

LUCRARE DE LABORATOR LAB-07

MULTIPLICATOARE ANALOGICE

Autor: Conf.dr.ing. Constantin Harja

1. SCOPUL LUCRĂRII

Scopul prezentei lucrări de laborator este studierea și testarea multiplicatoarelor analogice. Lucrarea prezintă aspecte referitoare la utilizarea, principiile de funcționare și la caracteristicile specifice ale multiplicatoarelor analogice. Pentru experimentare este prezentat un multiplicator analogic cu modulare amplitudine-durată, care, dintre toate tipurile de multiplicatoare analogice cunoscute, oferă cea mai mare precizie.

2. GENERALITĂȚI

Datorită dezvoltării tehnologiei circuitelor integrate, multiplicatorul analogic a devenit un bloc funcțional uzual, la fel ca și amplificatorul operațional. Creșterea performanțelor, concomitent cu scăderea prețului de cost, a extins foarte mult aria de aplicații a multiplicatoarelor analogice.

Operațiile de bază care pot fi efectuate cu ajutorul multiplicatoarelor analogice sunt: înmulțire, ridicare la pătrat, împărțire, extragere rădăcină pătrată, ridicare la o putere variabilă, calculul valorii medii pătratice, generarea unei serii de puteri, etc., iar aplicațiile sunt în următoarele domenii:

- circuite de calcul analogic; wattmetre electronice;
- generatoare de semnal controlate prin tensiune;
- circuite pentru controlul automat al amplificării;
- dubloare de frecvență; modulatori în amplitudine;
- detectoare sincrone și detectoare sensibile la fază;
- demodulatori pentru modulație în frecvență;
- circuite cu calare de fază – *PLL (phase-lock loop)*.

Multiplicatorul analogic este un bloc electronic de calcul analogic prevăzut cu două intrări și o ieșire, la care tensiunea de ieșire – v_0 este proporțională cu produsul celor două tensiuni v_x și v_y aplicate la intrare, conform relației:

$$v_0 = \frac{v_x \cdot v_y}{k}, \quad (1)$$

unde k este o constantă numită factor de proporționalitate sau factor de scară și are dimensiunea unei tensiuni, fiind exprimată în volți.

Multiplicatoarele analogice pot funcționa în unul, două sau patru cadrane, în funcție de semnul (polaritatea) tensiunilor de intrare acceptat, semnul tensiunii de ieșire corespunzând semnului rezultat din produsul algebric.

3. CARACTERISTICILE MULTIPLICATOARELOR ANALOGICE

Luând în considerare erorile inerente oricărui obiect sau sistem fizic, expresia (1), corespunzătoare situației ideale, capătă forma:

$$v_0 = \frac{v_x \cdot v_y}{k} + \varepsilon, \quad (2)$$

unde ε reprezintă eroarea totală, funcție de ambele variabile de intrare v_x , v_y , poate fi reprezentată ca o suprafață în planul tridimensional (v_x , v_y , ε). O astfel de eroare este mai greu de evaluat, în comparație cu erorile circuitelor cu o singură intrare de semnal.

În unele cataloage, suprafața (v_x , v_y) este descrisă prin contururi de eroare constantă în planul (v_x , v_y), în altele sunt reprezentate curbele obținute prin intersectarea acestei suprafețe cu planele ($v_x = 0$, $v_y = \pm v_{y\max}$) și ($v_y = 0$, $v_x = \pm v_{x\max}$). În specificațiile sumare este dată în procente o eroare maximă raportată la tensiunea de ieșire nominală.

Eroarea totală poate fi descompusă în mai multe componente, care pot fi grupate în erori statice și erori dinamice.

3.1. ERORILE STATICE ALE MULTIPLICATOARELOR ANALOGICE

Prin erori statice se înțeleg erorile măsurabile la ieșire când tensiunile de intrare sunt continue sau lent variabile.

