

2 Osciloscopul

2.1 Prezentare generală

Osciloscopul este un instrument având ca funcție principală vizualizarea și măsurarea semnalelor electrice în domeniul timp. Semnalul este reprezentat pe un ecran, ca un grafic bidimensional, având pe axa orizontală (X) timpul, iar pe axa verticală (Y) tensiunea. Acesta este modul cel mai frecvent de utilizare a osciloscopului, $Y(t)$.

O altă utilizare a osciloscopului constă în vizualizarea dependenței unui semnal funcție de alt semnal - funcționarea în modul $Y(X)$.

Există în prezent pe piață o varietate destul de mare de osciloscopiae. O primă clasificare le poate împărți în două categorii:

- **Osciloscopiae fără memorie.** Acestea sunt folosite în principal pentru vizualizarea semnalelor periodice, care pot genera o imagine stabilă pe ecran, sau pentru a urmări evoluția unor semnale cu variație foarte lentă;
- **Osciloscopiae cu memorie,** care permit înregistrarea unui semnal într-o singură apariție și memorarea lui pentru a fi vizualizat ulterior.

În funcție de modul în care se face prelucrarea semnalelor osciloscopiae pot fi:

- **analogice** (osciloscopul ‘clasic’);
- **digitale.** Semnalul este digitizat (transformat în formă numerică), iar apoi poate fi stocat, prelucrat, afișat. În acest caz, osciloscopul este implicit cu memorie.

Domeniul de frecvență acoperit este până la câteva sute de MHz pentru osciloscopiae obișnuite (numite și ‘de timp real’), dar poate ajunge până la zeci de GHz în cazul *osciloscopiaelor cu eșantionare*, care se bazează pe caracterul repetitiv al semnalelor vizualizate.

2.2 Schema bloc generală

O schemă bloc foarte generală, valabilă atât pentru un osciloscop analogic cât și pentru unul digital, este dată în figura 2.1. Se pun în evidență trei blocuri principale:

- **Canalul Y**, al cărui rol este de a realiza condiționarea (prelucrarea) semnalelor studiate. Majoritatea osciloscopelor existente permit vizualizarea a două semnale, aplicate pe intrările notate în schemă cu Y_A , respectiv Y_B . Foarte frecvent ele sunt inscripționate pe ecran prin CH1 și CH2 (CH de la Channel). Există și osciloscopice ce permit analiza simultană a mai multor semnale, de exemplu 4. În modul de lucru $Y(X)$ intrarea Y_B și circuitele aferente pot fi comutate pentru a prelucra semnalul utilizat pentru axa X.

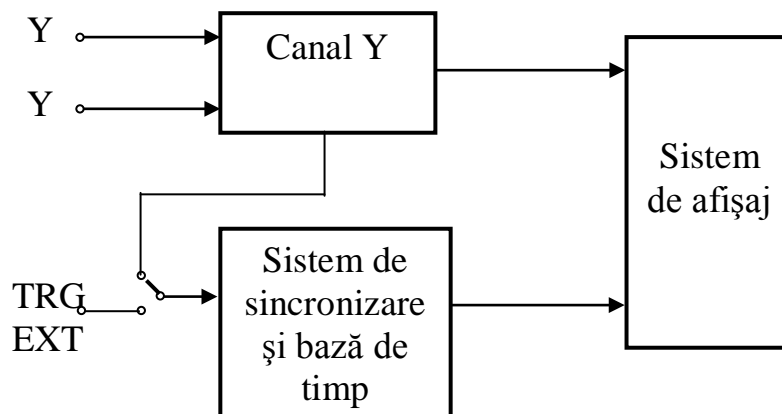


Figura 2.1. Schema bloc generală a osciloscopului

- Blocul intitulat „**Sistem de sincronizare și bază de timp**” îndeplinește o dublă funcționalitate:
 - Pe de o parte, asigură *sincronizarea* imaginii. Cum s-a mai arătat, osciloscopul fără memorie este frecvent utilizat pentru a vizualiza semnale periodice. Pe un ecran este reprezentat un segment de durată limitată al semnalului, iar afișarea se reia la anumite intervale de timp. Pentru a crea o imagine stabilă, la fiecare reluare a afișării, ar trebui să fie reprezentat același conținut. Lucrul acesta este posibil, având în vedere periodicitatea semnalului, dacă afișarea începe de fiecare dată în același moment de timp al perioadei semnalului. În figura 2.2 sunt reprezentate o imagine nesincronizată și una sincronizată.
 - Pentru realizarea sincronizării poate fi utilizat unul din cele două semnale vizualizate, livrat de canalul Y (sincronizare internă), sau un semnal aplicat la borna trigger extern – TRG EXT (sincronizare externă).

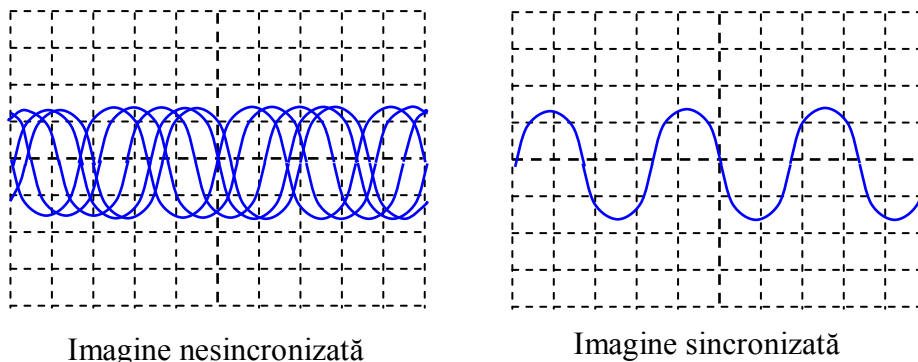


Figura 2.2. Imagine nesincronizată/sincronizată pe ecranul osciloscopului

- Pe de alta parte, este necesar să se creeze o referință de timp pentru a se putea realiza o scară de timp pe axa orizontală.
- **Sistemul de afișaj** este cel care trebuie să realizeze imaginea, pe un ecran gradat, corelând informațiile primite de la cele două blocuri precedente. Uneori, în afară de imaginea propriu-zisă mai pot fi afișate și unele informații referitoare la semnalul vizualizat sau la setările aparatului. Diferă mult în funcție de tipul osciloscopului (în cazul osciloscopului analogic se utilizează un afișaj cu tub catodic, în timp ce în cazul osciloscopului numeric, afișajul este de fapt un monitor de calculator, realizat cu ecran cu cristale lichide (LCD))

2.3 Osciloscopul analogic. Schema bloc

Cum s-a arătat, în acest caz vizualizarea se face utilizând un tub catodic. Având în vedere rolul esențial pe care îl are acesta în funcționarea aparatului, vom prezenta pe scurt structura și principiul de funcționare al acestuia.

2.3.1 Tubul catodic

Dispozitivul utilizat pentru afișarea imaginii în cazul osciloscopului analogic este tubul catodic (TK). Este constituit dintr-un ansamblu de electrozi situați într-o incintă vidată de sticlă, având o porțiune cilindrică și una tronconică (Figura 2.3).

