



UNIUNEA EUROPEANĂ



GVERNUL ROMÂNIEI



Instrumente Structurale
2007-2013



Platformă de e-learning și curriculum e-content pentru învățământul superior tehnic

Elemente de Electronică Analogică

29. Circuite de multiplicare analogică

Amplificatoare operationale cu transconductanta (AOT)

Unul dintre amplificatoarele cu transconductanta este circuitul integrat **CA3080** produs de firma **RCA**. Schema interna a circuitului este prezentata in figura 9.1

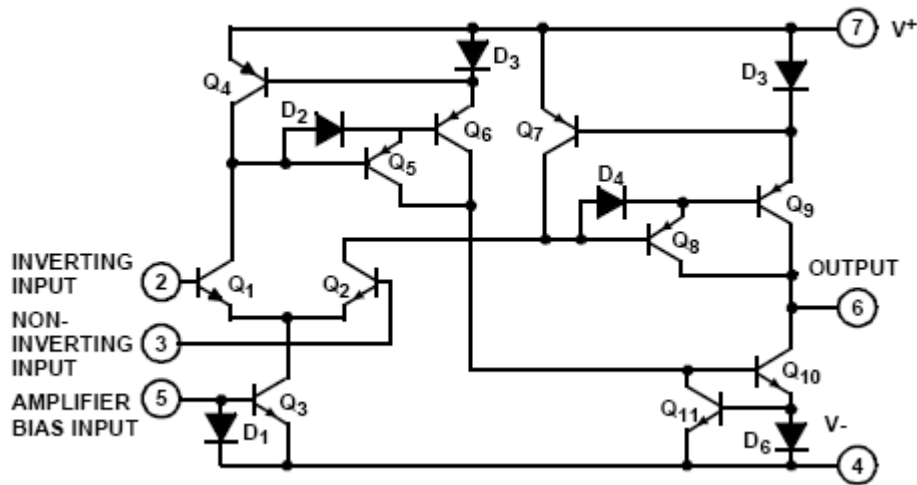


Figura 9.1 (Catalog RCA)

Analiza pe care o vom face se bazeaza pe schema de principiu prezentata in figura 9.2

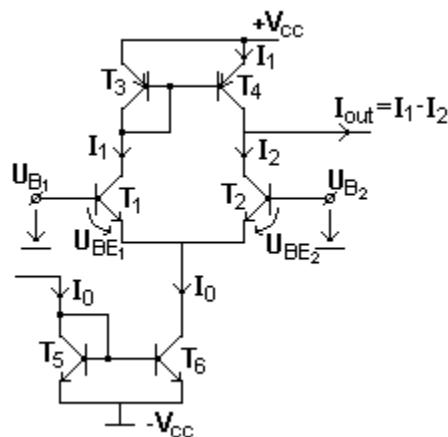


Figura 9.2

Amplificatorul propriu-zis este format de etajul diferential format de tranzistoarele T_1 si T_2 , perechile de tranzistoare (T_3, T_4) si (T_5, T_6) formand doua «oglinzi de curent ». Tinand cont de curentii de colector prin tranzistoarele T_1 si T_2 se pot scrie relatiile :

$$\begin{cases} I_1 = I_S \exp\left(\frac{U_{BE_1}}{U_T}\right) \\ I_2 = I_S \exp\left(\frac{U_{BE_2}}{U_T}\right) \end{cases} \quad (9.1)$$

Pe de alta parte : $I_0 = I_1 + I_2$ (9.2)

Vom nota : $U = U_{B1} - U_{B2} = U_{BE_1} - U_{BE_2}$ si utilizand relatiile (9.1) se deduce :

$$I_1 = I_2 e^{\frac{U}{U_T}} \quad (9.3)$$

Rezolvand sistemul de ecuatii format din relatiile 9.2 si 9.3 obtinem solutiile prezentate cu relatiile 9.4

$$\begin{aligned} I_2 &= I_0 \frac{1}{1 + e^{U/U_T}} \\ I_1 &= I_0 \frac{1}{1 + 1/e^{U/U_T}} \end{aligned} \quad (9.4)$$

Expresia curentului de iesire devine :

$$I_{OUT} = I_1 - I_2 = I_0 \frac{e^{\frac{U}{U_T}} - 1}{e^{\frac{U}{U_T}} + 1} = I_0 \operatorname{tanh}\left(\frac{U}{2U_T}\right)$$

Functia tangenta hiperbolica poate fi aproximata : $I_{OUT} \cong I_0 \frac{U}{2U_T}$ obtinandu-se:

$$I_{OUT} = GU \quad \text{unde } G = \frac{I_0}{2U_T} \text{ si reprezinta transconductanta AO}$$

Caracteristica reala a acestui amplificator este prezentata in figura 9.3.