3.1.1. Tensiunea de decalaj la ieșire – reprezintă tensiunea măsurată la ieșire când tensiunile de intrare sunt nule:

$$V_{d0} = V_0|_{v_x=v_y=0}. \quad (3)$$

V_{d0} poate atinge câteva zeci de mV și poate fi compensată prin reglaje exterioare. Se poate specifica și coeficientul de variație cu temperatura a tensiunii de decalaj.

- 3.1.2. Tensiunile de decalaj datorită cuplajului parazit** – reprezintă tensiunile ce apar la ieșire când la una din intrări se aplică tensiune zero, iar la cealaltă tensiune maximă. Valorile acestor tensiuni de decalaj sunt tot de ordinul zecilor de mV.
- 3.1.3. Eroarea de neliniaritate** – reprezintă deviația procentuală maximă față de caracteristica de transfer liniară, pentru fiecare intrare, cealaltă fiind conectată la tensiunea nominală. Uzual, această eroare se situează sub valoarea de 1 %.
- 3.1.4. Eroarea factorului de scară** – se definește ca abaterea procentuală a factorului de scară de la valoarea ideală. Factorul de scară poate fi ajustat din exterior și astfel această eroare nu prezintă importanță dacă factorul de scară este stabil în timp și cu temperatura.

3.2. ERORILE DINAMICE ALE MULTIPLICATOARELOR ANALOGICE

Limitările în frecvență ale multiplicatorului și zgomotul de bandă largă, reprezintă surse de creștere a erorii totale, atunci când frecvența semnalelor de intrare se mărește.

Pentru determinarea comportării dinamice se aplică tensiune continuă pe una din intrări, iar la cealaltă intrare se aplică semnal sinusoidal cu frecvență variabilă, semnal treaptă sau impulsuri dreptunghiulare.

Banda de frecvență la 3 dB, parametrii regimului tranzitoriu și de zgomot se definesc identic ca la amplificatoarele operaționale.

În mod obișnuit comportarea dinamică a unui multiplicator analogic este caracterizată prin eroarea scalară și eroarea vectorială.

3.2.1. Eroarea scalară – se definește ca variația procentuală a modulului tensiunii de ieșire la semnal alternativ de mică amplitudine:

$$\varepsilon_s = \frac{|v_0|_{\text{teoretic}} - |v_0|_{\text{măsură}}}{|v_0|_{\text{teoretic}}} 100[\%]. \quad (4)$$

3.2.2. Eroarea vectorială – este dată de defazajul dintre tensiunea de ieșire măsurată și cea teoretică și se specifică în procente:

$$\varepsilon_v [\%] \approx 100 \sin \phi \approx 100 \phi, \quad (5)$$

unde defazajul ϕ este exprimat în radiani și presupus suficient de mic.

Se poate observa că $\varepsilon_v = 1\%$ pentru $\Phi = 0,01 \text{ rad} = 0,57^\circ$, în timp ce eroarea scalară corespunzătoare aceleiași frecvențe este doar de 0,005%.

În foile de catalog se specifică frecvența la care eroarea vectorială ajunge la valoarea de 1%, notată uzual cu $f(1\% \text{ Vector})$ și frecvența la care eroarea scalară ajunge la valoarea de 1%, notată cu $f(1\%)$.

Ca ordin de mărime, pentru un multiplicator cu o bandă de frecvență $f_{3dB} = 1$ MHz, rezultă $f(1\%) = 70...100$ kHz și $f(1\% \text{ Vector}) = 5...10$ kHz.

Regimul dinamic influențează și erorile datorate cuplajului parazit. Ca urmare, se specifică frecvența la care eroarea dată de cuplajul parazit atinge valoarea de 1%, fie valoarea acestei erori la diferite frecvențe.

