

LUCRARE DE LABORATOR LAB-09

CIRCUITE DE EȘANTIONARE-MEMORARE

Autor: Conf.dr.ing. Constantin Harja

1. SCOPUL LUCRĂRII

Scopul prezentei lucrări de laborator este studierea și testarea multiplexoarelor și circuitelor de eșantionare-memorare. În lucrare se prezintă, spre aprofundare, principiile, legile, fenomenele parazite și caracteristicile circuitelor de eșantionare-memorare. Se experimentează fenomenul de apariție a semnalelor *alias* și se testează principalii parametri ai unui circuit de eșantionare-memorare.

2. GENERALITĂȚI

Măsurarea numerică a mărimilor cu variație continuă în timp presupune discretizarea valorilor acestor mărimi. Procesul de discretizarea se desfășoară pe două direcții. Mai întâi are loc o discretizare în timp, în sensul că măsurarea se efectuează la momente de timp prestabilite. Ca urmare, indicația unui aparat numeric reprezintă valoarea instantanee a măsurandului la un anumit moment de timp anterior afișării. Apoi are loc o discretizare în amplitudine, în sensul că valorii prelevate la un anumit moment de timp i se pune în corespondență un număr, care poate lua în orice interval o mulțime finită de valori, pe când o mărime continuă poate lua o infinitate de valori.

Discretizarea în timp se efectuează prin eșantionare, iar cea în amplitudine prin cuantizare (conversie analog-numerică). Ca urmare, eșantionare constă în prelevarea într-un anumit interval de timp a unui număr finit de valori ale mărimii cu variație continuă, care apoi sunt convertite și prelucrate numeric. Memorarea este necesară pentru menținerea constantă a valorii eșantionate pe durata conversiei analog-numerice.

Se pune însă problema, în ce măsură o mărime reprezentată prin eșantioanele sale conservă informația conținută în semnalul inițial și poate conduce la refacerea lui. Soluția este oferită de *Teorema lui Shannon*, al cărei enunț este următorul: ***Semnalul analogic $x(t)$ este descris complet printr-un șir infinit de eșantioane ale sale, obținute printr-o eșantionare periodică ideală cu frecvența f_e , cu condiția ca spectrul***

semnalului $x(t)$ să nu conțină nici o componentă de frecvență superioară valorii $f_e/2$. Altfel spus, dacă $f_{\max}$ este frecvența cea mai ridicată din spectrul semnalului $x(t)$, condiția Shannon se exprimă prin: $f_e = 1/T_e \geq 2f_{\max}$.

Eșantionarea ideală poate fi exprimată matematic prin produsul dintre semnalul de eşantionat – $x(t)$ și un șir periodic de impulsuri *Dirac* cu perioada – $T_e = 1/f_e$. În acest caz, densitatea spectrală de putere a semnalului eşantionat corespunde unei repetiții periodice cu frecvența – f_e , a densității spectrale de putere a semnalului – $x(t)$, multiplicată cu un factor constant (f_e^2).

Practic, nu pot fi realizate circuite capabile să determine valoarea instantanee a amplitudinii unui semnal $x(t)$. Ca urmare, va fi determinată valoarea medie a acestei amplitudini pe un interval de timp finit T_μ . Durata de mediere T_μ produce o deformare a spectrului semnalului $x(t)$, corespunzătoare unei filtrări trece-jos aplicată înainte de eşantionare. Din această cauză se impune ca timpul de mediere T_μ să fie cât mai redus.

Semnalele fizice nu posedă un spectru de frecvență limitat și aceasta se întâmplă cel puțin din cauză că un semnal este întotdeauna însoțit de zgomot și mai ales de zgomot alb. Astfel, nu există niciodată garanția respectării condiției Shannon.

Nerespectarea condiției Shannon conduce la apariția așa-ziselor semnale *alias*, care sunt niște semnale false cu frecvență $< f_e/2$, rezultate din eşantioanele componentelor spectrale cu frecvența $> f_e/2$. Din această cauză se impune plasarea înaintea circuitului de eşantionare a unui filtru trece-jos numit *filtru anti-alias*, care limitează spectrul semnalului $x(t)$ la o valoare controlabilă și $< f_e/2$. În această situație, condiția Shannon se stabilește în funcție de frecvența de tăiere a filtrului anti-alias.

Schema de principiu a unui circuit de eşantionare-memorare este ilustrat în Fig.1.

