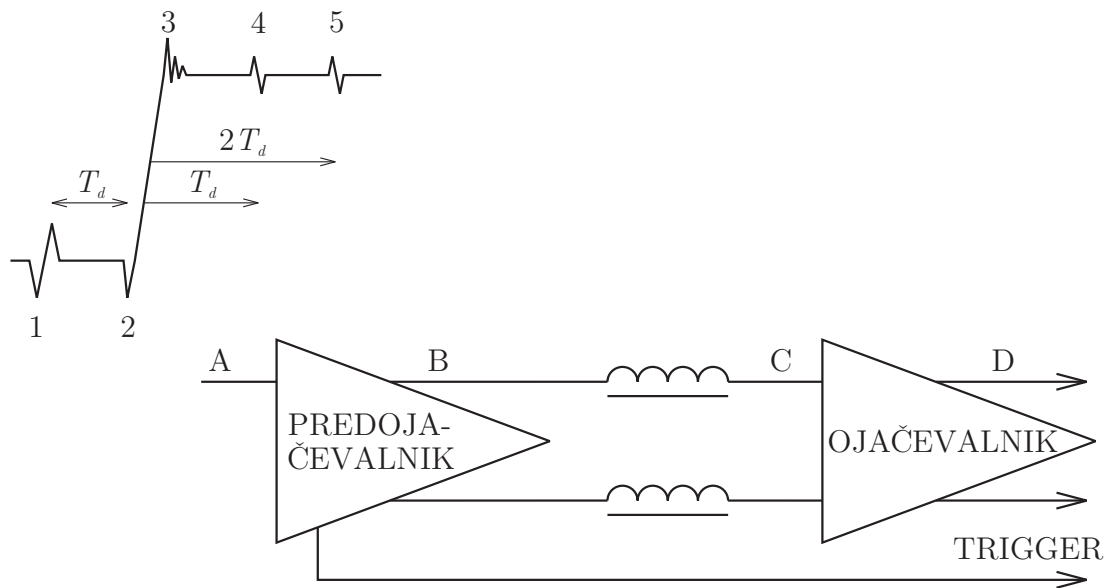
Zakasnilna linija vnese napake, ki jih kaže slika 6.20:



Slika 6.18: Zakasnilna linija s koncentriranimi elementi



Slika 6.19: Zakasnilna linija na tiskanem vezju



Slika 6.20: Napake zakasnilne linije

- napaka 1 nastane zaradi nezakasnjenega sklopa med točko A in D, ki je kapacitiven ali pa zaradi segrevanja linije,
- napaka 2 se imenuje predvzpon, nezveznost, ki nastane zaradi nepravilnih faznih zakasnitev,
- napaka 3 se imenuje predvzpon in zvonjenje. Obe napaki sta funkciji konstrukcije zakasnitve linije in zaključitvenih impedanc,
- napaka 4 nastane zaradi sklopa med točko D in točko A,

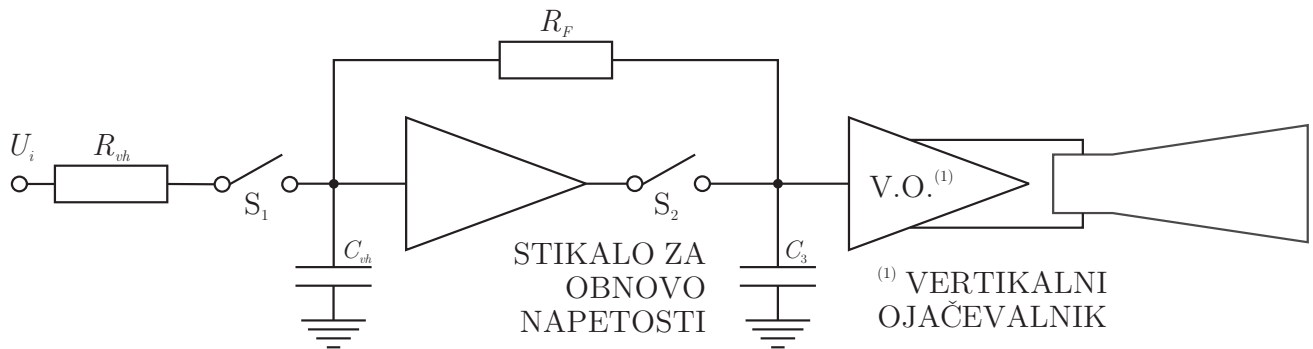
- napaka 5 pa nastane zaradi nepravilne zaključitve linije.

6.2 Osciloskopi z vložki

Osciloskopi z vložki omogočajo veliko prožnost in razne meritve. Običajno vsebuje glavno ogrodje (main frame) poleg napajanja in katodne cevi še horizontalni ojačevalnik in zaporni ojačevalnik, menjati pa je možno razne vertikalne ojačevalnike in časovne baze.

6.3 Vzorčni osciloskop

Vertikalni vzorčevalnik prikazuje slika 6.21.



Slika 6.21: Blok shema vertikalnega vzorčevalnika

Vežje deluje takole: v trenutku vzorčenja se sklensko stikalo S_1 in napolni kondenzator C_{vh} vendar le na malo procentov vhodne vrednosti, ker je stikalo odprto le za kratek čas. Nato se vklopi stikalo S_2 , ki ostane sklenjeno dalj časa, tako, da se kondenzator popolnoma napolni. Ojačanje ojačevalnika je tako prirejeno, da se kondenzator C_s napolni na vhodno napetost. Napetost na kondenzatorju C_s vodimo preko upora R_F nazaj tako, da na vhodno napetost napolnimo še vhodno kapacitivnost C_{vh} . Tako detektiramo pri naslednjem vzorcu le spremembo nivoja.

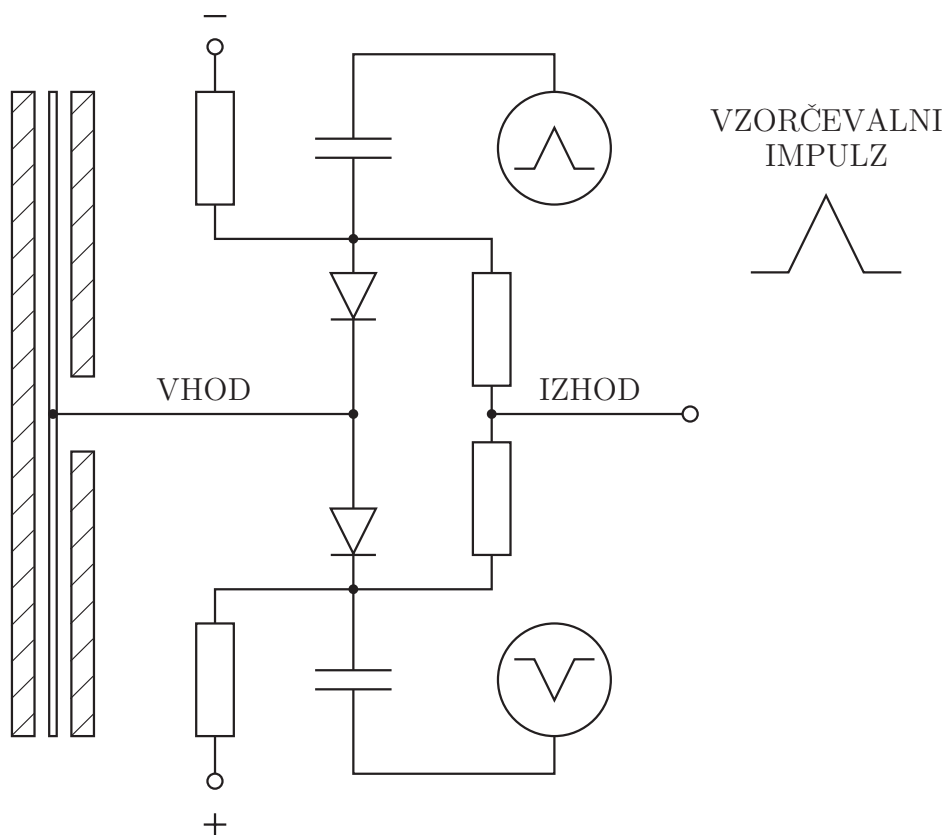
Primer:

Denimo, da je vhodna napetost 1 V. V trenutku vzorčenja nabijemo vhodni kondenzator le na 5%, torej na 0.05 V. Ojačanje ojačevalnika je 20, tedaj je na izhodu ojačevalnika 1 V, torej napolnimo kondenzator C_s na 1 V. Preko povratnega upora R_F pa nabijemo še vhodni kondenzator na 1 V.

Slika 6.22 prikazuje izvedbo vzorčnega stikala.

Učinkovitost vezja definiramo z razmerjem med vhodno napetostjo in napetostjo na vhodnem kondenzatorju po vzorčenju, če je bila prej napetost na kondenzatorju 0 V

$$\eta = \frac{U_{vz}}{U_{vh}} \quad (6.11)$$



Slika 6.22: Izvedba vzorčnega stikala

Mejna frekvenca vezja je predvsem funkcija hitrosti vzorčevalnih diod in časovne konstante vzorčevalnika.

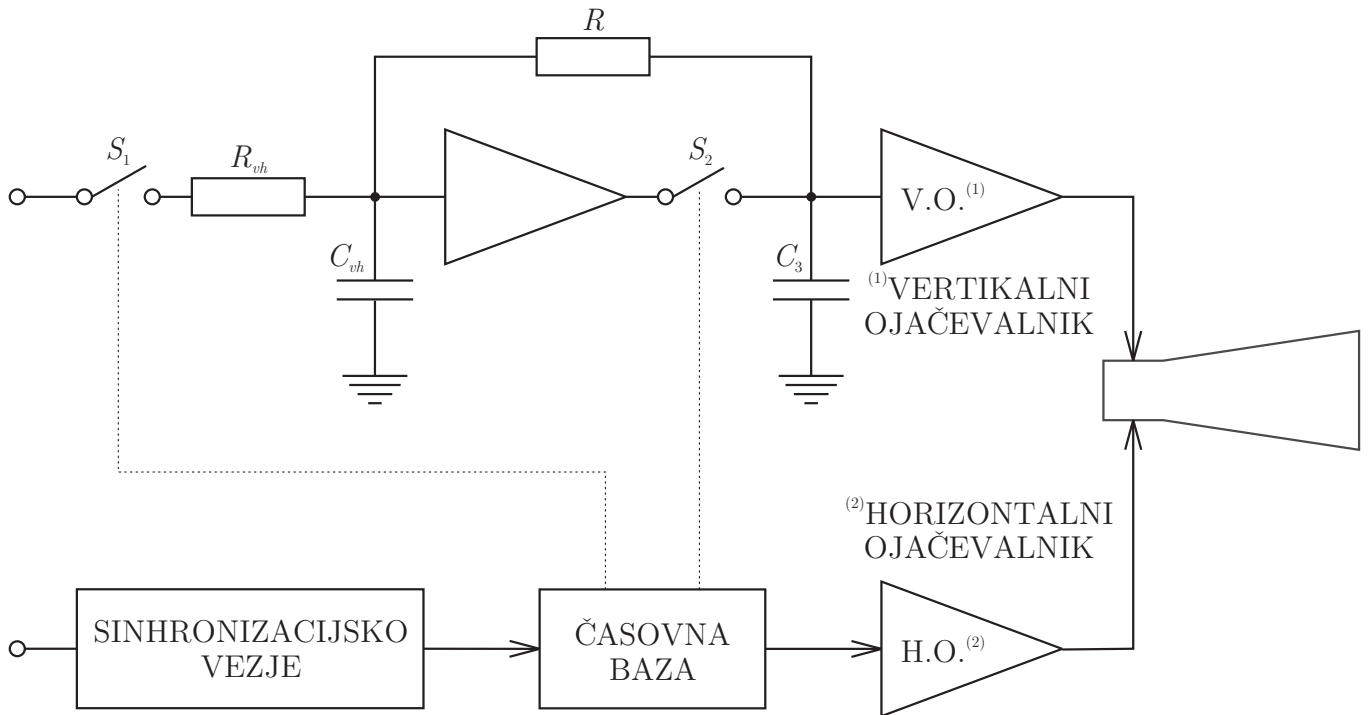
6.3.1 Časovna baza

Časovna baza se pri vzorčnem osciloskopu razlikuje od običajne, saj mora poleg pomika žarka generirati še komando za vzorčenje za vertikalno vezje. Blok shemo vzorčevalnega osciloskopa kaže slika 6.23.

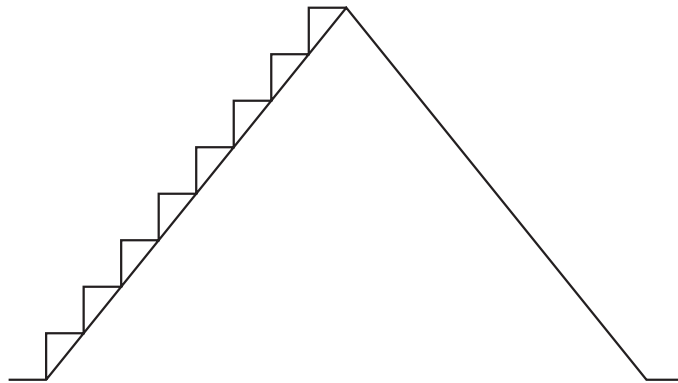
Horizontalni sistem sestoji iz sinhronizacijskega vezja in časovne baze, ki krmili vertikalni vzorčevalnik. Časovna baza generira žagasto in stopničasto napetost. Koincidenca med žagasto in stopničasto napetostjo daje vzorčne komande, slika 6.24. Točka na zaslonu se torej ne pomika zvezno ampak poskakuje od vzorca do vzorca.