4. PRINCIPIUL MULTIPLICATOARELOR ANALOGICE

Există numeroase tehnici de realizare a operației de multiplicare analogică a două semnale electrice. Dintre acestea s-au consacrat, prin performanțe și răspândire, următoarele:

- multiplicatoarele cu transconductanță variabilă;
- multiplicatoarele cu sumare logaritmică;
- multiplicatoarele cu modulare amplitudine-durată.

În continuare se prezintă succint principiul de funcționare al unui multiplicator cu modulare amplitudine-durată, ilustrat în *Fig.1*.

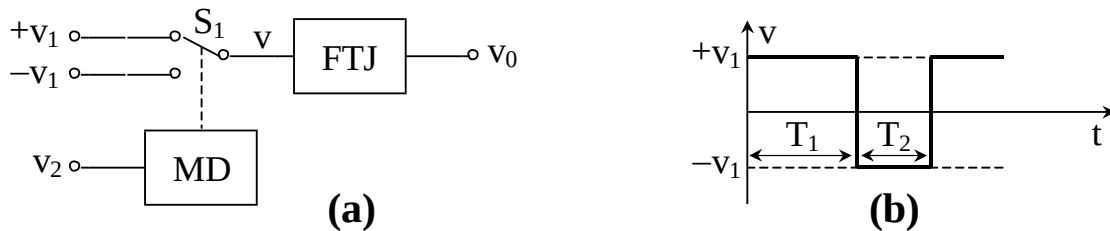


Fig.1. Principiul multiplicatorului cu modulare amplitudine-durată.

Modularea în amplitudine este efectuată cu tensiune v_1 , iar cea în durată cu v_2 . Comutatorul S_1 este comandat de către modulatorul duratei – MD , impulsurile aplicate la intrarea filtrului trece-jos – FTJ având forma din *Fig.12.b*. La ieșirea FTJ se obține valoarea medie a acestor impulsuri:

$$v_0 = \frac{1}{T_1 + T_2} \int_0^{T_1+T_2} v dt = \frac{T_1 - T_2}{T_1 + T_2} v_1. \quad (6)$$

Dacă se realizează dependența:

$$\frac{T_1 - T_2}{T_1 + T_2} = k v_2, \quad (7)$$

se obține expresia tensiunii de ieșire a multiplicatorului analogic:

$$v_0 = k(v_1 \cdot v_2). \quad (8)$$

Ca urmare impulsurile generate de MD trebuie să satisfacă (77). O soluție posibilă pentru rezolvarea acestei probleme este reprezentată în Fig.2.

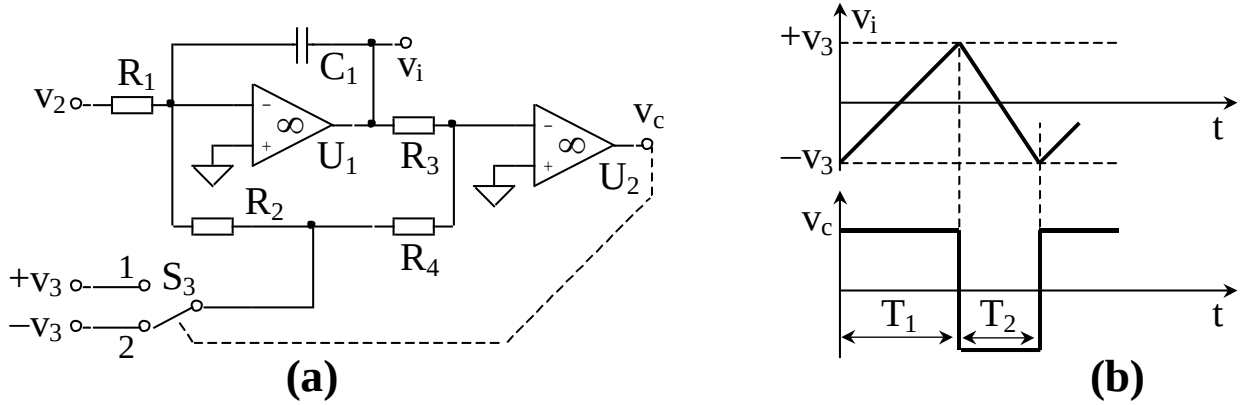


Fig.13. Principiul modulatorului duratei.