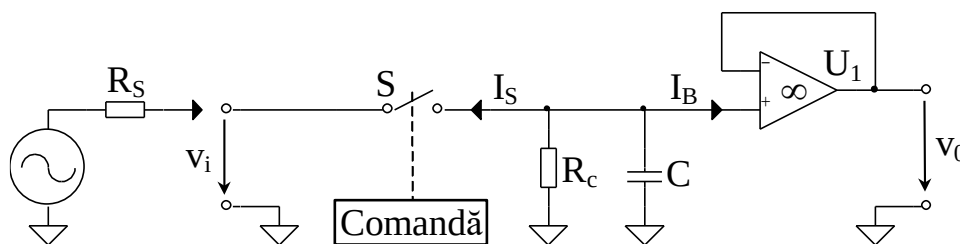


Fig.1. Schema de principiu a unui circuit de eşantionare-memorare.

Circuitul de eşantionare-memorare are două faze de funcționare:

- **Faza de eşantionare** – când comutatorul S este închis și tensiunea pe condensatorul C urmărește semnalul de intrare – v_i , cu o întârziere determinată de constanta de timp:

$$\tau_I = (R_S + R_{ON})C \quad (1)$$

unde R_S este rezistența sursei de semnal – v_i , iar R_{ON} – rezistența comutatorului S în starea închis. Reducerea acestei constante de timp este de mare importanță, deoarece determină durata eșantionării. Astfel, pentru o eroare de 0,05% durata eșantionării trebuie să fie de minimum $8\tau_I$.

- **Faza de memorare** – după ce comutatorul este deschis, iar condensatorul, încărcat la valoarea instantanee a semnalului se intrare din acel moment, se descarcă datorită curenților de intrare a amplificatorului operațional – I_B și de scurgeri a comutatorului – I_S , precum și datorită rezistenței de pierderi a condensatorului – R_C . Viteza de descărcare are expresia:

$$\frac{dv_0}{dt} = \frac{dv_C}{dt} = \frac{1}{C} \left(I_S + I_B + \frac{v_C}{R_C} \right) \approx \frac{1}{C} I_B. \quad (2)$$

deoarece ponderea cea mai mare o are curentul de polarizare I_B . Pentru ca descărcarea condensatorului să nu introducă erori semnificative, trebuie ca constanta de timp de descărcare să fie de cel puțin 10^5 ori mai mare decât timpul de memorare pentru care valoarea eșantionată este utilă.

3. SCHEMA CIRCUITULUI DE EȘANTIONARE-MEMORARE

Pentru reducerea constantei de timp de încărcare se utilizează scheme în care comutatorul este inclus într-o buclă de reacție, datorită căreia efectul rezistenței R_{ON} devine neglijabil. O astfel de schemă constituie obiectul acestei lucrări de laborator, fiind reprezentată în Fig.2.

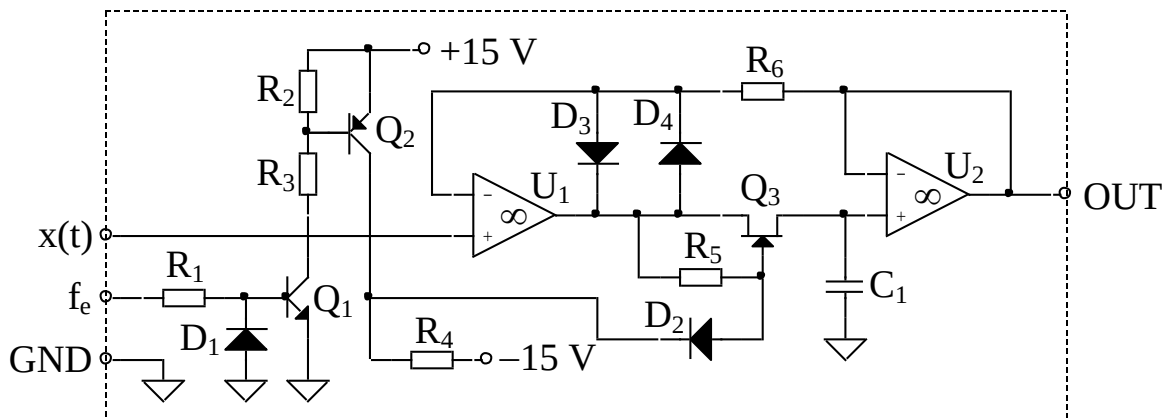


Fig.2. Schema electrică a circuitului de eșantionare-memorare.

Circuitele de eşantionare-memorare sunt împărțite în neinversoare, care au câștig unitar și inversoare, care pot avea și câștig diferit de unitate.

Din Fig.2 se observă că circuitul prezentat este neinversor cu câștig unitar (amplificatoarele operaționale U_1 și U_2 lucrează în regim de repetor).

Comutatorul S (Fig.1) este realizat cu tranzistorul Q_3 conectat în bucla de reacție negativă realizată cu amplificatoarele operaționale U_1 și U_2 . Când Q_3 este deschis, U_1 forțează încărcarea condensatorului C_1 astfel ca tensiunea de ieșire a amplificatorului U_2 să fie egală cu tensiunea de intrare. Când Q_3 este blocat, tensiunea de ieșire va fi egală cu tensiunea de pe condensatorul C_1 din momentul blocării.