Distingem 4 zone:

- Tunul electronic
- Zona de focalizare;
- Zona de deflexie;
- Zona de postaccelerare

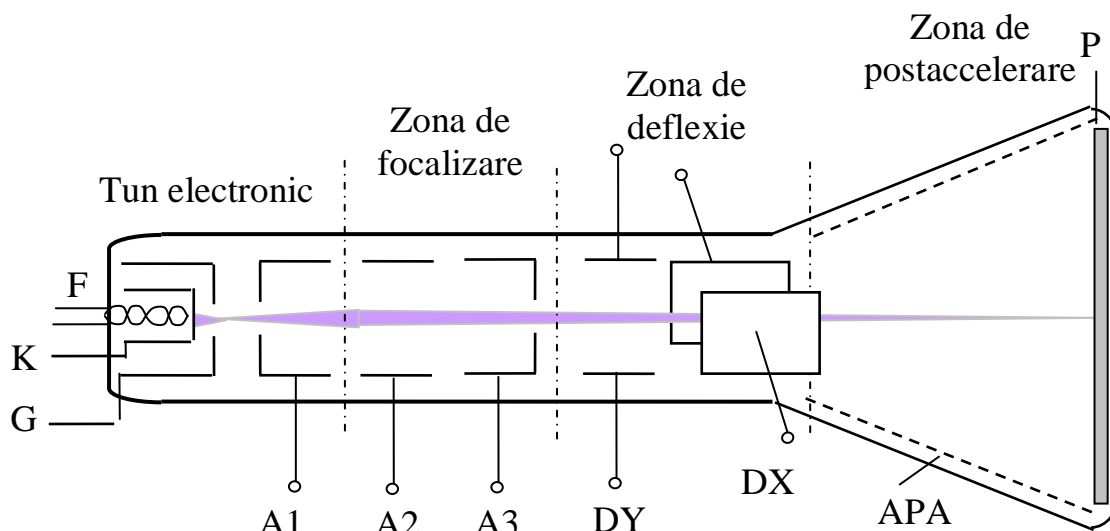


Figura 2.3. Tubul catodic al unui osciloscop

Tunul electronic

Are rolul de a genera un fascicol de electroni cu energii cinetice ridicate. Se compune din următoarele elemente:

- Filament (F);
- Catod (K). Fiind încălzit de filament, generează fascicolul de electroni;
- Grila (G). Are rolul de a controla intensitatea fascicolului de electroni, și prin aceasta, strălucirea imaginii. Este polarizată la un potențial negativ în raport cu catodul. Prin modificarea acestui potențial se reglează strălucirea.
- Anodul de accelerare (A_1). Are rolul de a accelera fascicolul de electroni, în care scop este polarizat la o tensiune înaltă (300-5000V) de obicei fixă în raport cu catodul.

Zona de focalizare

După ieșirea din tunul electronic, fascicolul are tendința de împrăștiere. Rolul acestei zone este de concentra fascicolul, obținându-se o convergență la nivelul ecranului. Este constituită din doi anodi, având forma cilindrică.

- *Anodul* (A_2) – este polarizat la o tensiune mai mică decât anodul A_1 (tipic 200-700V). Prin modificarea acestei tensiuni se realizează reglajul de focalizare.
- *Anodul* (A_3) – este folosit pentru reglarea efectului de astigmatism (spotul devine oval în anumite porțiuni ale ecranului). Acest fenomen se datorează în special diferenței de potențial între anodul A_3 și potențialul mediu al plăcilor de deflexie. În consecință potențialul anodului A_3 se reglează la potențialul mediu al plăcilor de deflexie.

Potențialul acestui electrod este apropiat de al anodului de accelerare și este de obicei reglabil.

Zona de deflexie

Această zonă este alcătuită din perechile de plăci de deflexie verticală și respectiv deflexie orizontală. Rolul său este de a realiza devierea fascicolului de electroni și în consecință deplasarea spotului la nivelul ecranului. Există în principiu două posibilități de a realiza deflexia: cu ajutorul unui câmp magnetic sau al unui câmp electric. Prima soluție, presupunând utilizarea unor bobine de deflexie situate în afara tubului, este folosită la tuburile catodice din televizoare sau monitoare TV.

În cazul osciloscopelor se folosește deflexia electrostatică datorită posibilității de a lucra la frecvențe mari.

Se consideră pentru exemplificare studiul sistemului de deflexie pe verticală, pentru sistemul de deflexie orizontală raționamentul fiind asemănător. Funcționarea sistemului de deflexie se bazează pe mișcarea electronului în câmp electrostatic. În figura 2.4 este prezentată mișcarea unui electron care intră, cu viteză v_z la momentul $t=0$, în sistemul de deflexie. Între plăci se aplică tensiunea u_y .

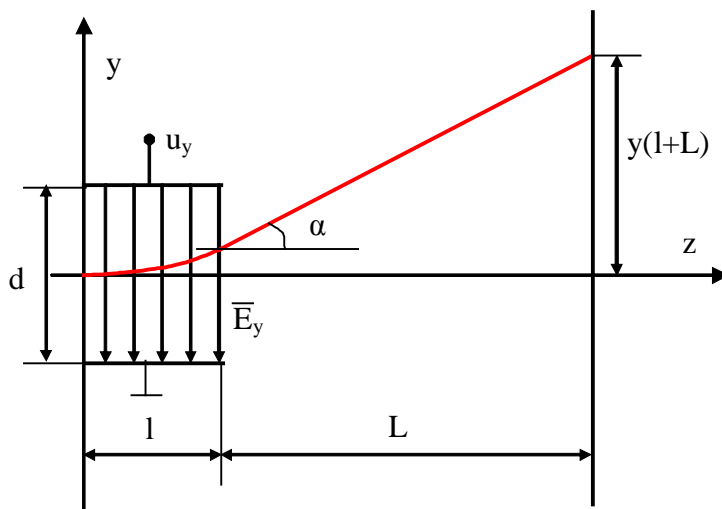


Figura 2.4. Sistemul de deflexie pe verticală

Datorită aplicării tensiunii u_y între plăci va exista un câmp electric uniform:

$$E_y = -\frac{u_y}{d} \quad (1.1)$$

Acesta va acționa asupra electronului cu o forță:

$$\overline{F}_y = -q\overline{E}_y \quad (1.2)$$

$$F_y = q \frac{u_y}{d} \quad (1.3)$$

Accelerația imprimată pe direcția y va fi:

$$a_y = \frac{d^2 y}{dt^2} \quad (1.4)$$

$$F_y = m \frac{d^2 y}{dt^2} = q \frac{u_y}{d} \quad (1.5)$$

Pentru rezolvarea ecuației diferențiale vom presupune condițiile inițiale:

$$y(0) = 0, \quad \left. \frac{dy}{dt} \right|_{t=0} = v_y(0) = 0 \quad (1.6)$$

Vom considera cazul în care tensiunea u_y este constantă și egală cu U_y . Prin rezolvarea ecuațiilor de mișcare, rezultă:

$$y(t) = \frac{q U_y t^2}{m d 2} \quad (1.7)$$

$$z(t) = v_z t$$

sau eliminând timpul între cele două ecuații se obține

$$y(z) = \frac{q U_y z^2}{m d 2v_z^2} \quad (1.8)$$

Rezultă că în interiorul sistemului de deflexie electronul se mișcă pe o traiectorie parabolică. După ieșirea din această zonă, electronul își continuă mișcarea în virtutea inerției pe o traiectorie rectilinie, pe direcția tangentei la parabolă, deci sub un unghi

$$\operatorname{tg} \alpha = \left. \frac{dy}{dz} \right|_{z=l} = \frac{q U_y l}{m d v_z^2} \quad (1.9)$$

Ne interesează deplasarea la nivelul ecranului care va avea deci două componente:

$$y(L+l) = y(l) + L \operatorname{tg} \alpha = \frac{q U_y l}{m d v_z^2} \left(\frac{l}{2} + L \right) \quad (1.10)$$

Viteza v_z este determinată de tensiunea de accelerare U_{AC} , conform ecuației

$$\frac{mv_z^2}{2} = qU_{AC} \Rightarrow v_z^2 = \frac{2qU_{AC}}{m} \quad (1.11)$$

Se definește *sensibilitatea sistemului de deflexie pe verticală în regim static*

$$S_{y0} = \frac{y(l+L)}{U_y} = \frac{l}{2dU_{AC}} \left(\frac{l}{2} + L \right) \cong \frac{lL}{2dU_{AC}} \quad (1.12)$$

Din relația sensibilității se observă următoarele:

- Mărirea tensiunii de accelerare are efect negativ asupra sensibilității. Rezultă de aici necesitatea postaccelerării deoarece accelerarea în zona anodului A_1 nu poate fi mărită foarte mult.
- Mărirea sensibilității se poate face prin mărirea lui L , adică prin alungirea tubului. Deoarece se dorește o sensibilitate mai mare pentru sistemul de deflexie pe y , plăcile de deflexie verticală se dispun înaintea celor de deflexie orizontală.
- Mărirea raportului l/d ar fi o cale pentru mărirea sensibilității. Apare însă pericolul ca electronii să lovească plăcile de deflexie. Această situație se poate evita prin modificarea formei plăcilor (figura 2.5).