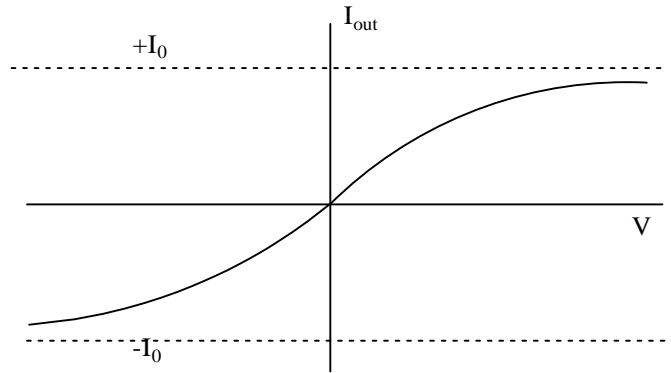


Figura 9.3

Amplificatoarele cu transconductanta sunt utilizate in foarte multe aplicatii :

- amplificatoare controlate in tensiune
- filtre controlate
- oscilatoare controlate
- rezistente controlate
- comparatoare
- multiplicatoare in patru cadrane
- circuite de esantionare si memorare

Exemple :

Rezistenta controlata prin curent

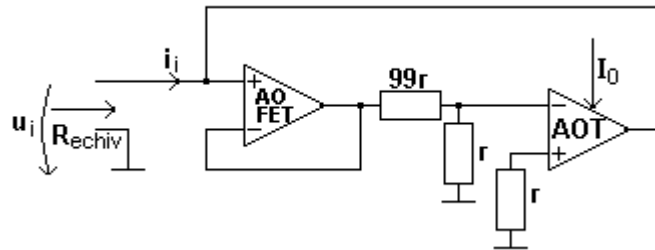


Figura 9.4

Primul amplificator operational (in montaj de repetor), are etajul de intrare realizat cu tranzistoare FET pentru a avea o impedanta de intrare foarte mare.

$$K = \frac{r}{100r} = 0.01$$

$$R_{echiv} = \frac{u_i}{i_i} = \frac{u_i}{-(-Gu_iK)} = \frac{1}{GK} = \frac{2U_T}{I_0K}$$

Cu acest montaj, pentru valori ale curentului $I_0 \in (1\text{mA} \dots 1\mu\text{A})$ se obtine o valoare de rezistenta in domeniul $R_{echiv} \in (5\text{k}\Omega \dots 5\text{M}\Omega)$.

Multiplicator/divizor

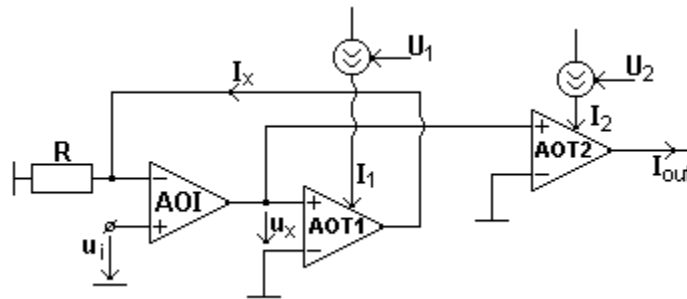


Figura 9.5

Se pot scrie relatiile :

$$u_i = RI_x \quad \text{unde } I_x = I_1 \tanh \frac{U_x}{2U_T}$$

$$I_{out} = I_2 \tanh \frac{U_x}{2U_T} = I_2 \frac{I_x}{I_1} = \frac{I_2}{I_1} \frac{u_i}{R}$$

Pentru generarea curentilor I_1 si I_2 se utilizeaza generatoare de current comandate in tensiune, obtinande-se functia:

$$I_{out} = \frac{G_2}{G_1 R} \frac{u_2 u_i}{u_1}$$

Circuite integrate liniare pentru realizarea functiei de multiplicare

Multiplicatorul analogic este un circuit electronic care furnizeaza la iesire o tensiune(curent) proportionala cu produsul valorilor a doua tensiuni (curenti) de intrare:

$$u_0 = \frac{u_x u_y}{K} ; [K]=\text{volt}$$

Erori statice si dinamice. Dintre erorile care se pot defini pentru multiplicatoare analogice putem mentiona :