Modulatorul duratei este constituit dintr-un integrator realizat cu \$U_1\$, \$R_1\$, \$R_2\$, \$C_1\$ și un comparator realizat cu \$U_2\$, \$R_3\$, \$R_4\$. Comparatorul \$U_2\$ își schimbă starea când tensiunea de ieșire a integratorului – \$v_i\$ atinge nivelele \$+v_3 / -v_3\$ și comandă comutatorul \$S_3\$.

Pe intervalul de timp \$T_1\$ (\$S_3 = 2\$), în ipoteza că \$R_1 = R_2 = R_3 = R_4 = R\$ și \$v_2 > 0\$, tensiunea de ieșire a integratorului – \$v_i\$, este dată de relația:

$$v_i(t) = -v_3 + \frac{1}{RC_1} \int_0^{T_1} (v_3 - v_2) dt, \quad (9)$$

care la momentul \$t = T_1\$ luând valoarea \$v_i(T_1) = v_3\$, rezultă:

$$T_1 = \frac{2v_3}{v_3 - v_2} RC_1. \quad (10)$$

Pe intervalul de timp \$T_2\$ (\$S_3 = 1\$), tensiunea de ieșire a integratorului este:

$$v_i(t) = v_3 - \frac{1}{RC_1} \int_{T_1}^{T_1+T_2} (v_3 + v_2) dt, \quad (11)$$

care la momentul \$t = T_1 + T_2\$ luând valoarea \$v_i(T_1 + T_2) = -v_3\$, rezultă:

$$T_2 = \frac{2v_3}{v_3 + v_2} RC_1. \quad (12)$$

Pe baza (10) și (12) se calculează expresiile:

$$\frac{T_1 - T_2}{T_1 + T_2} = \frac{v_2}{v_3}; \quad f = \frac{1}{T_1 + T_2} = \frac{(v_3 - v_2)(v_3 + v_2)}{4RC_1 v_3^2}, \quad (13)$$

unde f este frecvența internă de lucru a multiplicatorului, egală cu frecvența tensiunii liniar variabile – v_1 sau a impulsurilor de la ieșirea comparatorului – v_c .

Frecvența internă variază funcție de raportul dintre v_2 și v_3 , având valoarea maximă $f_{\max} = 1/4RC_1$ pentru $v_2 = 0$. Dacă intervalul de variație a tensiunii v_2 se limitează la valoarea $v_2 = 0,5v_3$, rezultă $f_{\min} = 0,75f_{\max}$.

Luând în considerare și modulația în amplitudine, din (7), (8) și (13) se obține:

$$v_0 = \frac{v_1 \cdot v_2}{v_3}. \quad (14)$$

Pentru ca (10), (12) și (13) să fie definite (deci modulatorul să funcționeze) și $f_{\min} = 0,75 \cdot f_{\max}$, sunt necesare următoarele condiții:

$$v_3 > 0 \quad \text{și} \quad |v_2| \leq 0,5v_3. \quad (15)$$

Din (14), respectând (15), se observă că multiplicatorul analizat poate efectua operația de multiplicare analogică în patru cadrane (v_1 și v_2 pot fi tensiuni pozitive sau negative) și operația de divizare în două cadrane (v_3 poate fi numai pozitivă). Pentru o funcționare corectă, trebuie ca valorile tensiunilor v_1 , v_2 și v_3 să fie astfel alese încât valoarea tensiunii de ieșire calculată cu (84) să nu depășească 10 V.