Dioda D_2 evită polarizarea directă a joncțiunii grilă-sursă a Q_3 , iar diodele D_3 , D_4 limitează excursia tensiunii de ieșire a U_1 , îmbunătățind astfel viteza de răspuns.

Tranzistoarele Q_1 , Q_2 , dioda D_1 și rezistențele $R_1...R_4$ constituie circuitul de formare a impulsurilor de comandă a comutatorului Q_3 .

4. PARAMETRII CIRCUITELOR DE EȘANTIONARE-MEMORARE

Parametrii caracteristici circuitelor de eşantionare-memorare sunt puși în evidență pe graficul din Fig.3, unde s-a considerat un circuit de neinversor.

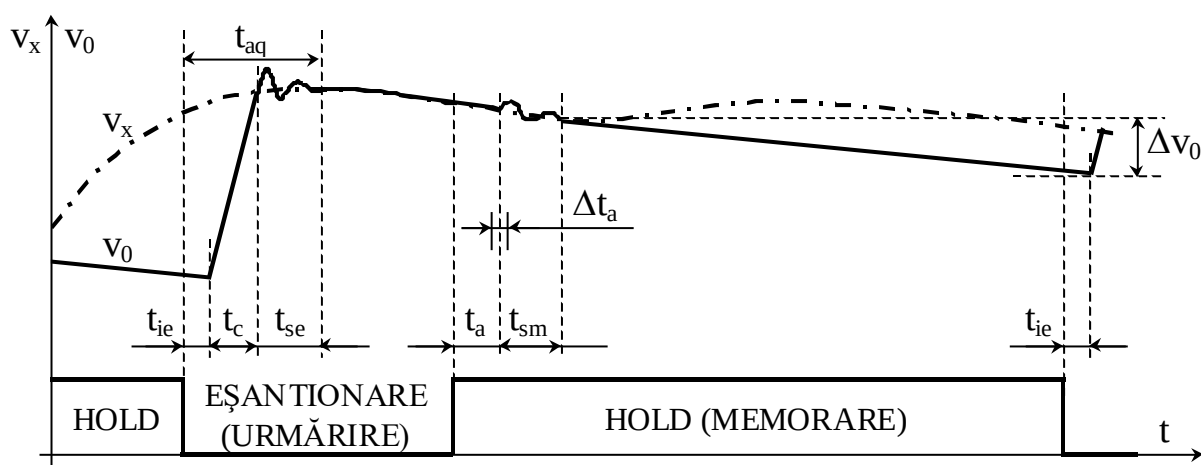


Fig.3. Formele de undă ale unui circuit de eşantionare-memorare.

Parametrii caracteristici fazei de eşantionare sau de urmărire sunt următorii:

- **Timpul de întârziere la eşantionare** – t_{ie} , reprezintă intervalul de timp scurs între momentele apariției comenzii de eşantionare și închiderii efective a comutatorului.

Parametrul t_{ie} depinde de viteza circuitelor numerice din schema de comandă și a comutatorului și poate avea valori în intervalul 5-150 ns, tipic 15-20 ns.

- **Timpul de creștere** – t_c , reprezintă intervalul de timp necesar pentru ca tensiunea pe condensator să ajungă la nivelul semnalului de intrare. Acesta depinde în principal de viteza de creștere a tensiunii de ieșire (*Slew-Rate*) a amplificatoarelor operaționale din structura circuitului. Ca urmare, amplificatoarele utilizate în acest scop au *slew-rate* de ordinul a 200-400 V/ μ s, în cazul circuitelor rapide, coborând până la nivelul de 3-5 V/ μ s pentru circuitele mai lente, de uz general.
- **Timpul de stabilire la eșantionare** – t_{se} , reprezintă intervalul de timp necesar pentru stingerea regimului tranzitoriu al circuitului, care în momentul închiderii comutatorului este solicitat la semnal treaptă.
- **Timpul de achiziție** – t_{aq} , reprezintă suma timpilor de întârziere, de creștere și de stabilire la eșantionare. Deci t_{aq} , este intervalul de timp minim cât trebuie să dureze eșantionarea, pentru ca circuitul să dea rezultate corecte. Timpul de achiziție are valoarea stabilită în funcție de precizie. De exemplu, pentru o creștere a preciziei de la 0,1% la 0,01%, t_{aq} trebuie să crească de 4-5 ori, cum ar fi de la 6 la 25 μ s.

Dacă timpul de eșantionare este mai mare decât timpul de achiziție, după expirarea acestuia circuitul intră în regim de urmărire a semnalului de intrare, caracterizat de o *eroare de câștig*, dată de diferența dintre tensiunile de intrare și de ieșire. Cauzele acestei erori sunt tensiunile de *offset*, constanta de timp de încărcare a condensatorului de memorare, limitările în viteză ale amplificatoarelor etc.