► Eroarea toatala ε

$$u_0 = \frac{u_x u_y}{K} + \varepsilon(u_x, u_y)$$

Aceasta eroare este mult mai dificil de evaluat decat eroarea circuitelor cu o intrare (ex : AO). In cataloage se specifica (prin caracteristici) valorile erorii la : $(u_x, u_y) = (\pm U_{\max}, 0)$

► Tensiunea de decalaj la iesire : tensiunea masurata la iesire cand ambele intrari sunt la potential zero $U_0|_{u_x=u_y=0}$

► Tensiunea de decalaj datorata cuplajului parazit

Se defineste ca tensiunea masurata la iesire cand una din intrari este la potential de referinta (0V), iar cealalta iesire este la valoarea maxima de intrare $u_y = \pm U_{y \max}$ respectiv $u_x = \pm U_{x \max}$

► Eroarea de neliniaritate se defineste ca variatia procentuala maxima fata de cea mai buna aproximatie liniara a caracteristicii :

$$u_0 = f(U_y) \text{ cand } u_x = U_{x \max}$$

(in mod similar se defineste si pt u_x)

► Eroarea factorului de scala – se defineste ca abaterea procentuala a factorului de scala K. De cele mai multe ori acest factor poate fi reglat extern.

Metode de multiplicare analogica

Dintre metodele de realizare a multiplicatoarelor analogice putem mentiona :

• **Multiplicatoare cu lege patratica** - realizeaza produsul prin calculul expresiei :

$$XY = \frac{(X + Y)^2 - (X - Y)^2}{4}$$

Suma si diferenta se pot obtine cu AO iar legea patratica se aproximeaza pe portiuni cu o retea de diode si rezistente, prin care se modifica aplicarea unui AO. (figura 9.6). Diodele functioneaza pe post de comutatoare. Aceasta tehnica ofera o banda larga de semnal, cca. 1MHz, si in functie de numarul de segmente de aproximare a functiei, o precizie de pana la 0,25%

Exemplu de schema de aproximare a legii patraticice :

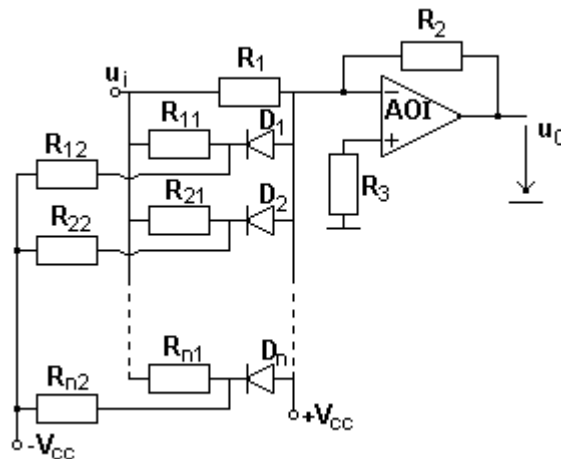


Figura 9.6

Diodele sunt astfel polarizate incat pentru $u_i=0$ toate diodele sunt in conductie

• **Multiplicarea prin modularea in tensiune si durata a unui tren de impulsuri** dreptunghiulare – se bazeaza pe calculul ariei impulsurilor obtinute. Metoda ofera o precizie mare, cca. 0,1%, dar banda de trecere este limitata (<zeci de KHz)

● *Multiplicarea prin modularea in amplitudine si durata a unui tren de impulsuri triunghiulare* – aceasta metoda este similara metodei anterioare dar asigura o precizie mai scazuta, cca. 0,5%

● *Multiplicare cu sumare logaritmica* – realizeaza produsul a doua marimi dupa legea : $XY = \text{antilog}(\log X + \log Y)$ Pentru realizarea acestei functii se utilizeaza amplificatoare neliniare logaritmice si antilogaritmice (exponentiale).

● *Multiplicatoare cu transconductanta variabila* - Aceste multiplicatoare se pot realiza in tehnica hibrida (utilizand AOT) sau in tehnica monolitica.