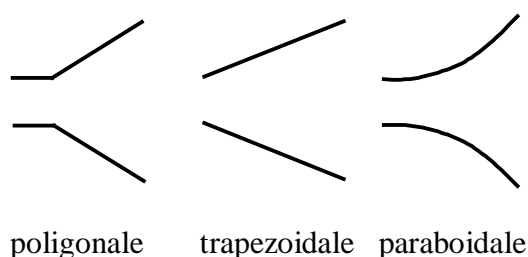


Figura 2.5. Plăci de deflexie

De asemenea mărirea lui l conduce la creșterea „timpului de zbor al electronilor în interiorul sistemului de deflexie. Această are un impact negativ asupra benzii de frecvențe a tubului catodic (scade sensibilitatea la frecvențe înalte).

Zona de postaccelerare

În cazul tuburilor destinate funcționării la frecvențe mai mari de 10 MHz, viteza de deplasare a fascicolului în planul ecranului este foarte mare, durata incidenței cu un anumit punct al ecranului și deci și energia cinetică transmisă stratului luminiscent este mică, rezultând o scădere a strălucirii imaginii.

Pentru a evita acest fenomen, este utilă o mărire suplimentară a energiei cinetice a electronilor după sistemul de deflexie. Această se obține prin introducerea unui anod de postaccelerare (APA) polarizat cu o tensiune foarte înaltă (5÷15 kV).

Acest anod se realizează printr-o depunere metalică de formă elicoidală și cu rezistență foarte mare (de ordinul sute de $M\Omega$) pe suprafața tronconică a tubului. Forma electrodului este astfel aleasă încât câmpul să prezinte suprafețe echipotențiale sferice, care nu modifică traiectoria electronului în zona de postaccelerare. Electroductul elicoidal se conectează la capătul dinspre sistemul de deflexie la un potențial apropiat de cel al plăcilor de deflexie, iar la capătul dinspre ecran la potențialul de postaccelerare.

Ecranul

Ecranul este format din stratul luminiscent P, depus pe fața interioară a tubului. Rolul acestui strat este de a transforma energia cinetică a electronilor în energie luminoasă cu un randament cât mai bun. Elementul de bază pentru realizarea ecranului îl constituie fosforul.

Două sunt fenomenele care stau la baza funcționării ecranului:

- *Fluorescență* – emisie luminoasă pe durata bombardării cu electroni;
- *Fosforescență* – emisie luminoasă care continuă după încetarea bombardamentului cu electroni.

O caracteristică importantă a unui tub catodic, determinată de proprietățile stratului de fosfor, este *persistența* imaginii – intervalul de timp în care luminozitatea scade de la 90% la 10% din cea inițială după terminarea bombardamentului cu electroni. Câteva exemple:

- Persistență redusă (sub 1 ms) – fosfor P11 (culoare albastră);
- Persistență medie (1ms÷2s) – fosfor P31 (culoare galben – verzuie) – foarte frecvent la osciloscop;
- Persistență mare (mai mare ca 2 ms) – fosfor P33 (culoare oranj) – pentru radare, analizoare de spectru, vobuloscope.

Graticula (caroiajul)

Pentru a putea măsura nivele de tensiune sau intervale de timp, este necesară existența unei grile gradate în diviziuni și subdiviziuni, pe orizontală și pe verticală. În mod frecvent, sunt $N_x = 10$ diviziuni pe orizontală și $N_y = 8$ diviziuni pe verticală. Graticula poate fi:

- Internă (zgâriată pe sticla ecranului);
- Externă (realizată pe o placă de plexiglas plasată în fața ecranului).

2.3.2 Schema bloc a osciloscopului analogic

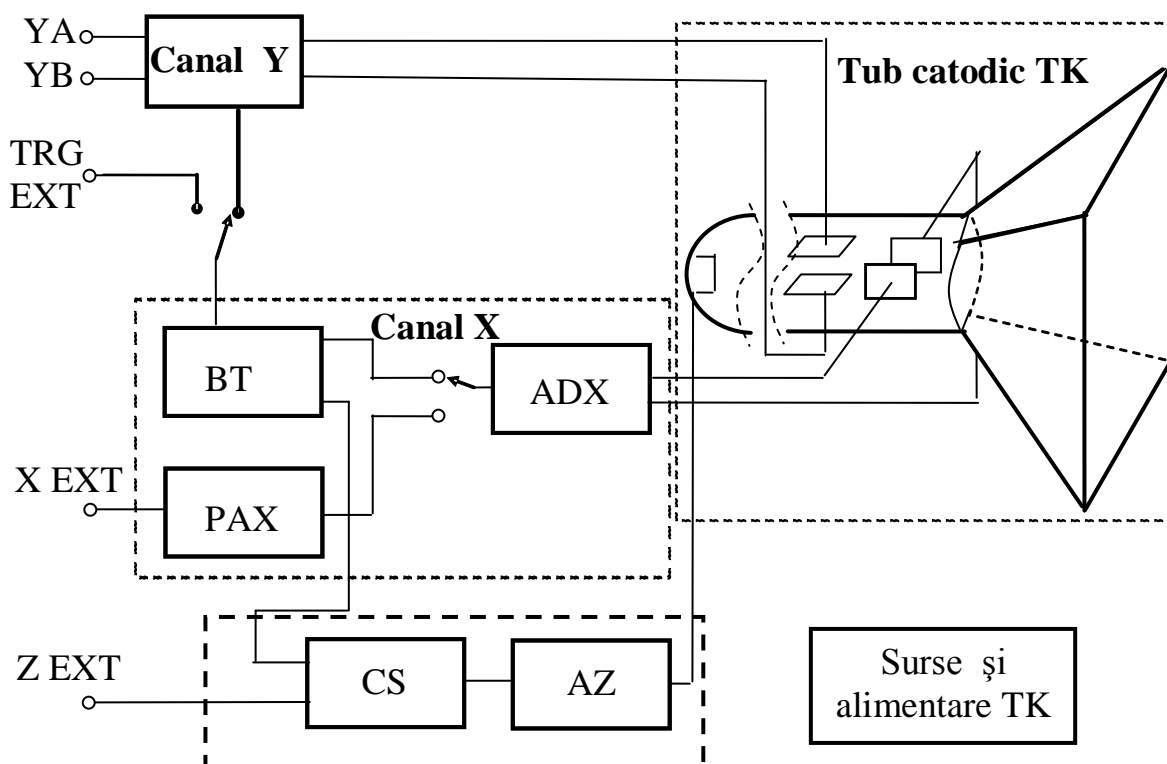


Figura 2.6. Schema bloc a unui osciloscop analogic

Canalul Y - Acest bloc preia semnalele de la intrare (în figură s-a presupus un osciloscop cu două canale, deci există două intrări notate cu YA și YB), pe care le prelucrează pentru a produce tensiunea necesară sistemului de deflexie pe verticală. Totodată el livrează și un semnal pentru sincronizarea internă pentru baza de timp (BT).

Canalul X (baza de timp) – Dacă pe plăcile de deflexie pe verticală s-a aplicat semnalul care se dorește a fi vizualizat, pe plăcile de deflexie orizontală, în modul de lucru normal al osciloscopului (vizualizarea variației temporale a semnalului $y(t)$), trebuie aplicat un semnal care să asigure deplasarea pe orizontală a spotului. Deoarece pe orizontală se dorește să se măsoare timpul, mișcarea spotului de electroni pe această direcție trebuie să se facă cu viteză constantă (curgerea timpului este liniară). În consecință pe plăcile de deflexie orizontală trebuie să fie aplicată o tensiune liniar variabilă (crescătoare) pe durata unei curse directe. Blocul care generează această tensiune este baza de timp (BT). În ansamblu tensiunea generată de baza de timp are o formă de tip “dinte de fierăstrău”. Baza de timp mai are de asemenea rolul de a asigura sincronizarea imaginii vizualizate, folosind drept semnal de sincronizare fie

semnalul care este vizualizat (sincronizare internă), fie un semnal extern, aplicat la borna TRG EXT (trigger extern). O altă funcțiune a bazei de timp constă în generarea unui semnal care să asigure stingerea spotului pe durata cursei inverse (întoarcerea spotului). Amplificatorul deflexiei pe orizontală (ADX) preia semnalul dat de BT în modul de lucru $y(t)$ sau pe acel dat de un preamplificator (PAX) în cazul când se lucrează în modul $y(x)$. PAX amplifică semnalul aplicat la intrarea X EXT.