6.3.2 Naključno vzorčenje

Razmere, ki vladajo pri osciloskopu z naključnim vzorčenjem, ponazarja blok shema na sliki 6.25 in časovni diagram na sliki 6.26.



Slika 6.23: Blok shema vzorčevalnega osciloskopa



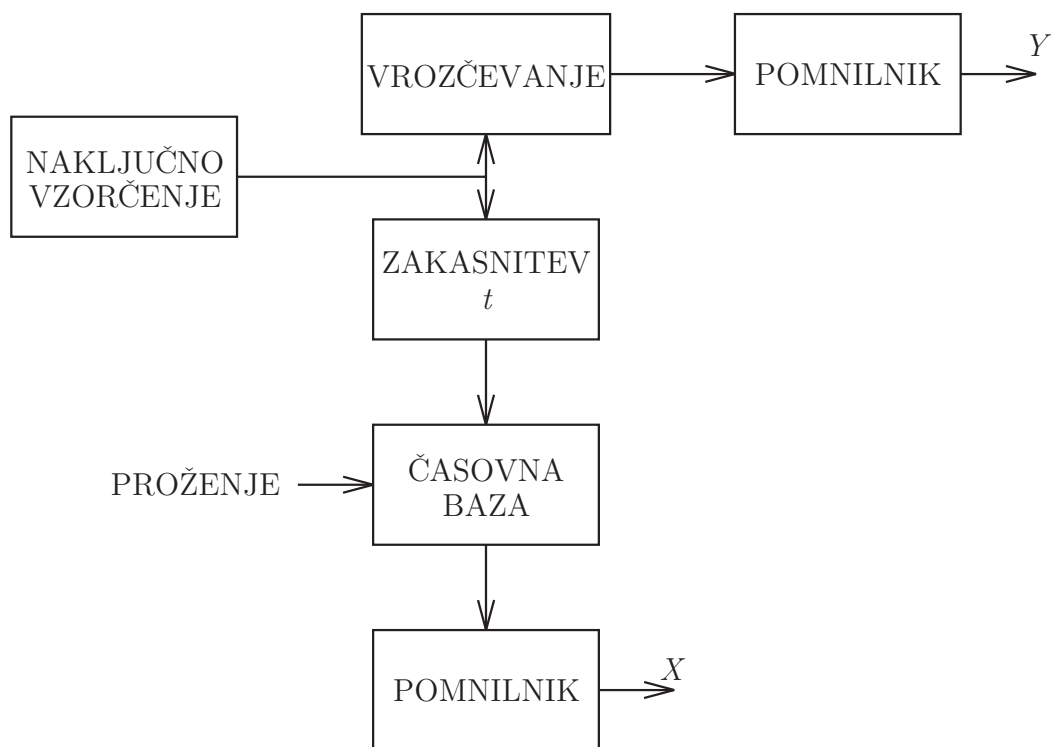
Slika 6.24: Potek žagaste napetosti za vzorčni osciloskop

6.4 Osciloskop s spominsko cevjo

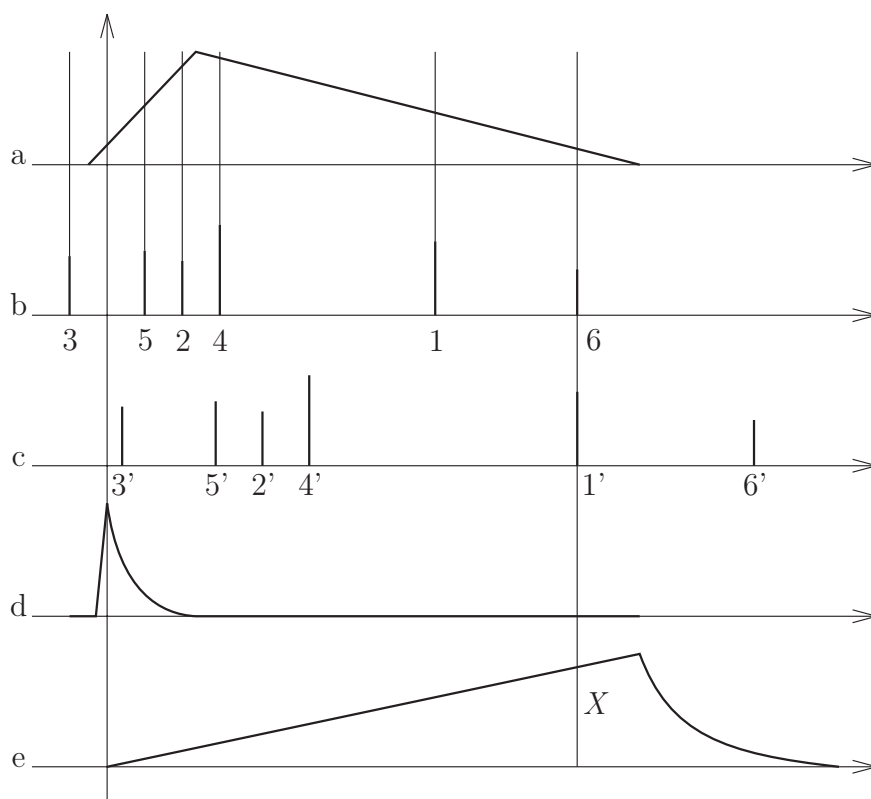
Dva principa pomnenja ločimo pri spominski cevi:

- pomnenje na fosforju
- pomnenje na situ

Oba principa lahko služita za SCAN pretvornike, pri cevi s sitom pa imamo lahko tudi spremenljivo perzistenco in svetljivost. Pri cevi s fosfornim pomnilnikom pa lahko istočasno razdelimo zaslon na področje pomnenja in konvencionalnega delovanja.