Multiplicatoare analogice integrate

Simbolul si structura circuitului integrat **MPY100** produs de firma **Burr-Brown** sunt prezentate in figurile 9.7 respectiv 9.8

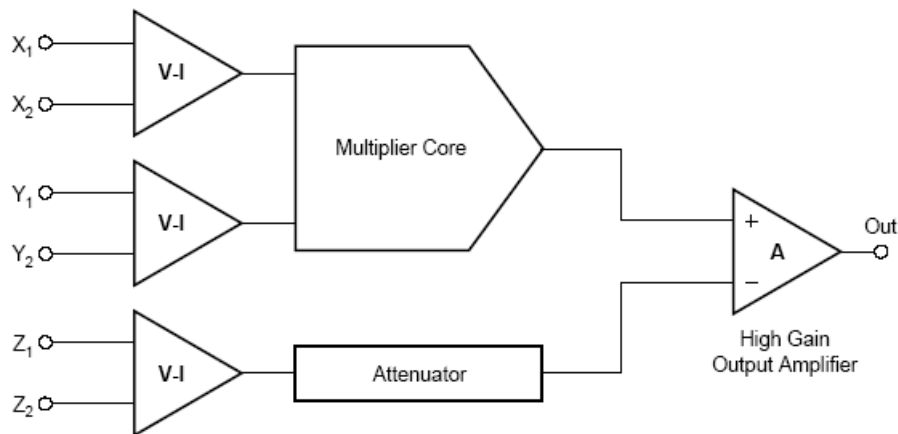


Figura 9.7 (Catalog Burr Brown)

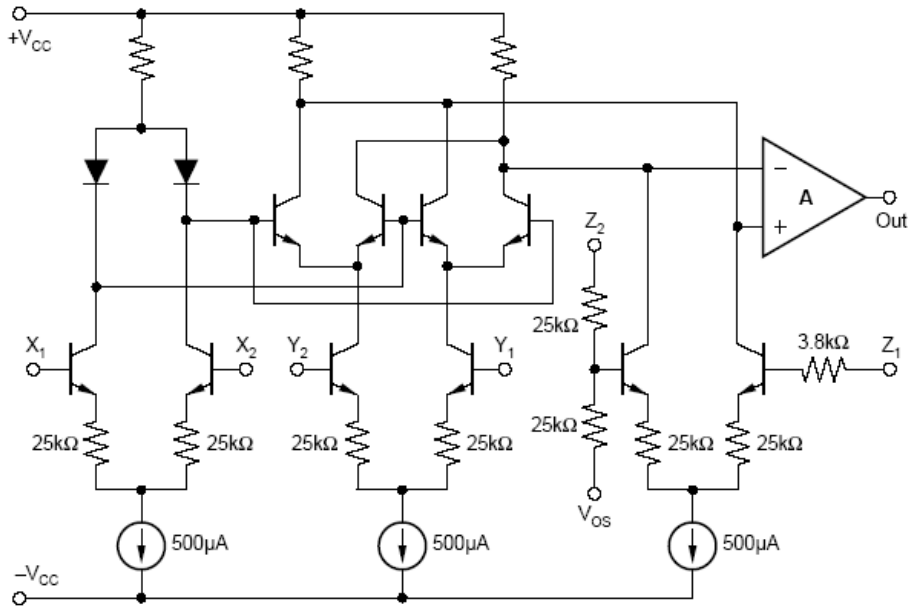


Figura 9.8 (Catalog Burr Brown)

Funcția implementată are expresia :

$$u_0 = A \left[\frac{(x_1 - x_2)(y_1 - y_2)}{10} - (z_1 - z_2) \right]$$

unde $x, y, z \in [-10, 10]$ V iar constanta 10 este o marime exprimată în Volt

Aplicații :

Montaj multiplicator (figura 9.9)

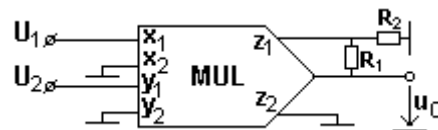


Figura 9.9

$$u_0 = A \left[\frac{x_1 y_1}{10} - \frac{R_2}{R_1 + R_2} u_0 \right] \quad \text{Când } A \text{ tinde către infinit } u_0 = \left[\frac{x_1 y_1}{10} \left(1 + \frac{R_1}{R_2} \right) \right]$$