5. SCHEMA ELECTRICĂ A MULTIPLICATORULUI AMPLITUDINE-DURATĂ

Schema electrică a multiplicatorului cu modulare amplitudine-durată, care constituie obiectul prezentei lucrări de laborator este reprezentată în *Fig.3*. Această schemă se remarcă printr-un raport optim complexitate/performance.

Valorile componentelor electronice sunt următoarele:

- $R_1 = R_2 = \dots = R_{11} = R_{12} = 100 \text{ k}\Omega \pm 0,25\%$;
- $R_{13} = 20 \text{ k}\Omega \pm 5\%$; $C_1 = 0,33 \text{ }\mu\text{F} \pm 5\%$; $C_2 = 1,5 \text{ }\mu\text{F} \pm 5\%$.

Comutatorul S_1 este realizat cu amplificatorul operațional U_4 și rezistențele R_8 , R_9 , R_{10} și Q_2 , iar FTJ cu U_5 , R_{11} , R_{12} și C_2 (*Fig.12*). Funcție de starea tranzistorului Q_2 , saturat sau blocat, amplificatorul U_4 lucrează ca inversor ($A = -1$) sau repetor ($A = +1$).

Modulatorul duratei este identic ca structură și notații cu cel reprezentat în *Fig.2*, comutatorul S_3 fiind realizat cu U_3 , R_5 , R_6 , R_7 și Q_1 , pe același principiu ca și S_1 . Dioda D_1 și rezistența R_{13} asigură comanda celor două tranzistoare cu efect de câmp (cu canal n) numai cu alternanța negativă a impulsurilor de la ieșirea comparatorului U_2 .

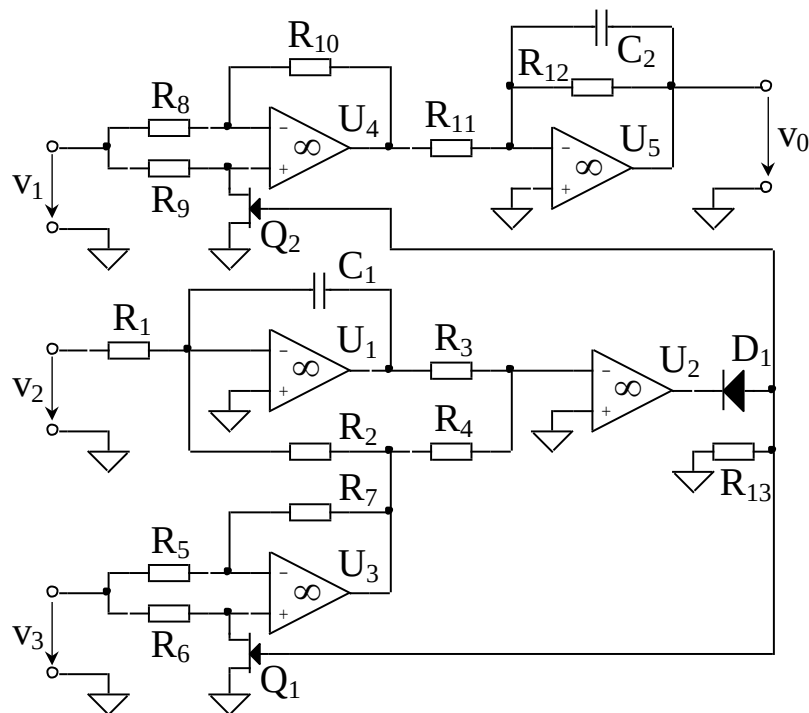


Fig.3. Schema electrică a multiplicatorului amplitudine-durată.