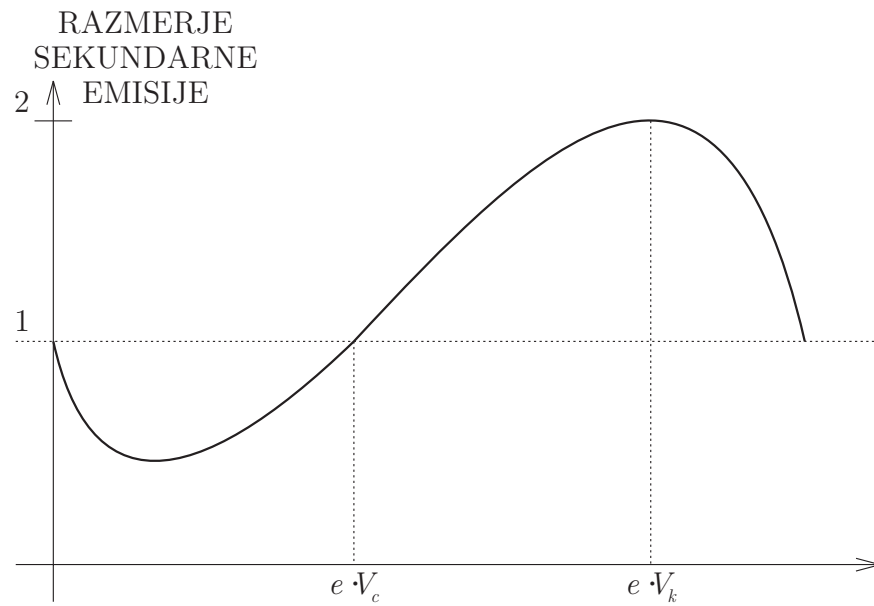


Slika 6.25: Blok shema vzorčnega osciloskopa z naključnim vzorčenjem



Slika 6.26: Časovni diagram naključnega vzorčenja

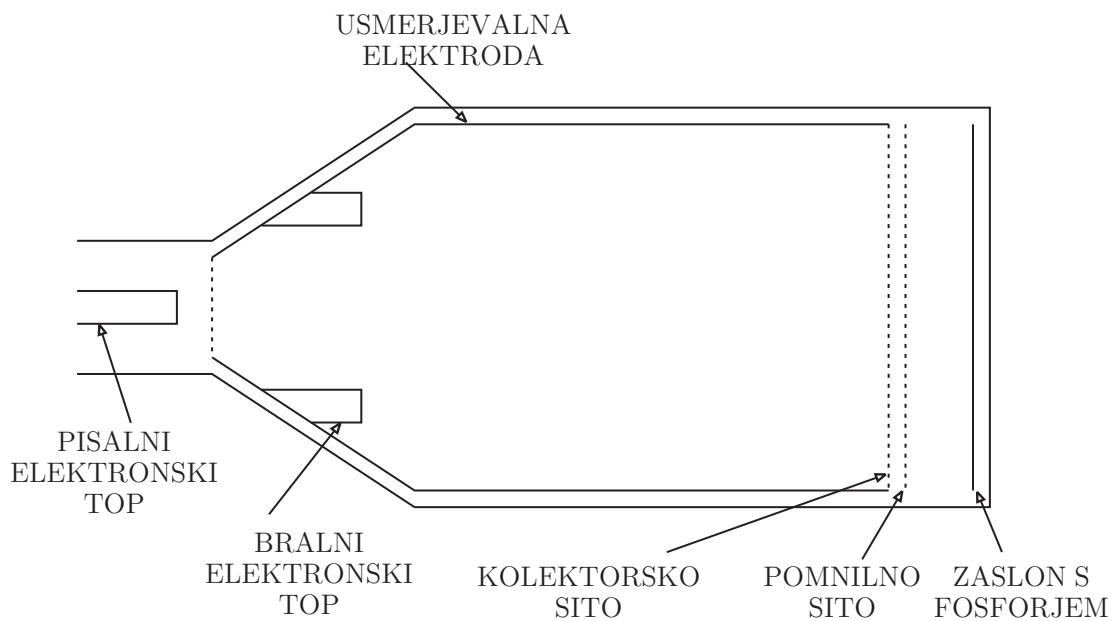
Princip delovanja: Slika 6.27 prikazuje razmerje sekundarne emisije v odvisnosti od energije vpadnih elektronov.



Slika 6.27: Sekundarna emisija v odvisnosti od energije vpadnih elektronov

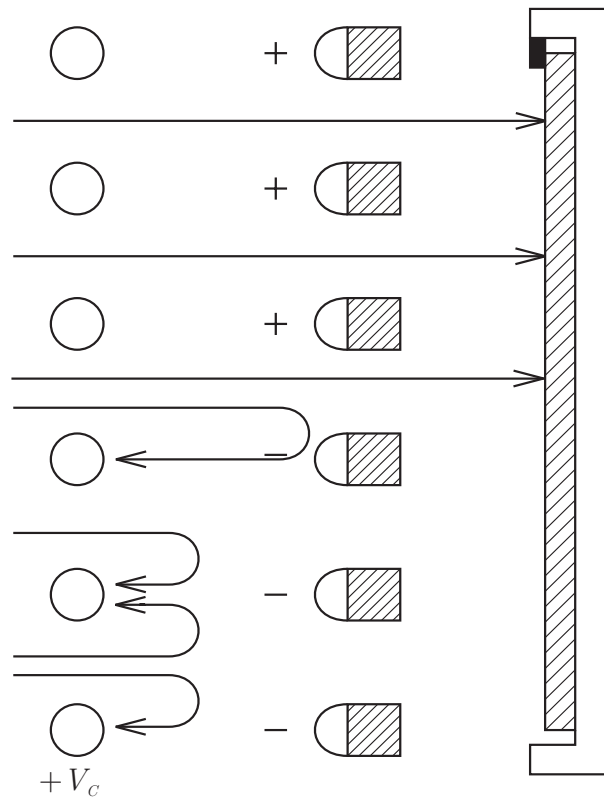
Vidimo, da je pri energiji $e \cdot V_k$ to razmerje veliko večje kot 1, tedaj bo dielektrik izgubil elektrone in ostal pozitivno naelektren.

Slika 6.28 prikazuje presek katodne cevi s pomnilnim sistemom.



Slika 6.28: Pomnilni sistem katodne cevi

Elektronski top pisalnega snopa usmerja elektrone skozi kolektorsko sito na pomnilno sito. Energija teh elektronov je tolikšna, da je razmerje močno nad 1. Tedaj se torej slika zapiše v obliki pozitivnih nabojev na dielektriku, slika 6.29.



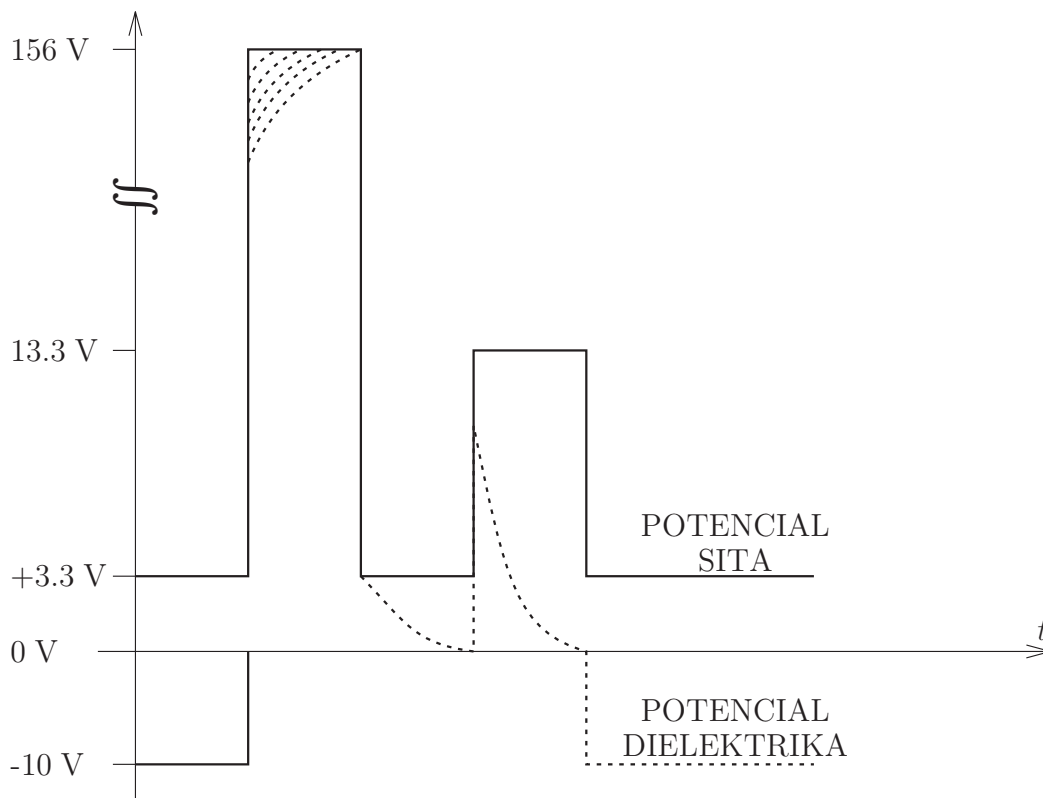
Slika 6.29: Branje slike pozitivnih nabojev