Parametrii caracteristici fazei de memorare sunt următorii:

- **Timpul de apertură** – t_a , reprezintă de fapt timpul de întârziere la memorare, adică intervalul de timp scurs între momentele apariției comenzii de memorare și deschiderii efective a comutatorului. Un timp de apertură constant ar rămâne fără nici o influență, fiindcă efectul lui ar fi echivalent cu un defazaj constant. În realitate, t_a variază atât aleator cât și sistematic, în funcție de temperatură, tensiune de alimentare sau tensiune de intrare. De exemplu, timpul de apertură poate avea pentru unele circuite de eșantionare-memorare o derivă de 3-5%/°C.
- **Timpul de stabilire la memorare** – t_{sm} , reprezintă intervalul de timp necesar pentru stingerea regimului tranzitoriu al circuitului, după deschiderea comutatorului. Regimul tranzitoriu care apare la aplicarea comenzii de memorare include și semnalul parazit care pătrunde prin capacitățile de cuplaj cu sursa de comandă. Din această cauză, apare un așa-numit *decalaj la blocare* al tensiunii de ieșire.

- **Diafonia** – se definește ca variația tensiunii de ieșire datorită semnalului de intrare care pătrunde prin capacitatea parazită paralel a comutatorului în starea blocat. Diafonia depinde de frecvență și se exprimă de obicei în decibeli.
- **Căderea sau panta de cădere a tensiunii de ieșire** – Δv_0 , apare datorită pierderii de sarcină a condensatorului de memorare, prin rezistențele și generatoarele de curent parazite, care apar în paralel pe acest condensator.

5. PROBLEME TEORETICE ȘI EXPERIMENTALE

5.1. Se analizează funcționarea schemei electrice și se calculează valorile numerice ale componentelor electronice.

5.2. Se precizează calitativ sursele de erori care determină parametrii circuitului, conform pct.4.

5.3. Verificarea experimentală a funcționării circuitului:

- se aplică semnal de intrare cu diferite forme (sinusoidal, dreptunghiular, etc.) și frecvențe, cu amplitudinea de max. 5 V;
- se aplică semnal de eșantionare de formă dreptunghiulară cu diferite frecvențe și amplitudinea de aprox. 5 V;
- se vizualizează cu un osciloscop semnalele de intrare și ieșire;
- se precizează frecvențele semnalului de intrare și de eșantionare pentru care se observă modificări ale formei sau amplitudinii semnalului de ieșire, altele decât cele specifice procesului de eșantionare-memorare;
- se pune în evidență fenomenul de apariție a semnalelor *alias*, reglând frecvența de eșantionare de la limita *Shannon* până la valori mult mai reduse.

5.4. Măsurarea timpului de creștere:

- se aplică la intrare semnal dreptunghiular cu frecvență de sute de Hz și se măsoară timpul de creștere – t_c pe ecranul osciloscopului;
- se compară valoarea obținută cu constanta de timp de încărcare a condensatorului ($R_{ON} = 100 \Omega$, $C_1 = 10 \text{ nF}$).

5.5. Măsurarea pantei de cădere a tensiunii de ieșire:

- se aplică la intrare o tensiune continuă și se scade frecvența de eșantionare până când panta de cădere a tensiunii de ieșire devine vizibilă;

- se determină pe ecranul osciloscopului panta de cădere a tensiunii de ieșire și se compară cu valoarea calculată, considerând descărcarea condensatorului C_1 numai prin curentul de intrare al circuitului U_2 , care are valoarea de 100 nA.

5.6. Determinarea diafoniei:

- se pune la masă intrarea de comandă și se aplică la intrare semnal sinusoidal cu frecvența crescătoare;
- se trasează caracteristica amplitudine-frecvență a semnalului de ieșire;
- diafonia se exprimă prin frecvența semnalului de intrare la care raportul în decibeli dintre semnalul de ieșire și semnalul de intrare atinge o anumită valoare, ca de exemplu valoarea de -40 dB.

6. ÎNTREBĂRI

- 6.1. Din ce cauză este necesară operația de eșantionare memorare?
- 6.1. În ce constă operația de eșantionare-memorare?
- 6.2. În ce situație este suficientă condiția *Shannon*?
- 6.3. Ce fenomen apare în cazul în care nu este îndeplinită condiția *Shannon*?
- 6.4. Cum se elimină orice posibilitate de apariția a semnalelor *alias*?
- 6.5. Din ce considerente se stabilește frecvența de eșantionare în cazul circuitelor de eșantionare-memorare reale?
- 6.6. Prin ce artificii de circuit se reduc în schema *din Fig.2* o parte din erorile unui circuit simplu de eșantionare-memorare care ar funcționa conform schemei de principiu *din Fig.1*?