

CURS9

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

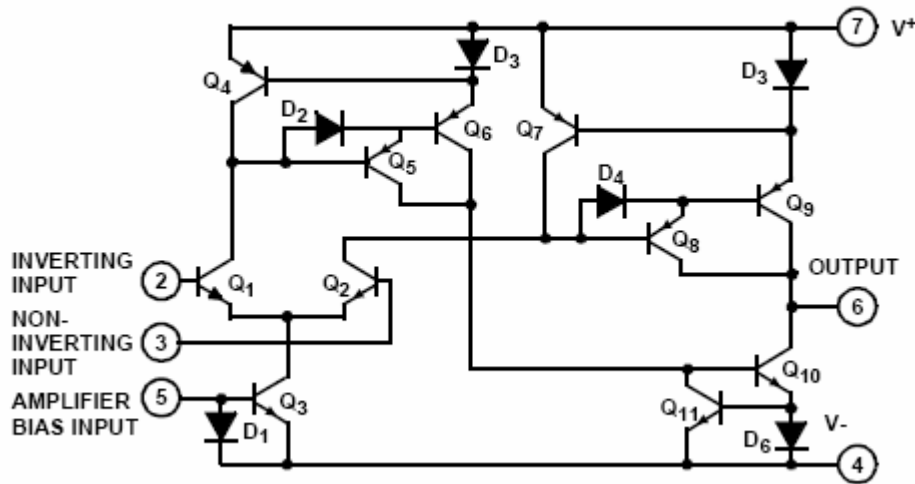


Figura 9.1 (Catalog RCA)

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

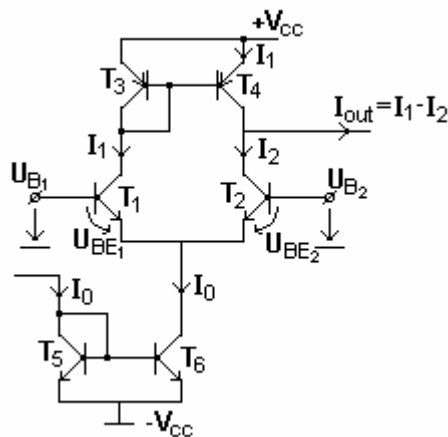


Figura 9.2

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 curenții de colector prin tranzistoarele T_1 si T_2 se pot scrie relatiile :

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

$$\text{Pe de alta parte : } I_0 = I_1 + I_2 \quad (9.2)$$

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

$$I_2 = I_0 \frac{1}{1 + e^{U/U_T}} \quad (9.4)$$

$$I_1 = I_0 \frac{1}{1 + 1/e^{U/U_T}}$$

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.

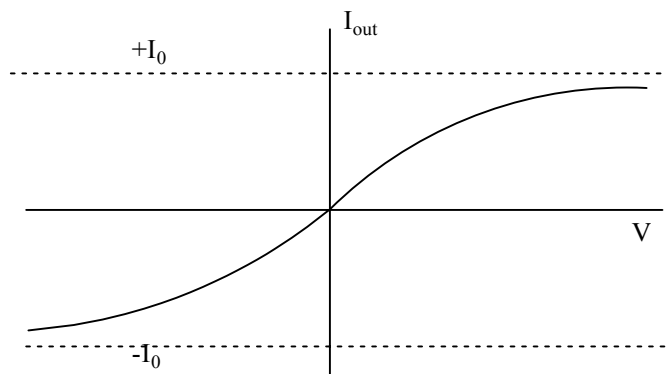


Figura 9.3

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

Example :

Rezistenta controlata prin curent

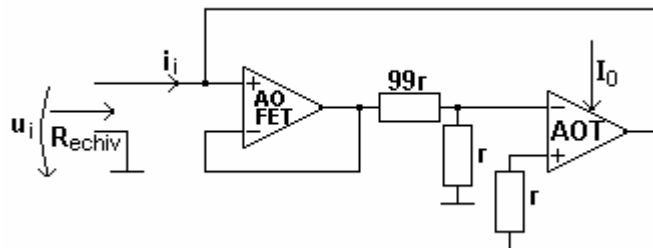


Figura 9.4

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

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

$$R_{echiv} = \frac{u_i}{i_i} = \frac{u_i}{-(-Gu_i K)} = \frac{1}{GK} = \frac{2U_T}{I_0 K}$$

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 $R_{echiv} \in (5k\Omega \dots 5M\Omega)$.