Elektroni bralnega snopa imajo majhno energijo. Usmerjevalna elektroda jih usmeri v obliki oblaka, ki potuje paralelno. Tisti elektroni, ki naletijo na pozitivno naelektreno sito, se prebijejo do fosforja in tam ustvarijo sliko, tisti, ki pa naletijo na negativno naelektreno sito, pa se obrnejo in pristanejo na kolektorskem situ, ki ima ustrezen pozitiven potencial.

Sčasoma se vzorec, nakopičen v obliki pozitivnega naboja, degradira zaradi tega, ker se nakopičijo pozitivni ioni, ki jih generira bralni oblak elektronov. Tedaj postane ves zaslon osvetljen. Ta pojav se imenuje pozitivno senčenje.

Če želimo sliko zbrisati, priključimo pozitiven impulz na pomnilno sito. Sedaj ima pomnilno sito enak potencial kot kolektorsko, zaradi kapacitivnega sklopa pridobi ta potencial tudi dielektrik. Elektroni imajo sedaj energijo, ki zadošča za razmerje sekundarne emisije večje od ena, zato pridobi ves dielektrik sčasoma pozitiven potencial, enak napetosti kolektorskega sita. Višja pozitivna napetost ni mogoča, ker se vsa sekundarna emisija vrne nazaj na sito.

Ko se napetost pomnilnega sita vrne na izhodiščni potencial, se zaradi kapacitivnega sklopa na isti potencial postavi tudi dielektrik, ki pa si začne počasi pridobivati potencial 0 V, potencial bralnega topa, saj je sedaj sekundarna emisija manjša od 1. Ponovno dvignemo potencial sita na +13.3 V, temu sledi dielektrik, vendar hitro (v 200 ms) doseže potencial 0 V. Nato ponovno vrnemo sito v izhodiščni potencial, zaradi kapacitivnega sklopa ima sedaj ves dielektrik negativen potencial, slika 6.30.



Slika 6.30: Razmere pri brisanju

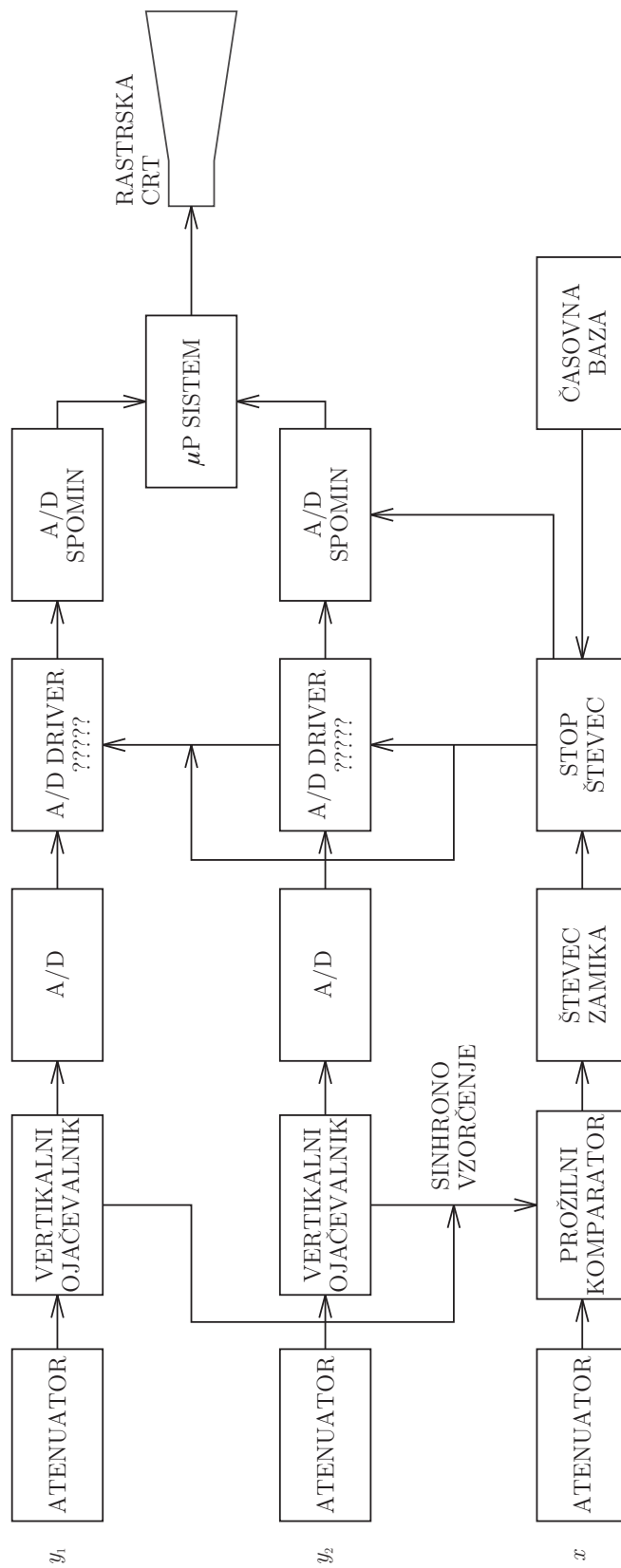
6.5 Digitalni osciloskop

6.5.1 Delovanje digitalnega osciloskopa

Čeprav je tehnologija izdelave analognih osciloskopov dosegla zavidljivo raven so nekatere dodatne nove funkcije, ki jih omogočajo digitalni osciloskopi popolnoma zasenčile uporabo analognih osciloskopov. Takšne funkcije so:

- pomnjenje signalov za poljuben čas,
- kontrola nastavitvev z računalnikom,
- avtomatizacija meritev,
- dodatne funkcije.