Montaj divizor (figura 9.10)

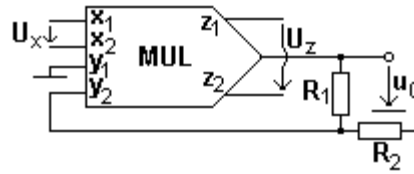


Figura 9.10

$$u_0 = A \left[\frac{u_x \left(-u_0 \frac{R_2}{R_1 + R_2} \right)}{10} - u_z \right] \quad \text{Cand } A \text{ tinde catre infinit} \Rightarrow u_0 = \frac{u_z}{u_x} 10 \left(1 + \frac{R_1}{R_2} \right)$$

Montaj pentru ridicare la patrat (figura 9.11)

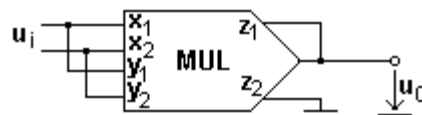


Figura 9.11

$$u_0 = u_i^2 \frac{1}{10}$$

Montaj pentru realizarea functiei radical (figura 9.12)

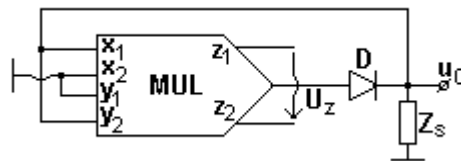


Figura 9.12

$$10K \leq Z_s \leq 1M\Omega$$

$$-0,2V \geq U_z \geq -10V$$

$$u_0 = A \left[\frac{u_0 (-u_0)}{10} - U_z \right] \Rightarrow u_0 = \sqrt{(-10)U_z}$$

Pentru $0,2V \geq U_z \geq 10V$, dioda D se inverseaza in schema iar expresia tensiunii de iesire este: $u_0 = \sqrt{10U_z}$

Convertor tensiune – current (figura 9.13)

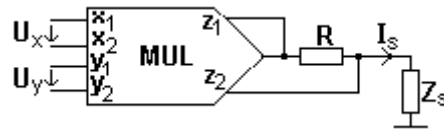


Figura 9.13

$$\begin{cases} u_0 = A \left[\frac{u_x u_y}{10} - I_s R \right] \\ u_0 = I_s (R + Z_s) \end{cases} \quad A \rightarrow \infty \Rightarrow I_s = \frac{u_x u_y}{10R}$$

Detector de faza (figura 9.14)



Figura 9.14

$$u_0 = \frac{u_x u_y}{10} = \frac{AB}{10} (\sin \omega t \sin(\omega t + \Phi)) = \frac{AB}{10} \frac{1}{2} [\cos(\omega t - \omega t - \Phi) - \cos(\omega t + \omega t + \Phi)]$$

acest ultim termen

este

rejectat de FTJ

in consecinta : $u_0 = \frac{AB}{20} \cos \Phi$

Detector de faza care realizeaza multiplicarea prin modulare cu impulsuri dreptunghiulare

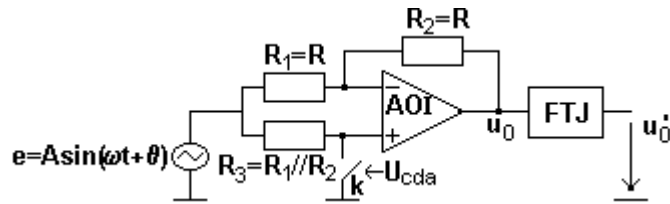


Figura 9.15

Comutatorul K este comandat cu impulsuri dreptunghulare avand frecventa $\omega/2\pi$

K – inchis ($U_{Cda} = -E$) si $u_0 = -\frac{R_2}{R_1} e = -e$

K – deschis ($U_{Cda} = +E$) si $u_0 = -\frac{R_2}{R_1} e + \left(1 + \frac{R_2}{R_1}\right) e = +e$

$\Rightarrow u_0 = \frac{U_{Cda} e}{E}$ (realizeaza produsul!)