Multiplicator/divizor

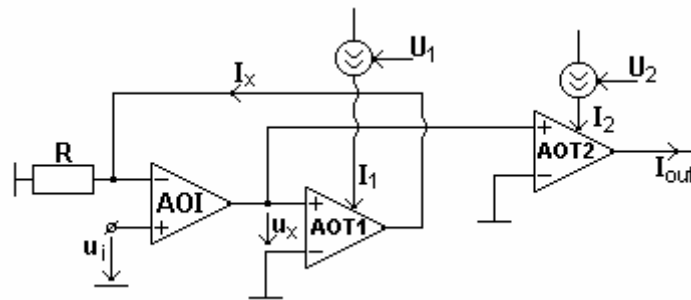


Figura 9.5

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, obtinand-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 definește ca variația procentuală maximă față de cea mai bună aproximare liniară a caracteristicii :

$$u_0 = f(U_Y) \text{ cand } u_X = U_{X \text{ max}}$$

(in mod similar se definește și pt u_x)

► Eroarea factorului de scala – se definește ca abaterea procentuală 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 menționa :

● **Multiplicatoare cu lege patratică** - realizează produsul prin calculul expresiei :

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

Suma și diferența se pot obține cu AO iar legea patratică se aproximează pe porțiuni cu o rețea de diode și rezistențe, prin care se modifică aplicarea unui AO. (figura 9.6). Diodele funcționează pe post de comutatoare. Aceasta tehnică oferă o bandă largă de semnal, cca. 1MHz, și în funcție de numărul de segmente de aproximare a funcției, o precizie de până la 0,25%

Exemplu de schema de aproximare a legii patratică :

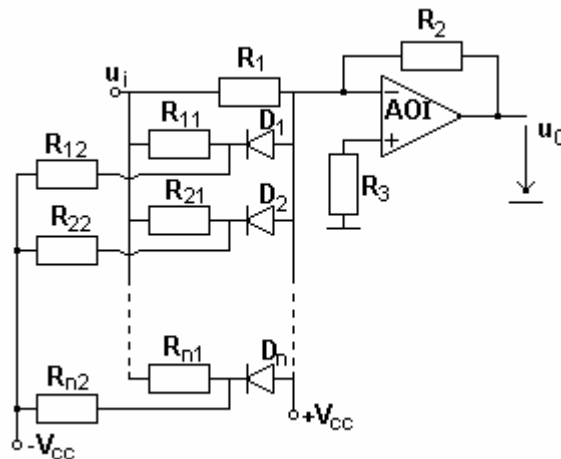


Figura 9.6

Diodele sunt astfel polarizate încât pentru $u_i=0$ toate diodele sunt în conducție

● **Multiplicarea prin modularea în tensiune și durată a unui tren de impulsuri dreptunghiulare** – se bazează pe calculul ariei impulsurilor obținute. Metoda oferă o precizie mare, cca. 0,1%, dar banda de trecere este limitată (<zeci de KHz)

● **Multiplicarea prin modularea în amplitudine și durată a unui tren de impulsuri triunghiulare** – această metodă este similară metodei anterioare dar asigură o precizie mai scăzută, cca. 0,5%

● **Multiplicare cu sumare logaritmică** – realizează produsul a două mărimi după legea : $XY = \text{antilog}(\log X + \log Y)$ Pentru realizarea acestei funcții se utilizează amplificatoare neliniare logaritmice și antilogaritmice (exponențiale).

● **Multiplicatoare cu transconductanță variabilă** - Aceste multiplicatoare se pot realiza în tehnica hibridă (utilizând AOT) sau în tehnica monolitică.