Kljub množici dodatnih funkcij in cenenosti moramo za učinkovito uporabo dobro poznati delovanje digitalnega osciloskopa, saj le tako lahko preprečimo napake pri merjenju ki so zaradi specifičnosti naprave povsem mogoče. Slika 6.31 kaže blokovni diagram digitalnega osciloskopa. Primerjava z blokovnim diagramom analognega osciloskopa pokaže, da je pot signala do vertikalnega odklonskega sistema katodne cevi ločena od vhodnih ojačevalnikov. Poleg tega namesto krmiljenja katodne cevi z ojačenim vhodnim signalom signal vzorčimo, shranimo in nato rekonstruiramo na zaslonu. Ta koncept sicer ni nov; uporabljali so ga analogni vzorčni osciloskopi.



Slika 6.31: Blokovni diagram digitalnega osciloskopa

Zakaj je bilo potrebno toliko časa, da so se razvili digitalni osciloskopi do te mere kot jih poznamo danes? Predvsem zaradi cene. V preteklosti so bili hitri A/D pretvorniki, pomnilniki, procesorji itd. zelo dragi in relativno počasni. Z razvojem tehnologije se je situacija pomembno spremenila.

Nekaj osnovnih konceptov digitalizacije

Preden opišemo delovanje digitalnega osciloskopa, si na kratko oglejmo nekatere koncepte, na katerih sloni. Pomembne karakteristike signalov so: frekvenca, faza in kvaliteta signala, ki jo določajo oblika in amplituda signala. V originalnem članku iz leta 1924 je Nyquist formuliral teorem, ki pravi:

Če vzorčimo signal s frekvenco $2 \cdot f$, lahko rekonstruiramo signal z najvišjo frekvenco f

Z drugimi besedami, da bi lahko razločili signal s frekvenco f ga moramo vzorčiti najmanj s frekvenco $2 \cdot f$. Ali to pomeni, da moramo vzorčiti najmanj s frekvenco, ki je dvojna glede na pasovno širino osciloskopa? Ne! To bi bila napačna interpretacija vzorčenja. Eden od mejnih pogojev Nyquistovega teorema predpostavlja da mora vzorčenje trajati neskončno dolgo časa v obe smeri, če želimo kompletno rekonstruirati signala iz približno dveh vzorcev na periodo. Ker digitalni osciloskop ne more vzeti neskončnega števila vzorcev v načinu „single shot” in mora še vedno prikazati signal, so proizvajalci morali omejiti velikost števila vzorcev. To omejuje točnost rekonstrukcije. Druga možnost je povečano število vzorcev na periodo (več kot 2). Ker tehnologija omejuje hitrost vzorčenja, so proizvajalci zmanjšali pasovno širino osciloskopa, da bi dobili več vzorcev na periodo. Z drugimi besedami, če vzorčimo le dvakrat v eni periodi omejen čas, omejimo točnost rekonstrukcije signala. S hitrejšim vzorčenjem lahko signal rekonstruiramo bolj točno. Tako nekateri proizvajalci npr. HP in Tektronik omejujejo pasovno širino pri „single-shot” vzorčenju na 4 vzorce na periodo signala pri mejni frekvenci.

Vzemimo analogni osciloskop s pasovno širino 100 MHz. Če nanj priključimo pravokotni signal s frekvenco 100 MHz, na zaslonu vidimo popačeno sinusoido, ki je posledica dejstva, da je pravokotni signal sestavljen iz osnovne in velikega števila oslabljenih višjih harmoničnih komponent.

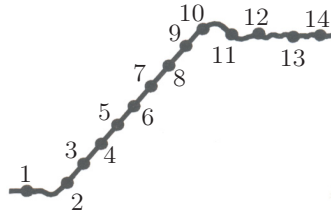
Z vzorčenjem, ki ima mnogo višjo frekvenco kot je frekvenca signala, je rekonstrukcija relativno enostavna; taka situacija nastane, ko je frekvenca signala, ki ga merimo, nižja od pasovne širine osciloskopa. Ko se približujemo pasovni širini, se približujemo le 4 vzorcem na periodo, kar zadošča za rekonstrukcijo sinusoid. Kaj pa če je signal pravokotne oblike? V tem primeru osciloskop omeji pas na 100 MHz, torej je situacija podobna kot pri analognem osciloskopu; A/D pretvornik vzorči in digitalizira popačen sinusni signal. Pri 4 ali več vzorcih na periodo lahko signal na zalonu rekonstruiramo dovolj natančno tudi v omejenem času.

Kako vzorčimo

V principu lahko vzorčimo na 2 različna načina. V realnem času, kar pomeni, da pretvarjamo in shranjujemo vzorce kot se pojavljajo v realnem času pri čemer moramo vzorčiti z zelo visoko frekvenco glede na frekvenco signala. Takemu vzorčenju pravimo *vzorčenje v realnem času*. Druga možnost je da iz vsake periode signala vzamemo enega ali več vzorcev.

Vzorčenje v realnem času

Slika 6.32 prikazuje primer vzorčenja v realnem času. Signal vzorčimo sekvenčno takoj zatem,



Slika 6.32: Vzorčenje v realnem času

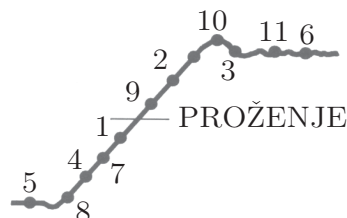
ko se pojavi pogoj za proženje. Večje kot je razmerje med vzorčno frekvenco in signalom, ki ga opazujemo, boljša je rekonstrukcija slike na zaslonu. Nekateri osciloskopi poleg tega še matematično interpolirajo vmesne točke. Vzorčenje v realnem času omogoča prikaz dogodkov, ki so se zgodili pred nastopom pogoja za proženje, kar pomeni, da lahko opazujemo signal v „negativnem času”.

Ponavljajoče vzorčenje

V tem primeru signal na zaslonu sestavimo iz vzorcev, ki jih je osciloskop odvzel pri večkratnem prehodu signala (večkratno proženje). To seveda zahteva, da je signal ponavljajoč oziroma periodičen. Ker smo vzorce dobili iz več period signala to pomeni, da Nyquistov kriterij v tem primeru ne velja direktno; velja tako imenovani splošni Nyquistov teroem, ki določa, pod kakšnimi pogoji lahko navidezno rekonstruiramo signal, ki ima višjo frekvenco od frekvence vzorčenja. Vzorčevalna frekvenca je nižja kot je frekvenca signala; takšen način so uporabljali tako imenovani *vzorčni analogni osciloskopi*. Na tak način je mogoče prikazovati le periodične signale, ki imajo lahko višjo frekvenco, kot je pasovna širina osciloskopa.