Amplificatorul de luminozitate (A Z) – Permite controlul strălucirii imaginii vizualizate prin reglarea tensiunii aplicate grilei tubului catodic.

Circuitele de control al strălucirii (CS)

O primă funcțiune obligatorie constă în stingerea spotului pe durata cursei inverse, utilizând semnalul furnizat de BT. În afară de aceasta, unele osciloscopae mai au și posibilitatea controlului strălucirii prin intermediul unui semnal extern, aplicat la borna Z EXT. Rolul CS constă în combinarea celor două tipuri de semnale. Deoarece din variația intensității imaginii vizualizate putem obține informații despre semnal, intensitatea este văzută ca o a treia dimensiune (Z). În figura 2.7 este prezentată imaginea care apare pe ecranul osciloscopului când pe intrarea Z se aplică un semnal dreptunghiular, iar semnalul vizualizat este de tip sinusoidal.

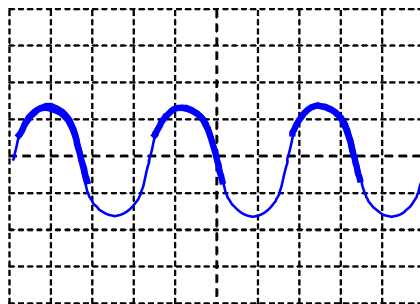


Figura 2.7. Semnal dreptunghiular aplicat pe Z

2.4 Osciloscopul digital. Schema bloc

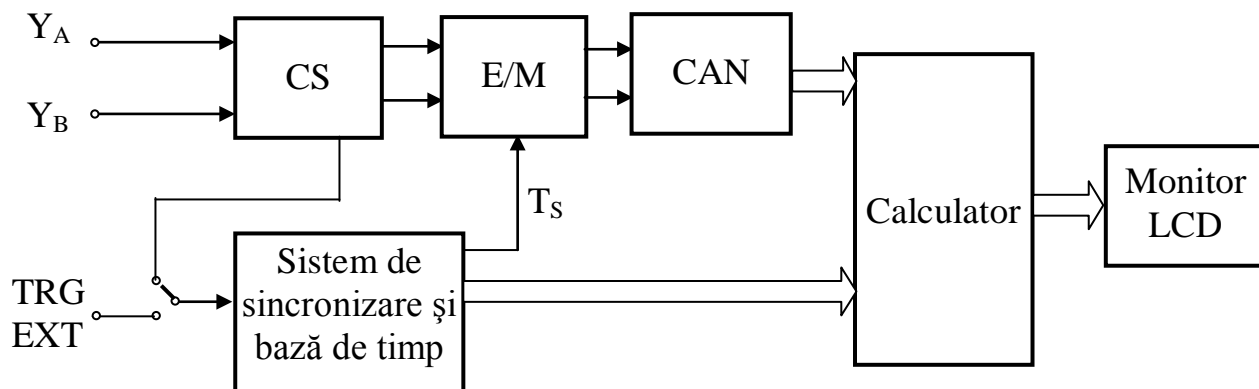


Figura 2.8. Schema bloc a unui osciloscop digital

O schemă simplificată este dată în figura 2.8. În această schemă CS este un bloc analogic de condiționare a semnalelor de intrare. Funcțiunile sale sunt foarte asemănătoare cu cele ale canalului Y din schema osciloscopului analogic. Urmează un bloc de eșantionare/memorare (E/M). Acesta eșantionează semnalul analogic de intrare la intervale egale de timp (T_s) ca în figura 2.9.

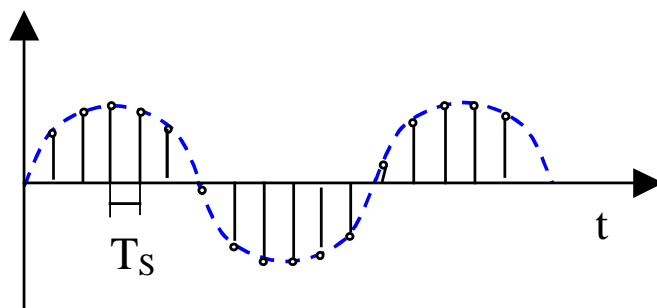


Figura 2.9. Semnal eșantionat

Eșantioanele astfel obținute sunt aplicate unui convertor analog numeric (CAN). Acesta compară amplitudinea fiecărui eșantion cu un pas de cuantizare. Raportul celor două mărimi, rotunjit la un număr întreg, este rezultatul conversiei. În acest fel semnalul va fi reprezentat printr-o succesiune de numere, scrise într-un cod binar. Se spune că semnalul este *digitizat* (exprimat în formă numerică) și sub această formă este aplicat unui microcalculator. Acesta mai primește și informațiile de timp și de sincronizare de la sistemul de sincronizare și bază de timp. Sistemul acesta lucrează ca și în cazul osciloscopului analogic pornind de la semnalul de sincronizare analogic, dar funcționarea sa diferă în multe privințe de aceea a blocului

omolog din cazul precedent. Baza de timp furnizează și semnalul de tact T_s cu care face eșantionarea blocul E/M.

Microcalculatorul poate efectua operații de memorare a unui număr de forme de undă, prelucrări de semnal pentru îmbunătățirea calității imaginii, calculul unor parametri ai semnalului (valorare maximă, minimă, eficace, medie, frecvența de repetiție, pozițiile cursorilor de timp sau de tensiune etc.), asigurarea operațiilor de interfață cu utilizatorul sau cu un calculator. Afișarea se face pe un monitor video cu cristale lichide monocrom sau color. Având în vedere posibilitățile de afișare pe ecran, elementele de reglaj nu mai sunt de regulă inscripționate pe panoul aparatului, ci sunt afișate direct pe ecran.

2.5 Canalul Y

Acest paragraf se referă la canalul Y al osciloscopului analogic, care preia semnalul de la intrările Y_A , Y_B și livrează tensiunea pentru sistemul de deflexie pe verticală, dar și la partea analogică a canalului Y al osciloscopului numeric, care furnizează tensiunea necesară sistemului de conversie analog numerică.

2.5.1 Rolul și funcțiunile canalului Y

1. Asigură impedența de intrare de valoare ridicată a osciloscopului;
2. Realizează amplificarea în tensiune, necesară pentru a putea aduce tensiunea de intrare la valoarea necesară sistemului de deflexie (în cazul osciloscopului analogic) sau sistemului de conversie CAN (în cazul osciloscopului digital);
3. Această amplificare este calibrată, așa încât să existe o relație cunoscută între dimensiunea imaginii pe ecran și valoarea tensiunii de la intrare;
4. Face trecerea de la intrarea de regulă nesimetrică (între un punct `cald` și masă) și ieșirea simetrică, spre plăcile de deflexie sau sistemul de conversie CAN;
5. Asigură protecția la supratensiuni;
6. Permite extragerea semnalului pentru sincronizare internă;
7. Permite realizarea unor reglaje și selecții, urmărind vizualizarea și încadrarea convenabilă în ecran a imaginii.

2.5.2 Reglaje și selecții în canalul Y

1. *Selecția modului de cuplaj al semnalului de intrare*, cu următoarele posibilități:
 - Cuplaj în curent continuu (CC)
 - Cuplaj în curent alternativ, cu blocarea componentei continue (AC);

- Conectarea la masă a intrării (GND – ground), de exemplu pentru a vedea poziția spotului pe ecran fără semnal.

Efectul acestui comutator este ilustrat în figura 2.10.

2. *Coeficientul de deflexie pe verticală* reprezintă raportul dintre tensiunea U_y aplicată la intrarea Y și deviația rezultată a imaginii pe ecran, exprimată prin numărul de diviziuni n_y :

$$C_y = \frac{U_y}{n_y} \quad (1.13)$$

Valorile calibrate întâlnite la majoritatea osciloscoapelor sunt:

$C_y=5-10-20-50-100-200-500$ mV/div, 1-2-5 V/div.