Multiplicatoare analogice integrate

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

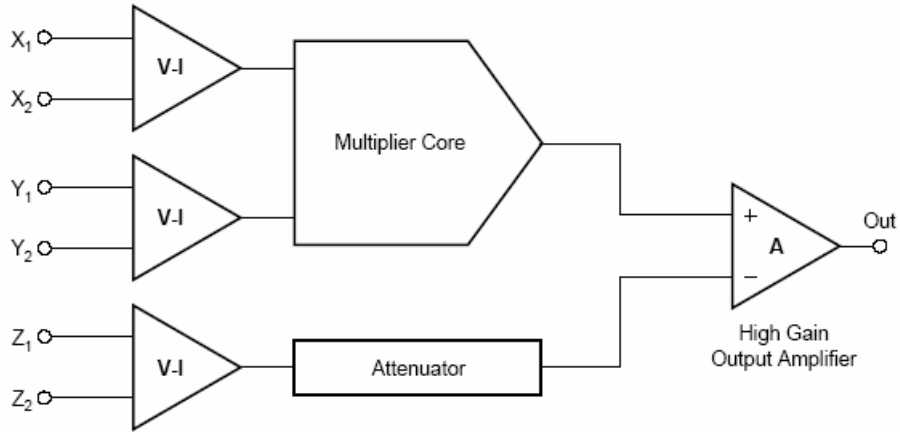


Figura 9.7 (Catalog Burr Brown)

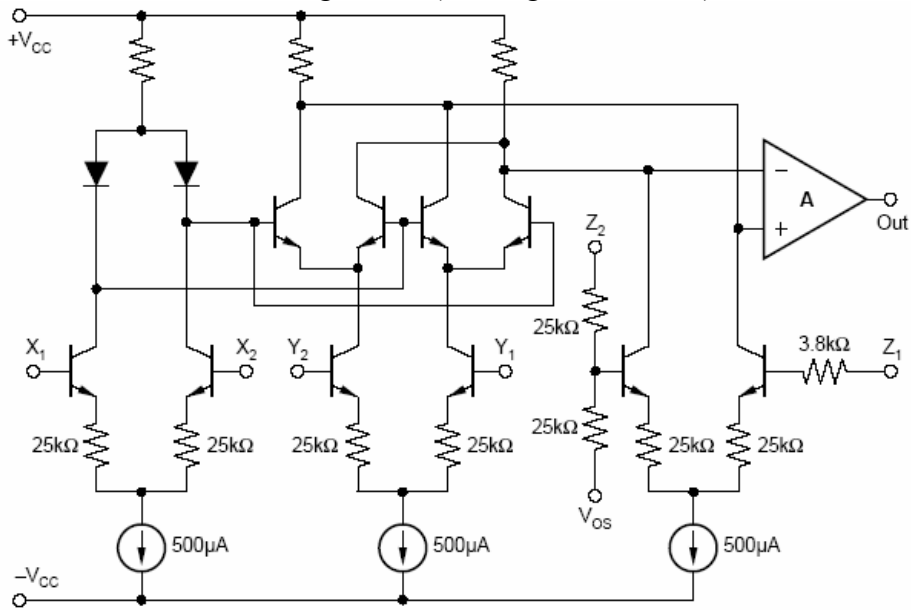


Figura 9.8 (Catalog Burr Brown)

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)

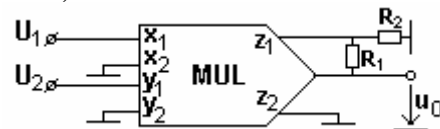


Figura 9.9

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

Montaj divizor (figura 9.10)

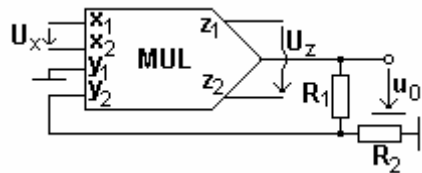


Figura 9.10

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

Montaj pentru ridicare la patrat (figura 9.11)