Naključno ponavljajoče vzorčenje

Slika 6.33 prikazuje primer naključnega ponavljajočega vzorčenja. V tem primeru osciloskop vzorči



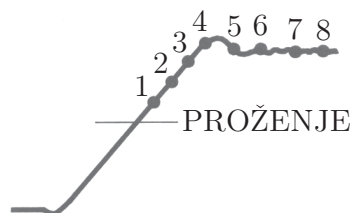
Slika 6.33: Naključno ponavljajoče vzorčenje

konstantno, ne da bi čakal na prožilni signal. Ob vsakem pojavu prožilnega signala osciloskop shrani nekaj vzorcev in si zapomni tudi čas odvzema vzorca glede na prožilni signal. Ob sestavljanju slike se vsak vzorec postavi na ustrezno mesto glede na relativni čas, v katerem je bil odvzet. Ker

so odvzeti vzorci nesinhroni v primerjavi s prožilnim signalom, je vzorčenje naključno glede na čas proženja. Ker vzorce odvezemamo pred in po prožilnem signalu, pomeni da lahko opazujemo dogodke v „negativnem času“.

Sekvenčno vzorčenje

Slika 6.34 prikazuje primer sekvenčnega vzorčenja. Tudi v tem primeru signal sekvenčno vzorčimo,



Slika 6.34: Primer sekvenčnega vzorčenja

vendar na drugačen način. Vzorčevalnik čaka na prožilni signal, vzorec pa odvzame ob vnaprej določenem času, ki je določen z nastavitvami osciloskopa. Ob vsakem naslednjem pojavu prožilnega signala se zakasnitev poveča za vnaprej določen čas, ki je določena z nastavitvami osciloskopa in narašča z vsakim novim pojavom prožilnega signala. Po določenem številu prehodov lahko osciloskop rekonstruira sliko na zaslonu tako, da zloži ustrezne vzorce na ustrezno mesto. Takšno vzorčenje je različno od prejšnjega predvsem v tem, da so shranjeni vzorci vedno odvzeti po prožilnem signalu, zato ne moremo opazovati „negativnih časov“. Zaradi načina vzorčenja in proženja pa je mogoče uporabiti počasen A/D pretvornik z veliko ločljivostjo.

6.5.2 Vertikalni kanali

Če si ponovno ogledamo blokovni diagram digitalnega osciloskopa na sliki 6.31 ugotovimo, da ima ločene poti za vsak vhodni kanal, kar je drugače kot velja za večino analognih osciloskopov, ki so imeli le en vertikalni odklonski sistem. Z ločenimi potmi za vsak kanal je omogočeno odzemanje vzorcev vseh kanalov hkrati. Tako kot analogni osciloskop, ima tudi digitalni vhodne atenuatorje, vhodne predojačevalnike, ki služijo enakemu namenu. Namesto da bi z ojačanim vhodnim signalom direktno krmilili vertikalni odklonski sistem katodne cevi, s tem krmilimo A/D pretvornik, ki signal vzorči in digitalizira.

6.5.3 Analogno digitalna pretvorba

Obstajajo različne vrste A/D pretvorbe. Digitalni osciloskopi tipično uporabljajo eno od naslednjih možnosti: bliskovni pretvornik ali pa pretvornik ki deluje na principu zaporednih aproksimacij. Prvega uporablja osciloskop za kvantizacijo v realnem času („single shot“) in ima veliko hitrost, relativno majhno ločljivost in je relativno kompleksen (zahteva $2^N - 1$ napetosnih komparatorjev za N bitov ločljivosti; N je običajno 6 do 8). Drugega lahko uporabimo pri sekvenčno ponavljajočem

vzorčenju; ta ima večjo ločljivost ($N = 12 \sim 14$), je mnogo počasnejši in relativno enostaven za realizacijo.

6.5.4 Spomin

Takoj za A/D pretvorbo, ki opravi vzorčenje in kvantizacijo, se podatki shranijo v spomin. Hitrost spomina mora biti vsaj enaka kot je hitrost A/D pretvorbe. To pri hitrost pretvorbe npr. 200 MHz pomeni, da mora imeti spomin pisalni čas krajši od 5 ns. Potem, ko je zadostno število vzorcev shranjenih v spomin, lahko sliko na zaslonu rekonstruiramo in ohranjamo poljuben čas.

6.5.5 Procesor

Vsi digitalni osciloskopi vsebujejo enega ali več mikroprocesorjev. Njihova naloga je:

- prikaz rezultatov na zaslonu, ki poteka ločeno od akvizicije signalov,
- opravlja različne matematične operacije na signalih,
- krmili povezovanje z zunanjim svetom: tiskalnik, risalnik, računalnik.

6.5.6 Katodna cev

Katodna cev, ki jo uporabljajo digitalni osciloskopi, je enostavnejša v primerjavi s katodno cevjo, ki jo uporabljajo analogni osciloskopi. Bistvena razlika je v potrebni hitrosti, saj pri digitalnem osciloskopu na zaslon piše mikroprocesor z veliko manjšo hitrostjo, kot je hitrost spreminjanja signala. S tem se poveča zanesljivost in točnost, zmanjša se cena, poveča pa se tudi življenska doba, poleg tega pa v zadnjem času proizvajalci dodajajo dodatne funkcije (npr. barvni izpis) ki omogoča večjo preglednost rezultatov.

6.6 Specifikacije in merjenje

Specifikacije instrumenta so namenjene uporabnikom, da bi lahko uporabljali instrument čim bolj učinkovito. Pomembno je razumeti, kako se specifikacije instrumenta odražajo pri merjenju in kaj določa točnost merilnih rezultatov.

6.6.1 Vertikalna ločljivost

Pomemben podatek je ločljivost A/D pretvornika v digitalnem osciloskopu. Npr. 1 bitni kvantizator lahko loči 2 nivoja, 2 bitni štiri, 3 bitni 8 nivojev itd. V splošnem lahko kvantizator loči 2^N

diskretnih nivojev vhodnega signala. Ločljivost pomeni koliko diskretnih nivojev lahko loči kvantizator oziroma A/D pretvornik. Kot primer vzemimo signal z amplitudo $1 V_{pp}$, ki ga prikažemo na zaslonu osciloskopa. 6 bitni A/D pretvornik ima v tem primeru ločljivost

$$1 \text{ LSB} = \frac{U_{in}}{2^N - 1} = \frac{1 V_{pp}}{2^6 - 1} = 15.9 \text{ mV}. \quad (6.12)$$

15.9 mV pomeni minimalni napetostni korak, ki ga lahko s takim osciloskopom ločimo (LSB je kratica in pomeni least significant bit). V našem primeru 6 bitnega A/D pretvornika je $1 \text{ LSB} = 15.9 \text{ mV}$. V idealnem primeru je tako največja napaka enaka $\pm \frac{1}{2} \text{ LSB}$. Če bi želeli opazovati signal z ločljivostjo, ki je boljša kot 15.9 mV bi morali povečati ločljivost A/D pretvornika ter zmanjšati notranje šume instrumenta; to je drag in zapleten postopek.

6.6.2 Efektivna vertikalna ločljivost

Kako lahko določimo vertikalno ločljivost osciloskopa, če ta vključuje tudi druge izvore šumov? Najboljša definicija je tista, ki vključuje vse šume in jo imenujemo *efektivna ločljivost* in pomeni, kakšna je realna ločljivost A/D pretvornika, ki vključuje tako idealno ločljivost, kot tudi vse notranje šume, izražena z ločljivostjo A/D pretvornika. Efektivna ločljivost osciloskopa je vedno manjša kot deklarirana ločljivost A/D pretvornika, zato deklarirana ločljivost A/D pretvornika ne pove zadosti o resnični vertikalni ločljivosti osciloskopa.