6. PROBLEME TEORETICE ȘI EXPERIMENTALE

- 6.1. Se aprofundează funcționarea modulatorului, sub aspect calitativ și cantitativ, și se precizează principalele surse de erori.**
- 6.2. Se calculează caracteristica de transfer a filtrului trece-jos și frecvența internă de lucru a multiplicatorului.**
- 6.3. Determinarea tensiunilor de decalaj ale multiplicatorului:**
 - se reglează tensiunea $v_3 = 10 \text{ V}$;
 - se măsoară tensiunea de decalaj la ieșire – V_{d0} , conform definiției;
 - se măsoară tensiunile de decalaj la ieșire datorită cuplajului parazit – V_{d1} și V_{d2} , conform definiției.
- 6.4. Determinarea factorului de scară al multiplicatorului:**
 - valorile nominale ale tensiunilor de intrare sunt: $V_{1n} = 10 \text{ V}$, $V_{2n} = 5 \text{ V}$;
 - se determină factorul de scară pentru $v_3 = 10 \text{ V}$, conform definiției.
- 6.5. Determinarea erorilor de neliniaritate ale multiplicatorului:**

- se determină erorile de neliniaritate, conform definiției, pentru cele două intrări, dându-se tensiunilor de intrare v_1 și v_2 valori pozitive și negative, din volt în volt, cu respectarea condițiilor din (85);
- se calculează, pentru fiecare intrare, eroarea absolută cu relația:

$$\Delta v_0 = v_0 - v_0^\circ; \quad v_0^\circ = \frac{v_1 v_2}{k}, \quad (16)$$

unde v_0 este valoarea măsurată a tensiunii de ieșire, k este factorul de scară determinat anterior, iar v_0° este valoarea tensiunii de ieșire calculată cu (81);

- se calculează eroarea de neliniaritate:

$$\varepsilon_n = \frac{\Delta v_{0\max}}{v_{0\max}}; \quad (17)$$

- datele experimentale se trec într-un tabel, conform modelului următor.

Tabel 1. Eroarea de neliniaritate pentru funcția de multiplicator

v_1	v_2	v_0	v_0°	Δv_0	ε_n
v_{11}	5 V	v_{01}	v_{01}°	Δv_{01}	$\Delta v_{01\max} = ?$ $\varepsilon_{n1} = ?$
:	:	:	:	:	
v_{1n}	5 V	v_{0n}	v_{0n}°	Δv_{0n}	
10 V	v_{21}	v_{01}	v_{01}°	Δv_{01}	$\Delta v_{02\max} = ?$ $\varepsilon_{n2} = ?$
:	:	:	:	:	
10 V	v_{2n}	v_{0n}	v_{0n}°	Δv_{0n}	

6.6. Verificarea preciziei:

- se aplică tensiuni de intrare cu valori pozitive și negative, din volt în volt, respectând condițiile: $v_0 \leq 10$ V; $|v_2| < v_3$; $v_3 \geq +1$ V;
- se calculează eroarea absolută – Δv_0 , se selectează eroarea absolută maximă – $\Delta v_{0\max}$, și se calculează eroarea raportată – ε_R , conform (16) și (17), considerându-se $k = v_3$;
- datele experimentale se trec într-un tabel, conform modelului de mai jos.

Tabel 2. Eroarea raportată a multiplicator-divizorului.

V_1	V_2	V_3	V_0	V_0°	ΔV_0	ε_n
V_{11}	V_{21}	V_{31}	V_{01}	V_{01}°	ΔV_{01}	$\Delta V_{01\max} = ?$ $\varepsilon_R = ?$
:	:	:	:	:	:	
V_{1n}	V_{2n}	V_{3n}	V_{0n}	V_{0n}°	ΔV_{0n}	

7. ÎNTREBĂRI

- 7.1. Care sunt utilizările principale ale multiplicatoarelor analogice?
- 7.2. Care sunt tehnicile consacrate pentru realizare a operației de multiplicare analogică?
- 7.3. Care este principiul de realizare a operației de multiplicare analogică cu modulare amplitudine durată?
- 7.4. Din ce motive trebuie respectate condițiile (15)?
- 7.5. Care este explicația faptului că orice multiplicator analogic poate realiza implicit și operația de divizare analogică?