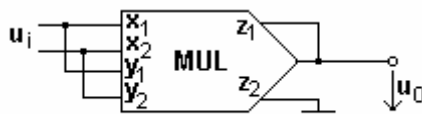


Figura 9.11

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

Montaj pentru realizarea functiei radical (figura 9.12)

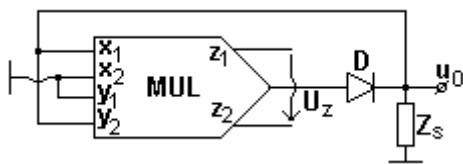


Figura 9.12

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

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

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

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)

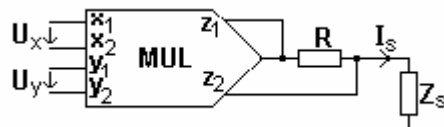


Figura 9.13

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

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

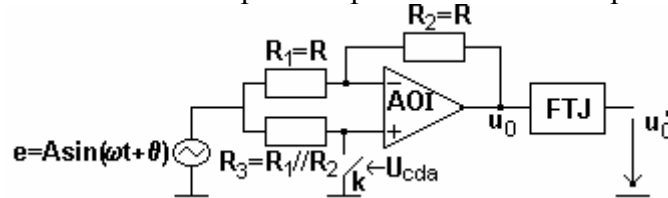


Figura 9.15

Comutatorul K este comandat cu impulsuri dreptunghiulare 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.

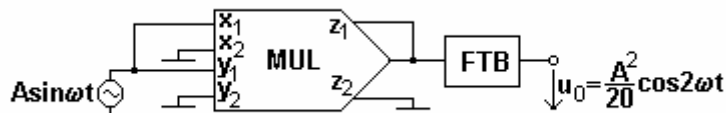


Figura 9.16

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

Filtre
FTJ

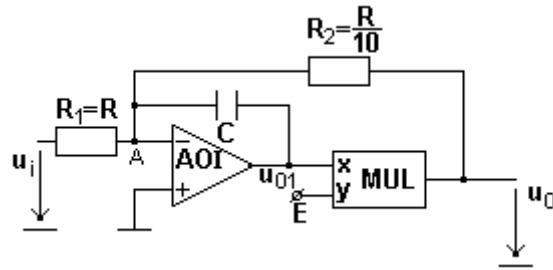


Figura 9.17

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

Kirchoff I in punctul A rezulta :

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

FTJ de ordinul I

$$f_0 = \frac{E}{2\pi RC10} \quad \tau = \frac{RC}{E} 10$$

FTS

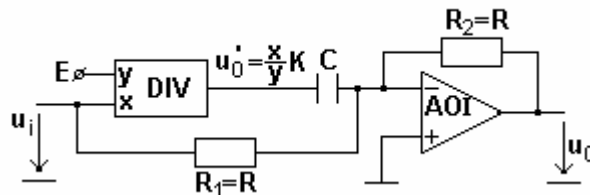


Figura 9.18

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

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

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

FTB

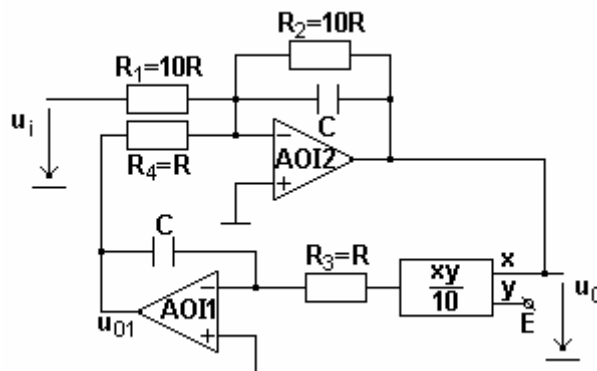


Figura 9.19

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

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

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

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 histerezis – figura 9.20- vezi demonstratie in cursul 10) este prezentata in figura 9.21