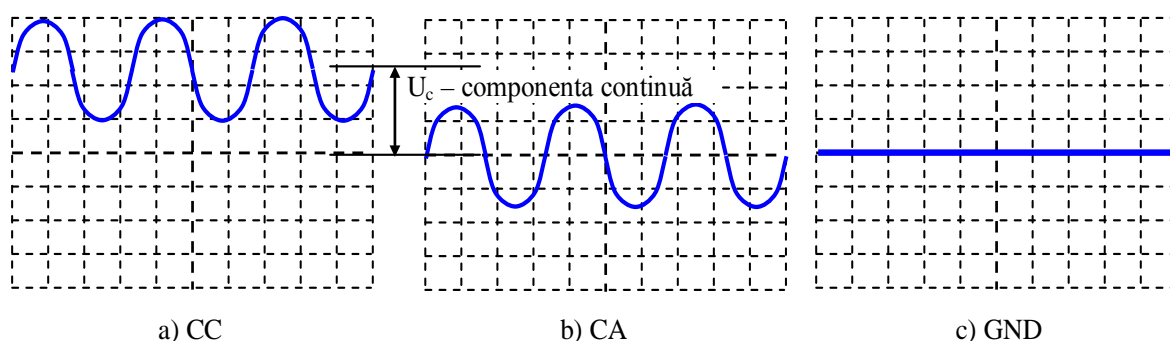


Figura 2.10. Efectul comutatorului de cuplaj

EXEMPLU:

Să presupunem că în exemplul din figura 2.10, vizualizarea este făcută cu $C_y = 1\text{V/div}$. Rezultă că semnalul este o sinusoidă cu amplitudinea de $1,5\text{V}$, suprapus peste o tensiune continuă $U_c = 2,5\text{V}$. În afară de reglajul în trepte, există și posibilitatea reglării continue a coeficientului de deflexie pe verticală utilă, de exemplu, atunci când dorim să încadrăm o imagine între anumite gradații ale scării gradate. Atenție! Dacă utilizăm reglajul continuu, nu mai putem citi nivele de tensiune pe gradația ecranului!

În cazul osciloscoapelor numerice, scările calibrate pot fi uneori mai dese, iar reglajul continuu poate fi înlocuit cu unul „fin” (în trepte foarte dese, de exemplu 1 : 1,1 : 1,2 : etc.)

3. Poziția (deplasarea) pe verticală a imaginii (POZ Y). Utilizarea acestui reglaj este echivalentă cu suprapunerea unei tensiuni continue peste semnalul măsurat. Acest fapt poate să conducă la erori în măsurarea tensiunilor continue suprapuse peste semnal. Pentru a le evita este indicat ca mai înainte de efectuarea măsurătorii să se verifice și eventual să se

ajusteze în mod convenabil poziția spotului pe ecran, cu comutatorul modurilor de cuplaj pe poziția GND.

4. Selecția polarității imaginii +/- .Permite vizualizarea semnalului y sau $-y$.
5. Selecția modului de vizualizare simultană a semnalelor de pe cele două (sau mai multe) intrări. Pentru un osciloscop cu două canale, sunt uzuale următoarele opțiuni:
 - CH1 (numai semnalul YA);
 - CH2 (numai semnalul YB);
 - ALT (ambele semnale, în modul alternat);
 - CHOP (ambele semnale, în modul comutat);
 - ADD (suma canalelor de pe cele două canale, sau diferența lor, dacă polaritatea unuia este inversată).

În cazul osciloscoapelor numerice, dacă există două canale CAN nu se mai pune problema selectării unuia dintre cele moduri de reprezentare simultană alternat/comutat. Există însă și osciloscoape cu un singur sistem de conversie, având în vedere prețul ridicat al acestui sistem. În acest caz, convertorul poate lucra în modul alternat (se efectuează succesiv achiziția câte unuia din cele două semnale) sau comutat (de exemplu achiziționând un eșantion al canalului A, apoi unul al canalului B și așa mai departe).

2.5.3 Caracteristici și performanțe ale canalului Y.

- **Sensibilitatea osciloscopului** poate fi caracterizată prin inversul coeficientului de deflexie pe verticală minim, C_{ym} . Pentru osciloscoapele obișnuite, acesta este 5 sau 10 mV/div. Limitarea inferioară este cauzată de existența zgomotului, inerent oricărui circuit electric. Atunci când există trepte mai coborâte, de exemplu 1 sau 2 mV/div, acestea se realizează cu prețul reducerii lărgimii de bandă a osciloscopului (de exemplu la 5-10 MHz), pe acele trepte, prin introducerea unui filtru trece jos, care limitează puterea zgomotului.
- **Amplificarea în tensiune a canalului la frecvențe joase, A_0 .** În cazul unui osciloscop analogic, cunoscând sensibilitatea deflexiei pe verticală S_{y0} și valoarea minimă a lui C_y , C_{ym} ,

$$A_0 = \frac{1}{S_{y0}C_{ym}} \quad (1.14)$$

EXEMPLU: Pentru un tub având $S_{y0} = 0,1 \text{ div/V}$ și un osciloscop cu $C_{ym} = 10 \text{ mV/div}$, rezultă $A_0 = 10^3$.

În cazul unui osciloscop numeric, cunoscând tensiunea maximă la intrarea CAN, U_M și având în vedere că aceasta trebuie să corespundă tensiunii necesare pentru acoperirea întregului ecran pe treapta de C_{ym} , rezultă

$$A_0 = \frac{U_M}{N_y C_y} \quad (2.15)$$

- **Caracteristicile de frecvență.** Amplificarea în tensiune a canalului Y, poate fi aproximativ reprezentată în termenii transformatei Laplace prin expresia

$$A(s) = \frac{A_0 \omega_0}{s + \omega_0} \quad (1.16)$$

din care se deduce dependența de frecvență

$$A(j\omega) = |A(j\omega)| e^{j\varphi(\omega)} = \frac{A_0 \omega_0}{j\omega + \omega_0} \quad (1.17)$$

Modulul amplificării

$$|A(j\omega)| = \frac{A_0 \omega_0}{\sqrt{\omega^2 + \omega_0^2}} = \frac{A_0}{\sqrt{1 + \frac{\omega^2}{\omega_0^2}}} \quad (1.18)$$

indică dependența amplificării de frecvență, deci reprezintă *caracteristica amplitudine frecvență* a canalului Y. Pentru o redare fără distorsiuni a semnalului, ar trebui ca această caracteristică să fie constantă în toată banda de frecvențe a semnalului vizualizat. Constatăm însă o scădere cu frecvența a amplificării. În figura 2.10 este reprezentată această caracteristică în decibeli:

$$|A(j\omega)|_{dB} = 20 \log_{10} |A(j\omega)| = 20 \log_{10} A_0 - 10 \log_{10} \left(1 + \frac{\omega^2}{\omega_0^2} \right) \quad (1.19)$$

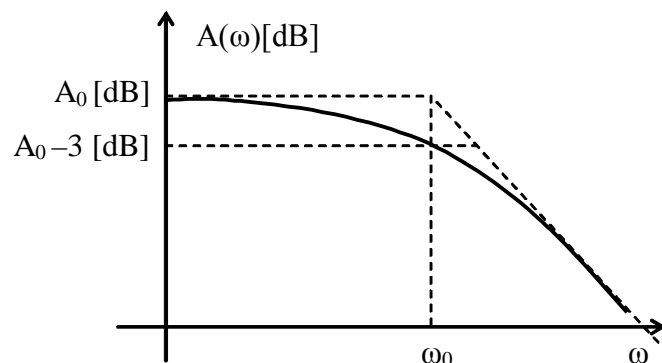


Figura 2.10. Caracteristica de frecvență

Se obișnuiește să se considere acceptabilă o scădere cu $\frac{1}{\sqrt{2}} = 0,707$,

sau în dB: $20\log_{10}\left(\frac{1}{\sqrt{2}}\right) = -10\log_{10} 2 = -3\text{dB}$.