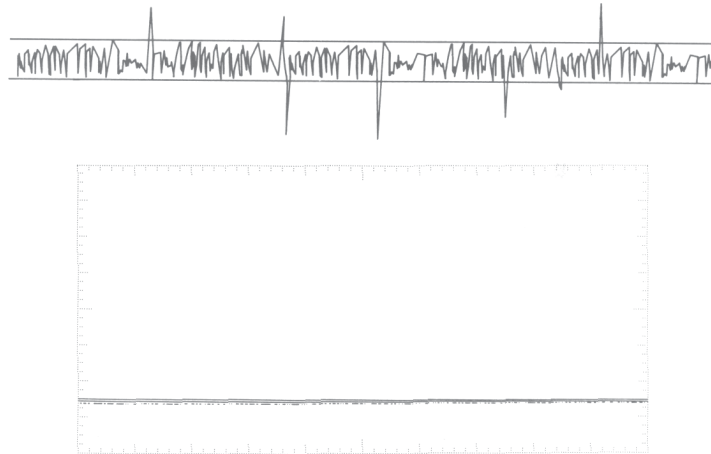
Pogosta metoda merjenja efektivnega števila bitov ločljivosti je sledeča: sinusni signal z zelo stabilno in znano frekvenco in amplitudo priključijo na osciloskop. Digitalizirane vzorce prenesejo v računalnik, ki primerja dobljene vzorce z idealnimi. Razlika služi kot osnova za izračun efektivnega števila bitov.

6.6.3 Šum preleta

Zaradi omejenega števila nivojev A/D pretvornika pri digitalnem osciloskopu je v splošnem analogni osciloskop navidezno boljši kot digitalni pri opazovanju nizkih nivojev šuma, ki so superponirani signalom. Prikaz enosmerne napetosti na digitalnem osciloskopu izgleda kot ravna črta, ki preskakuje med dvema ali tremi nivoji. Na analognem osciloskopu bi signal izgledal pri močno zvišani intenziteti žarka kot to prikazuje zgornji del slike 6.35. Del signalov, ki seže iznad horizontalnih črt, v resnici na zaslonu ne vidimo zaradi prevelike hitrosti. Spodnji del iste slike prikazuje, kako izgleda slika na digitalnem osciloskopu (obe sliki sta v različnem merilu). Izgleda, kot da analogni osciloskop prikazuje manjši šum, to pa le zato, ker je katodna cev prepočasna in ne prikaže vseh hitrih prehodov. Šum ki ga vidimo na zaslonu je sestavljen po

$$N_{Zaslon} = N_{Merjenec} + N_{Instrument} \quad (6.13)$$

Iz prikazanega šuma ne moremo določiti dejanskega šuma merjenca, razen če vemo, da je šum instrumenta deklarirano manjši. Če bi pustili digitalni osciloskop v tako imenovanem „spominskem načinu“ bi dobili črto sestavljeno iz 3 nivojev 0 in $\pm 1 \text{ LSB}$, kot to prikazuje spodnji del slike 6.35.

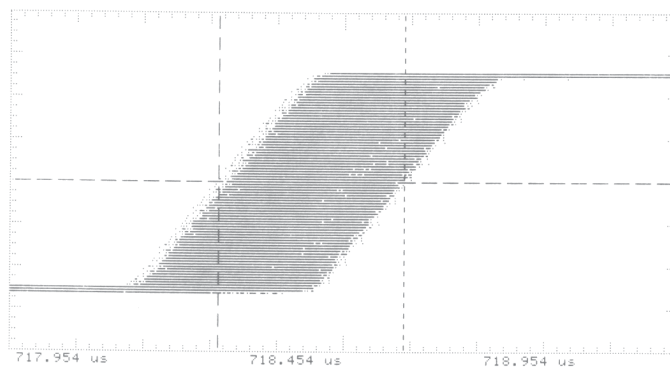


Slika 6.35: Prikaz šuma na analognem in digitalnem osciloskopu

6.6.4 Meritev časovnih intervalov

Nekaj najosnovnejših meritev v časovnem prostoru predstavlja merjenje časovnih intervalov, kot so merjenje časa vzpona in padanja, frekvence, periode itd. Pri analognem osciloskopu to pomeni prikaz signala v zaželenem področju in štetje ustreznih oznak na zaslonu; to je zamudno in nenatančno opravilo. Pri digitalnem osciloskopu je seveda ta postopek avtomatski; vključiti moramo le ustrezno funkcijo.

Meritev sipanja (*jitter*) je težavna z analognim osciloskopom in enostavna z digitalnim. V prvem primeru prikažemo prehod in nato opazujemo, kako se ta prehod premika po časovni skali; Na zaslonu analognega osciloskopa je to opazovanje zamudno, nezanesljivo in nenatančno, medtem ko je pri digitalnem osciloskopu dokaj enostavno. Na zaslonu prikažemo ustrezen prehod in vključimo funkcijo „INF. PERSISTENCE“. Slika na zaslonu izgleda približno tako, kot to kaže slika 6.36.



Slika 6.36: Prikaz sipanja signala na zaslonu digitalnega osciloskopa

6.6.5 Večkanalni prikaz

Mnogo aplikacij zahteva prikaz vsaj 2 kanalov istočasno na zaslonu osciloskopa. Pri analognih osciloskopih je ta problem rešljiv z dvema žarki v eni katodni cevi – to so tako imenovani dvožarkovni

osciloskopi; so izjemno dragi, zato jih redko srečamo. Pri katodni cevi z enim samim elektronskim topom lahko prikazujemo 2 kanala na način ALT oz. CHOP (glej prejšnje poglavje). Večina analognih osciloskopov deluje na tem principu. Problem takega načina je, da lahko zaradi preklapljanja kanalov na en ali drug način izgubimo del informacije.

Digitalni osciloskop vzorči vsak kanal posebej in shrani rezultate vsakega kanala v svoj spomin. To se zgodi istočasno za oba kanala. Na ta način ohrani relacijo med signali ter vzorči in digitalizira oba kanala na enak način.

6.6.6 Shranjevanje slike

Pri analognem osciloskopu slika na zaslonu ostane omejen časa. Problem so reševali osciloskopi s spominsko cevjo (glej prejšnje poglavje), ki pa je draga in lahko shrani podatke na fosforju le omejen čas; tako sliko lahko opazujemo le optično in ni dostopna ostalim digitalnim instrumentom.

Digitalni osciloskop shranjuje vzorčen in kvantiziran signal v pomnilnik, od koder ga lahko prikazujemo na zaslonu poljuben čas v nespremenjeni obliki ali pa ga pošljemo na tiskalnik ali v pomnilnik računalnika v nadaljno obdelavo itd. . .