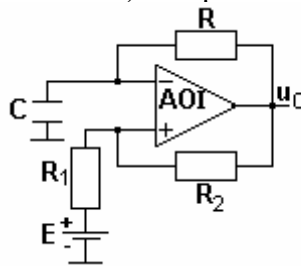


Figura 9.20

Tensiunea pe condensator are o variatie liniara si se poate realiza cu doua AO prin implementarea separata a integratorului si a AO cu histerezis

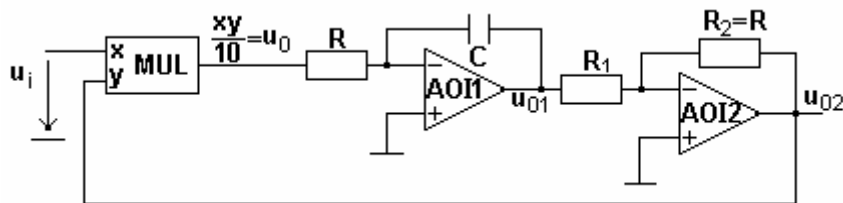
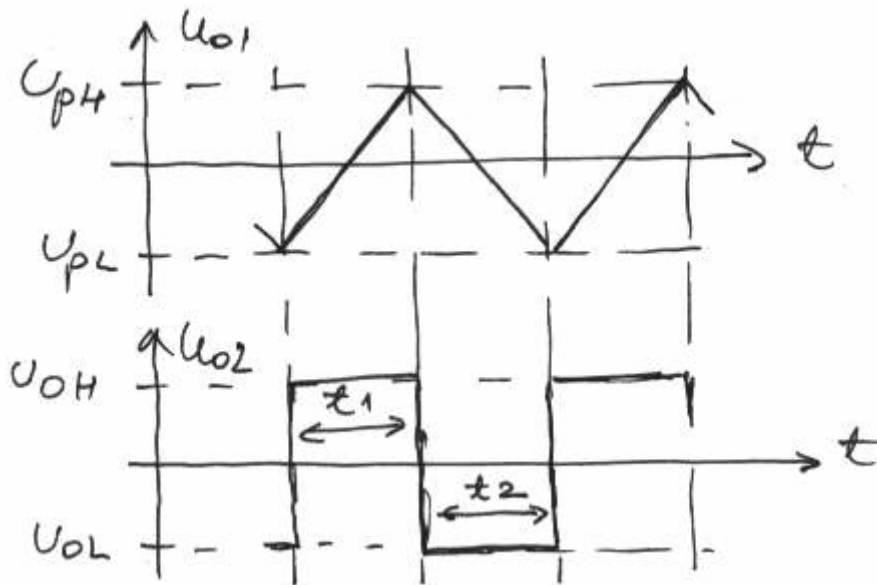


Figura 9.21



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 :

$$t_1 \rightarrow u_0 = \frac{u_i u_{0\max}}{10}$$

$$t_2 \rightarrow u_0 = -\frac{u_i u_{0\max}}{10}$$

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

Liniarizarea caracteristicii unei punti de masura

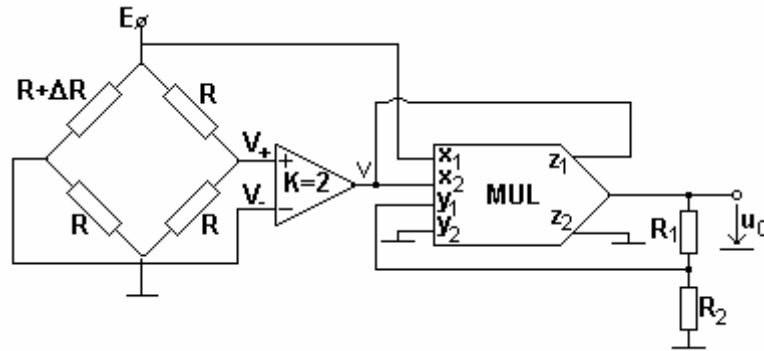


Figura 9.22

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 :

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

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

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).