Aceasta apare la $\omega = \omega_0$. Acceptând această scădere vom putea afirma că *lărgimea de bandă la 3dB* a canalului Y și implicit a osciloscopului, este $f_{3dB} = f_0 = \frac{\omega_0}{2\pi}$.

Se observă că putem reprezenta aproximativ caracteristica amplitudine-frecvență ținând seama de următoarele aproximări:

- Pentru frecvențe $\omega \ll \omega_0$, $|A(j\omega)|_{dB} \cong 20\log_{10} A_0$
- Pentru frecvențe $\omega \gg \omega_0$,

$$|A(j\omega)|_{dB} \cong 20\log_{10} A_0 - 20\log_{10}\left(\frac{\omega}{\omega_0}\right) \quad (1.20)$$

Utilizând pentru graficul de mai sus o scară logaritmică de frecvențe în abscisă, caracteristica se aproximează deci cu o dreaptă, având o scădere de -20dB la o creștere a frecvenței de la ω la 10ω (-20dB/decadă).

$\varphi(\omega)$ indică defazajul introdus de amplificator, pentru un semnal sinusoidal de frecvență ω . Această funcție reprezintă deci *caracteristica fază-frecvență*. Uneori, în locul caracteristicii fază frecvență se preferă caracteristica *timp de întârziere de grup-frecvență*, timpul de întârziere de grup fiind dat de $\tau_g(\omega) = -\frac{d\varphi(\omega)}{d\omega}$. Pentru ca amplificatorul să nu producă distorsiuni, în afară de condiția referitoare la caracteristica amplitudine frecvență, ar mai trebui ca timpul de întârziere de grup să fie constant în toată banda de frecvențe a semnalului (sau, echivalent, caracteristica fază frecvență să varieze liniar cu frecvența).

- **Răspunsul la impuls treaptă.** În mod ideal, aplicând la intrare o treaptă ar trebui să rezulte la ieșire tot o treaptă, având o anumită întârziere și o modificare a amplitudinii față de cea de la intrare.

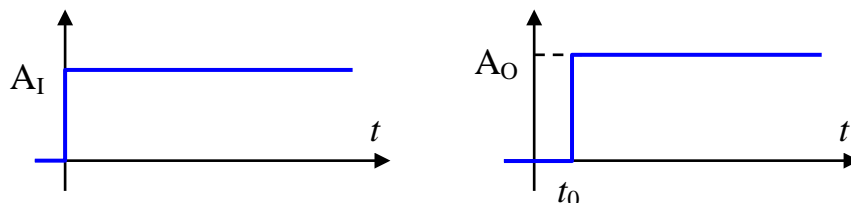


Figura 2.11. Răspunsul, în cazul ideal, la impulsul treaptă

Două elemente apar ca distorsiuni în cazul real

- Existența unor oscilații amortizate în vecinătatea tranziției. Sunt de nedorit în cazul osciloscopului și pot fi evitate printr-o proiectare și realizare adecvată;
- Tranziția între cele două nivele nu se mai face instantaneu ci într-un timp de creștere (durata frontului).

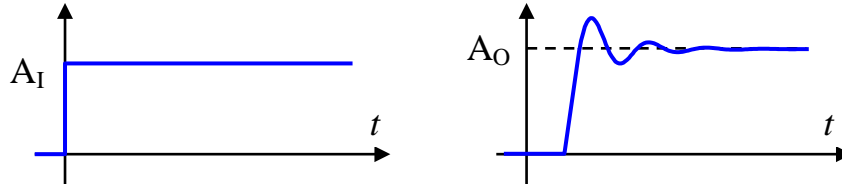


Figura 2.12. Răspunsul, în cazul real, la impulsul treaptă

Să evaluăm acest fenomen în cazul modelului simplificat adoptat pentru expresia amplificării. Semnalul de intrare este deci un impuls treaptă $x(t) = \sigma(t)$ având transformata Laplace $X(s) = \frac{1}{s}$. Transformata

Laplace a ieșirii este

$$Y(s) = \frac{A_0 \omega_0}{s(s + \omega_0)} \quad (1.21)$$

$$y(t) = A_0(1 - e^{-t\omega_0})\sigma(t) \quad (1.22)$$

reprezentat în figura 2.13.

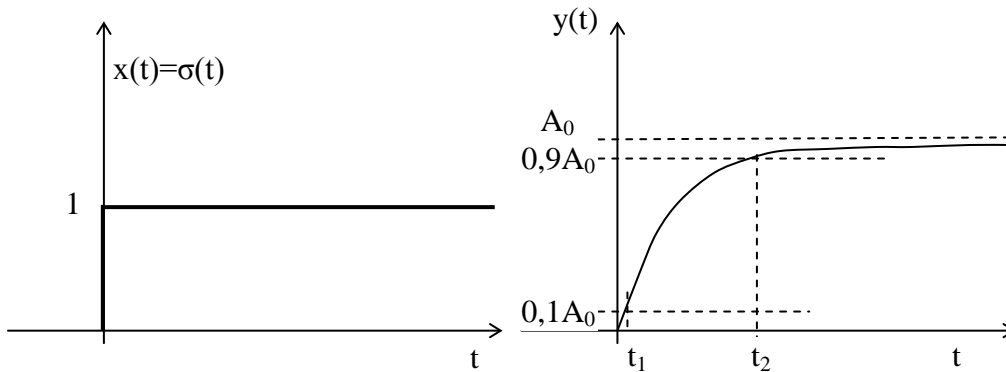


Figura 2.13. Răspunsul osciloscopului la impuls treaptă

Durata frontului va fi $t_f = t_2 - t_1$, unde t_1 rezultă din

$$y(t_1) = A_0(1 - e^{-t_1\omega_0}) = 0,1A_0 \Rightarrow t_1 = \frac{1}{\omega_0} \ln \frac{1}{0,9} \quad (1.23)$$

iar t_2

$$y(t_2) = A_0(1 - e^{-t_2\omega_0}) = 0,9A_0 \Rightarrow t_2 = \frac{1}{\omega_0} \ln \frac{1}{0,1} \quad (1.24)$$

de unde

$$t_f = \frac{1}{\omega_0} \ln 9 = \frac{2,2}{\omega_0} \quad (1.25)$$

sau

$$t_f = \frac{0,35}{f_0} \quad (1.26)$$

Se constată că durata frontului este invers proporțională cu lărgimea de bandă a amplificatorului. De exemplu, pentru $f_0 = 100 \text{ MHz}$ rezultă $t_f = 3,5 \text{ ns}$.

Dacă semnalul aplicat la intrare nu este o treaptă perfectă, ci are o durată a frontului t_s , durata frontului vizualizat poate fi determinată aproximativ cu formula empirică

$$t_v = \sqrt{t_s^2 + t_f^2} \quad (1.27)$$

Măsurarea făcută este valabilă fără a face această corecție, $t_v \cong t_s$, dacă $t_v \gg t_f$. Dacă însă t_v și t_f sunt comparabili, pentru calculul lui t_s trebuie aplicată formula de mai sus.

- **Impedanța de intrare**

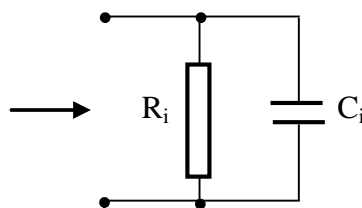


Figura 2.14. Schema echivalentă a impedanței de intrare a osciloscopului

Are o componentă rezistivă și una capacitivă (figura 2.14) În mod frecvent, $R_i = 1 \text{ M}\Omega$, $C_i = 10 - 80 \text{ pF}$. La frecvențe mari, componenta capacitivă tinde să șunteze componenta rezistivă și impedanța de intrare devine puternic dependentă de frecvență. De aceea, osciloscourile destinate funcționării la frecvențe mari (peste 100 MHz) au uneori și o intrare de impedanță mică (50 sau 75 ohmi).

2.5.4 Blocurile funcționale ale canalului Y

S-a considerat cazul unui osciloscop cu două canale (Y_A , Y_B). Schema bloc a canalului Y este prezentată în figura 2.15.