Descompunem in serie Fourier semnalul U_{Cda}

$$\frac{U_{Cda}}{E} = \frac{4}{\pi} \left[\sin \omega t + \frac{1}{3} \sin 3\omega t + \frac{1}{5} \sin 5\omega t + \dots \right]$$

In aceste conditii

$$u_0 = \frac{U_{Cda} A \sin(\omega t + \Phi)}{E} = \frac{4}{\pi} A \left[\sin \omega t \sin(\omega t + \Phi) + \frac{1}{3} \sin(\omega t + \Phi) \sin 3\omega t + \frac{1}{5} \sin(\omega t + \Phi) \sin 5\omega t + \dots \right]$$

$$= \frac{1}{2} \frac{4A}{\pi} \left\{ [\cos \Phi - \cos(2\omega t + \Phi)] + \frac{1}{3} [\cos(-2\omega t + \Phi) - \cos(4\omega t + \Phi)] + \dots \right\}$$

Filtrul trece jos rejecteaza semnalele de frecventa mare:

$$u_0 = \frac{2A}{\pi} \cos \Phi$$

Dublul de frecventa Cu multiplicatoare de semnal daca semnalele de intrare sunt in faza (i.e. $u_x = u_y = A \sin \omega t$) si daca se utilizeaza un FTB corespunzator frecventei

$\frac{\omega}{\pi}$ se obtine o schema de dublare a frecventei.

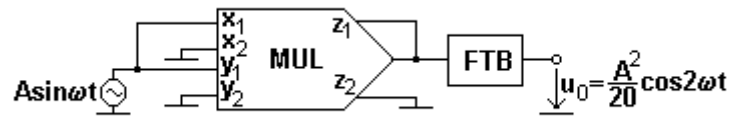


Figura 9.16

$$u_0 = \frac{A^2}{20} \cos 2\omega t$$

Filtre

FTJ

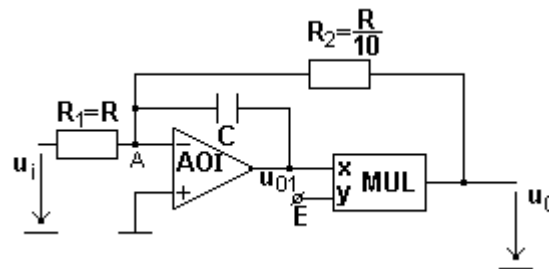


Figura 9.17

$$u_0 = \frac{u_x u_y}{10} = \frac{u_{01} E}{10}$$

Kirchoff I in punctul A rezulta :

$$\frac{u_i}{R_1} + \frac{u_{01}}{1/sC} + \frac{u_0}{R_2} = 0 \quad \Rightarrow \quad H(s) = \frac{u_0(s)}{u_i(s)} = -\frac{1}{10 + \frac{10RC}{E}s} = -\frac{10}{1 + \tau j\omega}$$

FTJ de ordinul I

$$f_0 = \frac{E}{2\pi RC1V} \quad \tau = \frac{RC}{E} 1V$$

FTS

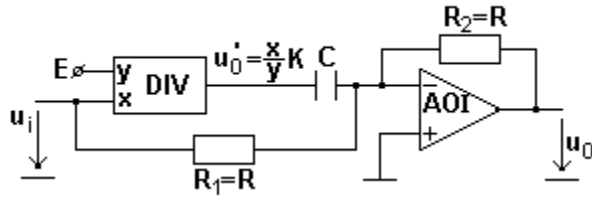


Figura 9.18

$$u_0 = \frac{X}{Y} K = \frac{u_i}{E} K \quad \frac{u_0'}{1/sC} + \frac{u_i}{R_1} + \frac{u_0}{R_2} = 0$$

$$H(s) = \frac{u_0(s)}{u_i(s)} = \frac{\frac{1}{R_1} + sC \frac{K}{E}}{-\frac{1}{R_2}} = -\left(1 + sC \frac{K}{E} R\right)$$

Deci: $H(j\omega) = -(1 + \tau j\omega)$ unde $\tau = \frac{K}{E} RC$

FTB

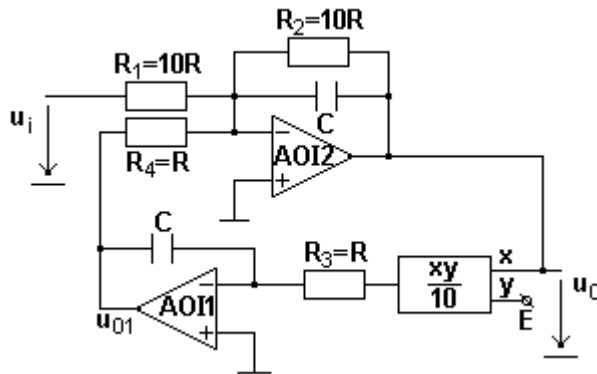


Figura 9.19

$$\frac{u_0(s)}{R_2 + 1/sC} + \frac{u_i(s)}{R_1} + \frac{u_{01}(s)}{R_4} = 0 \Rightarrow u_0(s) \frac{1 + R_2 sC}{R_2} + \frac{u_i(s)}{R_1} - \frac{u_0(s)E}{10RCsR_4} = 0$$

$$\Rightarrow u_0(s) \frac{1 + 10RCs}{10R} + \frac{u_i(s)}{10R} - \frac{u_0(s)E}{10R^2Cs} = 0$$

$$H_1(s) = \frac{u_0(s)}{u_i(s)} = -\frac{\frac{1}{10}}{\frac{1+10RCs}{10} - \frac{E}{10RCs}} = -\frac{RCs}{10(RCs)^2 + RCs - E}$$

Calculam iesirea u_{01}

$$H_2(s) = \frac{u_{01}}{u_i(s)} = H_1(s) \frac{u_{01}}{u_0(s)} = -\frac{RCs}{10(RCs)^2 + RCs - E} \frac{E}{10} \left(-\frac{1}{RCs} \right) = \frac{\frac{E}{10}}{10(RCs)^2 + RCs - E}$$

FTJ de ordinul II

Oscilatoare comandate

O alta implementare a oscilatorului cu iesire in impulsuri dreptunghiulare (AO cu histerzis –figura 9.20- vezi demonstratie in cursul 10) este prezentata in figura 9.21

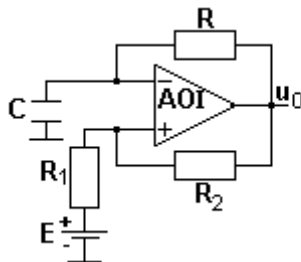


Figura 9.20

Tensiunea pe condensator are o variatie liniara. Schema se realizeaza cu doua AO prin implementarea separata a integratorului si a AO cu histerzis.

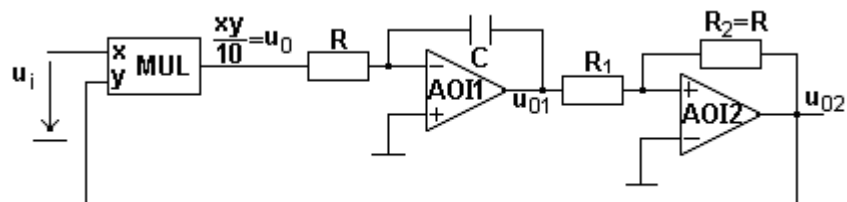
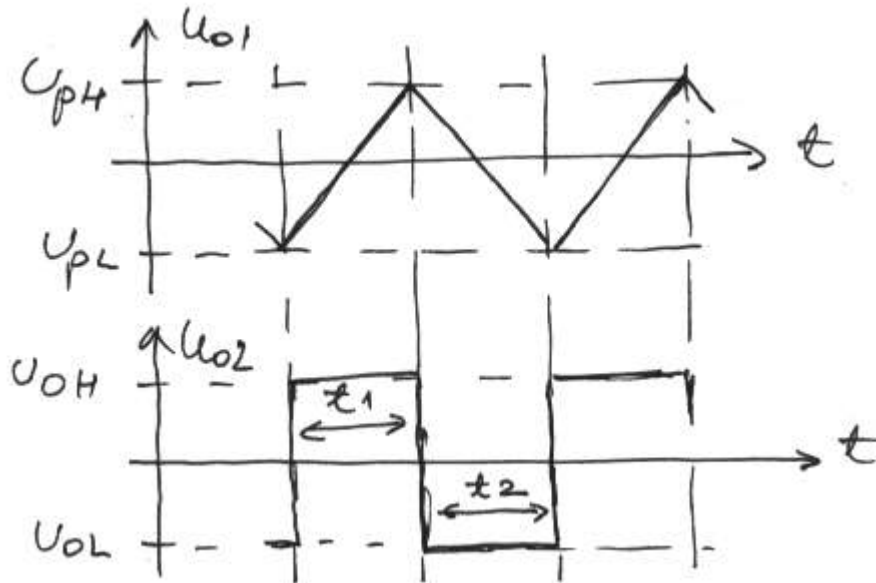