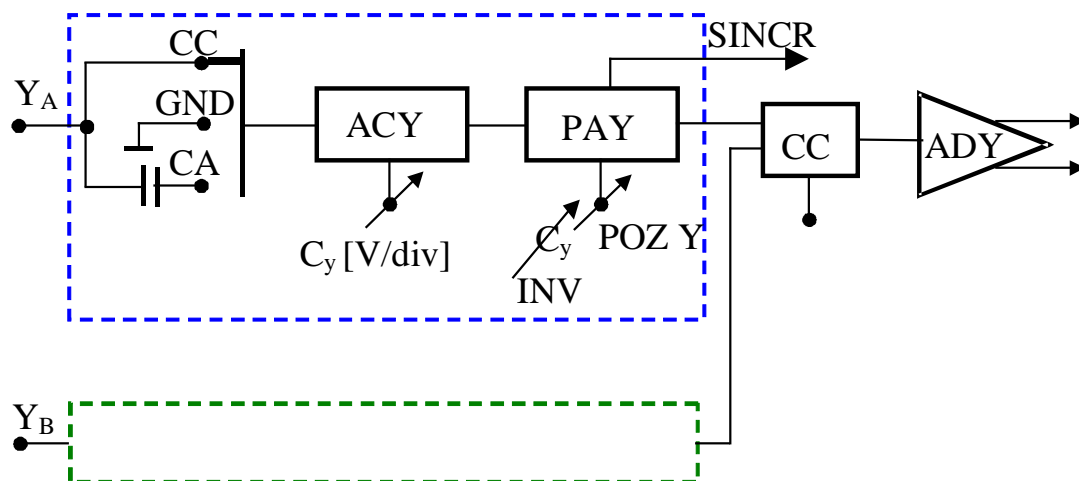


Figura 2.15. Canalul Y al osciloscopului

Principalele componente funcționale sunt:

- Comutatorul modurilor de cuplaj (CC, AC, GND)
- Atenuatorul calibrat (ACY)
- Preamplificatorul canalului Y (PAY)
- Comutatorul de canale (CC)
- Amplificatorul de deflexie pe verticală (ADY)

Comutatorul modului de cuplaj – permite vizualizarea semnalului cu sau fără componentă continuă sau, pe poziția GND (Ground), permite vizualizarea nivelului de zero (figura 2.7).

Atenuatorul calibrat – permite modificarea în trepte calibrate a *coeficientului de deflexie pe verticală*. Dacă se dorește realizarea unui atenuator cu treptele $C_y = 10-20-50-100-200-500$ mV/div, 1-2-5 V/div, vor fi necesare atenuările din tabelul

C_y	10 mV/div	20 mV/div	50 mV/div	100 mV/div	200 mV/div	500 mV/div	1 V/div	2 V/div	5 V/div
Atenuare	1/1	1/2	1/5	1/10	1/20	1/50	1/100	1/200	1/500

Se observă că toate aceste atenuări pot fi realizate utilizând doar patru atenuatori elementari, cu atenuările 1/2, 1/5, 1/10, 1/100 și conectându-i în mod convenabil în cascadă, când este necesar.

De exemplu, atenuarea 1/50 se poate realiza conectând în cascadă un atenuator 1/10 cu unul 1/5. Fiecare atenuator elementar ar putea fi realizat ca un divizor rezistiv. Impedanța de sarcină a unui atenuator poate fi impedanța de intrare în preamplificator $Z_{ip}(\omega)$ sau impedanța de intrare a altui atenuator,

$Z_{ia}(\omega)$. Cum însă intrarea oricărui atenuator ar putea fi conectată chiar la intrarea osciloscopului, iar impedanța de intrare a osciloscopului nu trebuie să depindă de treapta de atenuare, va fi necesar ca $Z_{ip}(\omega) = Z_{io}(\omega) = Z_{ia}(\omega)$. În plus, atenuarea fiecărei celule trebuie să fie independentă de frecvență. Să presupunem atenuatorul ca un divizor rezistiv (figura 2.16) realizat cu rezistoarele R_1 și R_2 și având drept sarcină impedanța de intrare în preamplificator $Z_{ip}(\omega)$. În acest caz, funcția de transfer în tensiune este

$$H(\omega) = \frac{R_2 \parallel Z_{ip}(\omega)}{R_1 + R_2 \parallel Z_{ip}(\omega)} \quad (1.28)$$

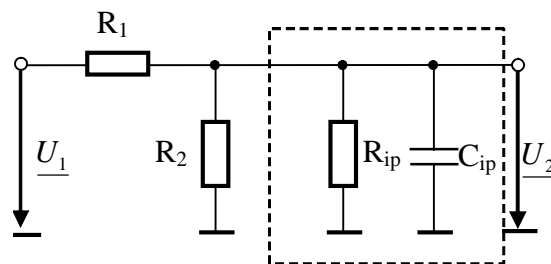


Figura 2.16. Atenuator rezistiv

Evident, deoarece $Z_{ip}(\omega)$ scade cu frecvența din cauza componentei capacitive, și $H(\omega)$ va avea o tendință de scădere. Pentru a compensa această tendință se poate introduce un condensator C_1 în paralel cu R_1 , care să favorizeze trecerea frecvențelor înalte. Se ajunge la schema din figura 2.17.

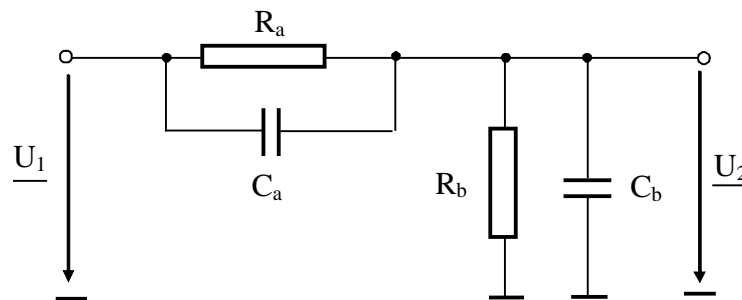


Figura 2.17. Structura unui atenuator

Funcția de transfer a circuitului este dată de relația

$$H(\omega) = \frac{U_2}{U_1} = \frac{Z_b(\omega)}{Z_a(\omega) + Z_b(\omega)} \quad (1.29)$$

unde

$$Z_a(\omega) = R_a \parallel \frac{1}{j\omega C_a} = \frac{R_a}{1 + j\omega R_a C_a} = \frac{R_a}{1 + j\omega \tau_a}, \quad \tau_a = R_a C_a$$

$$Z_b(\omega) = R_b \parallel \frac{1}{j\omega C_b} = \frac{R_b}{1 + j\omega R_b C_b} = \frac{R_b}{1 + j\omega \tau_b}, \quad \tau_b = R_b C_b$$
(1.30)

așa încât

$$H(\omega) = \frac{U_2}{U_1} = \frac{R_b(1 + j\omega \tau_a)}{R_a + R_b + j\omega(R_a \tau_b + R_b \tau_a)} = \frac{R_b}{R_a + R_b} \frac{1 + j\omega \tau_a}{1 + j\omega \left(\frac{R_a \tau_b + R_b \tau_a}{R_a + R_b} \right)}$$
(1.31)

La frecvențe joase

$$H(0) = \frac{R_b}{R_a + R_b} = k$$
(1.32)

Este de dorit ca funcția de transfer să nu depindă de frecvență, ceea ce se întâmplă dacă

$$\tau_a = \frac{R_a \tau_b + R_b \tau_a}{R_a + R_b} = \tau$$
(1.33)

ceea ce implică

$$\tau_a = \tau_b = \tau$$
(1.34)

Aceasta este *condiția de compensare perfectă* a atenuatorului. Este foarte important ca această condiție să fie îndeplinită. Îndeplinirea ei presupune nu numai constanța atenuării cu frecvența, ci și faptul că răspunsul atenuatorului la un semnal complex nu este distorsionat. De exemplu, răspunsul atenuatorului compensat la semnalul treaptă $u_1(t) = \sigma(t)$ va fi tot un impuls treaptă ponderat cu valoarea k , $k\sigma(t)$.