Figura 9.21



Calculul timpilor t_1 si t_2 se realizeaza tinand cont de urmatoarele observatii :

- pentru AO1 legea de variatie a lui u_{o1} este liniara : $\frac{u_0}{R} = C \frac{du_{o1}}{dt}$

$$\Rightarrow u_{o1}(t) = \frac{u_0}{RC}t + u_{o1}(0)$$

(pt u_0 constant)

- pentru AO2 avem relatiile :

$$U_{pH} = u_{o\max} \frac{R_1}{R_2}$$

$$U_{pL} = -u_{o\max} \frac{R_1}{R_2}$$

- la multiplicator penru calculul timpilor t_1 si t_2 avem relatiile :

$$t_1 \rightarrow u_0 = \frac{u_i u_{o\max}}{10}$$

$$t_2 \rightarrow u_0 = -\frac{u_i u_{o\max}}{10}$$

In aceste conditii t_1 si t_2 se deduc din ecuatiile :

$$\begin{cases} U_{pH} = \frac{u_0}{RC} t_1 + U_{pL} \\ U_{pL} = \frac{u_0}{RC} t_2 + U_{pH} \end{cases} \Rightarrow \begin{cases} u_{0\max} \frac{R_1}{R_2} = \frac{u_i u_{0\max}}{10RC} t_1 + u_{0\max} \frac{R_1}{R_2} \\ -u_{0\max} \frac{R_1}{R_2} = -\frac{u_i u_{0\max}}{10RC} t_2 + u_{0\max} \frac{R_1}{R_2} \end{cases}$$

$$\Rightarrow t_1 = t_2 = \frac{20R_1}{R_2} (RC) u_i$$

Observatie : $U_{0\max}$ nu mai are nici o influenta asupra frecventei oscilatorului

Liniarizarea caracteristicii unei punti de masura

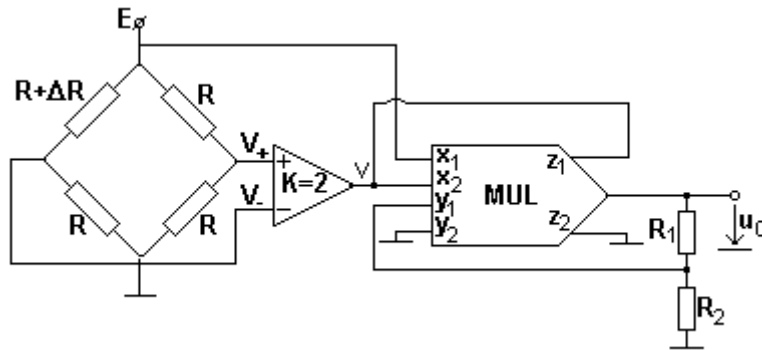


Figura 9.22

Pentru amplificator avem relatiile :

$$V_+ = E \frac{R}{R+R} = \frac{E}{2}$$

$$V_- = E \frac{R}{R+R+\Delta R} = \frac{ER}{2R+\Delta R}$$

$$\Rightarrow V = K(V_+ + V_-) = EK \left(-\frac{R}{2R+\Delta R} + \frac{1}{2} \right) = \frac{EK}{2} \frac{+\Delta R}{2R+\Delta R}$$

Pentru multiplicator avem relatiile :

$$u_0 = A \left[\frac{(E - V) \left(\frac{R_2}{R_1 + R_2} u_0 \right)}{10} - V \right]$$

$$\xrightarrow{A \rightarrow \infty} u_0 = \frac{R_1 + R_2}{R_2} \frac{10V}{E - V} = \frac{(R_1 + R_2) 10 \frac{+ \Delta R}{2R + \Delta R} E}{R_2 \left[E - \frac{E \Delta R}{2R + \Delta R} \right]} = \frac{(R_1 + R_2) 10 \Delta R E}{R_2 2RE} = \frac{R_1 + R_2}{R_2} 5 \frac{\Delta R}{R}$$

Observatie : Tensiunea de iesire este direct proportionala cu variatia rezistentei si nu depinde de E. Relatia este corecta dimensional valoarea marimii 5 avand unitate de masura exprimata in Volt (Vezi definitia multiplicatorului BB).