În cazul în care $\tau_a \neq \tau_b$, atenuarea nu mai este constantă cu frecvența, deci vor apărea erori în măsurarea amplitudinii unor semnale sinusoidale. În plus, semnalele cu o formă mai complexă vor fi distorsionate. Ca exemplu, în cazul impulsului treaptă aplicat la intrare, se poate arăta că semnalul de la ieșirea atenuatorului se obține în acest caz

$$u_2(t) = k\sigma(t) + \frac{\tau_a - \tau_b}{(C_b + C_a)(R_a + R_b)} e^{-\frac{t}{\tau}} \sigma(t)$$
(1.35)

Sunt posibile două situații:

- $\tau_b > \tau_a$ atenuator subcompensat; în acest caz atenuatorul defavorizează semnalele de frecvențe mari, iar în răspunsul la treaptă, termenul al doilea este negativ, având la efect o distorsionare a frontului.
- $\tau_b < \tau_a$ atenuator supracompensat; atenuatorul favorizează semnalele de frecvențe înalte, iar în răspunsul la treaptă, termenul al doilea este pozitiv, conducând la o supracreștere.

În figura 2.16 este reprezentat răspunsul în cele trei cazuri (atenuator compensat, supracompensat și subcompensat).

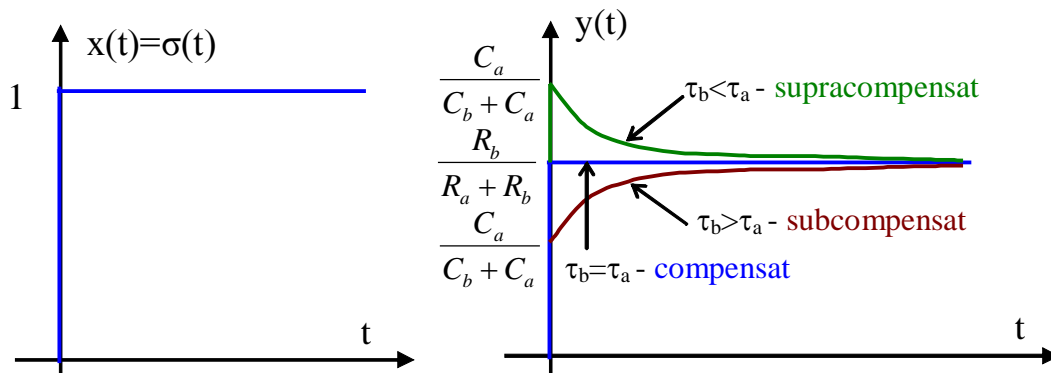


Figura 2.18. Răspunsul atenuatorului

EXEMPLU: În figura 2.19 sunt prezentate imaginile care se obțin pe ecranul osciloscopului, când la intrarea sa se aplică un semnal dreptunghiular periodic, în cele trei cazuri în care se poate afla atenuatorul, din punctul de vedere al condiției de compensare.

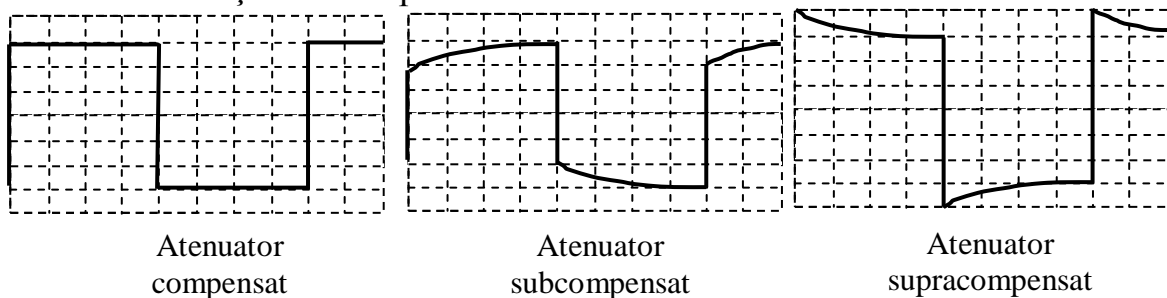


Figura 2.19.

Preamplificatorul canalului Y – Realizează o bună parte din funcțiunile specifice canalului Y:

- realizează o primă amplificare a semnalului de la ieșirea atenuatorului
- face trecerea de la intrarea asimetrică la ieșire simetrică (diferențială) necesară pentru sistemul de deflexie;
- asigură o impedanță de intrare mare ($R_{in}=1M\Omega$, $C_{in}=10\div 80pF$);
- asigură protecția la supratensiuni aplicate pe borna de intrare;
- extragerea unui semnal pentru sincronizarea internă.
- În acest bloc se realizează reglajele și selecțiile specifice canalului Y, mai puțin treptele pentru C_y , realizate în atenuatorul calibrat.

Comutatorul de canale

Este necesar în cazul în care osciloscopul are mai multe canale (posibilitatea de a afișa simultan mai multe semnale, cel mai frecvent două). În acest caz, dacă osciloscopul nu are decât un singur fascicol de electroni, nu

pot fi afișate mai multe imagini simultan. Pentru a permite totuși vizualizarea simultană a semnalelor de pe mai multe canale, este folosit blocul de comutare a canalelor. Acesta are rolul de a multiplexa semnalele care trebuie vizualizate. Există două moduri de vizualizare a mai multor canale:

- modul alternat (**ALT**)
- modul comutat (chopper - **CHOP**)

1. Modul alternat

Semnalele sunt afișate alternat. La fiecare cursă se afișează un semnal. De exemplu, în cazul unui osciloscop cu două canale, la cursele impare este afișat semnalul de pe canalul 1, iar la cursele pare este afișat semnalul de pe canalul 2. Să notăm cu T_d perioada desfășurării. Înseamnă că imaginea corespunzătoare unuia dintre canale este afișată cu o perioadă de $2T_d$. Dacă $t_p > 2T_d$, unde t_p este persistența ecranului, ochiul percepe cele două imagini ca fiind afișate simultan. Acest mod de lucru este util pentru semnale de frecvențe mari (perioadă mică). În acest caz perioada de afișare este mică și implicit alternarea celor două imagini este foarte rapidă. În cazul semnalelor de frecvențe joase, este posibil să nu mai fie îndeplinită relația de mai sus și imaginea apare pâlpâitoare, alternarea devenind vizibilă.

2. Modul comutat

Pe ecran sunt afișate eșantioane (fragmente) din cele două imagini. Comutatorul de canale comută de la o imagine la alta cu o frecvență de ordinul sutelor de kHz. Dacă această comutare se face cu o frecvență suficient de mare, mai precis cu o perioadă $T_c \ll T_d$, și asincron cu desfășurarea, discontinuitatea imaginilor afișate pe ecran nu este sesizată de ochi. Modul de lucru comutat este util pentru frecvențe joase, unde inegalitatea de mai sus poate fi ușor îndeplinită. Acest mod de lucru este în mod curent marcat pe osciloscop prin prescurtarea CHOP (de lb. Engleză – chopped).

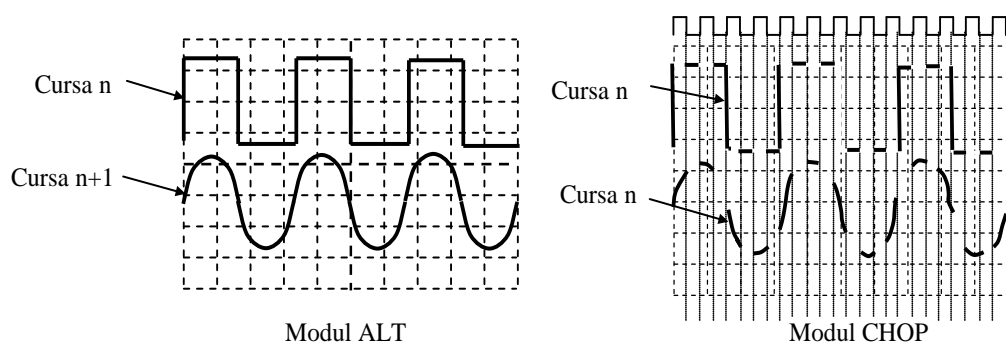


Figura 2.20. Modurile de afișare alternat și comutat

Amplificatorul de deflexie

- Amplificator diferențial de bandă largă
- Are amplificare fixa
- Funcționează la nivel mare