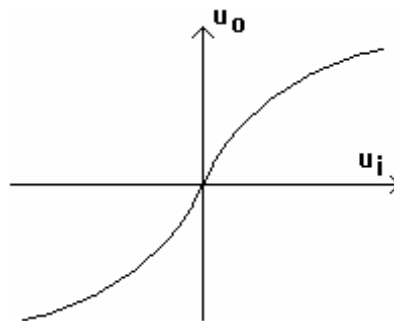
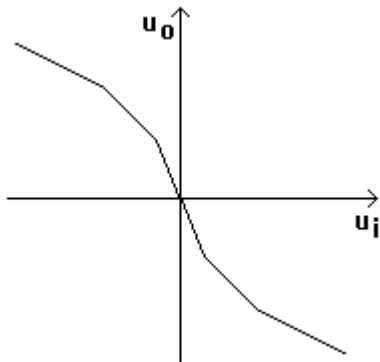
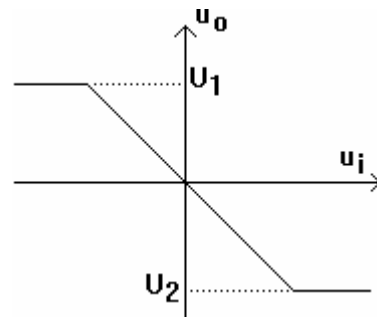
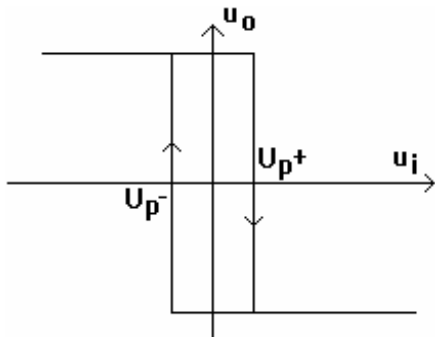


Capitolul 2 Circuite analogice neliniare

- Circuite cu histerezis
- Circuite de limitare
- Circuite de aproximare prin segmente a caracteristicilor neliniare
- Circuite neliniare cu caracteristică netedă
- Implementarea numerică a funcțiilor neliniare

Utile pentru:

- liniarizarea caracteristicilor traductoarelor
- refacerea semnalelor digitale, afectate de perturbații (perturbații electrice în timpul transmisiunii sau perturbații mecanice la generarea prin mișcare)
- limitarea valorii comenzii la elementele de execuție
- generarea unor semnale arbitrare, prin aproximarea formelor de undă
- operații aritmetice neliniare (înmulțire, împărțire, radical, modul, maxim, minim etc.), pentru măsurarea indirectă a unor mărimi variabile (din model) sau pentru compensarea unor perturbații
- reglatoare și circuite de protecție cu funcții neliniare



Circuite cu histerezis

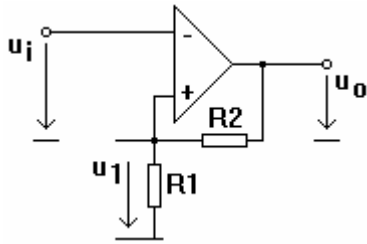


Figura 2.1: Comparator cu histerezis

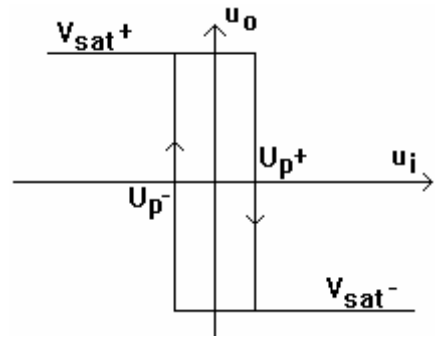


Figura 2.2: Caracteristica circuitului 2.1

$$u_i = U_{p^-} = V_{sat^-} \cdot \frac{R_1}{R_1 + R_2}$$

$$U_{p^+} = V_{sat^+} \cdot \frac{R_1}{R_1 + R_2}$$

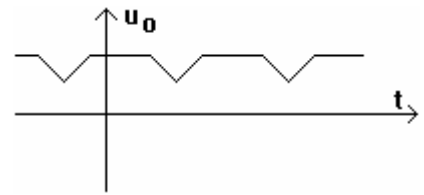
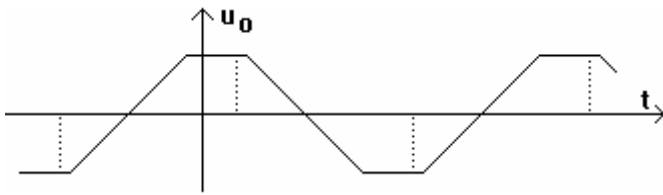


Figura 2.3: Comportarea ieșirii pentru valoare slew-rate mică

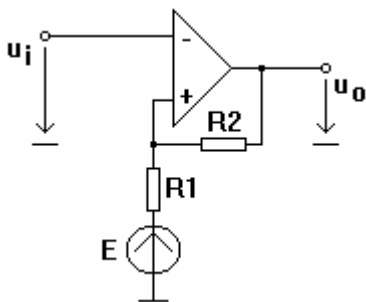


Figura 2.4: Deplasarea histerezisului

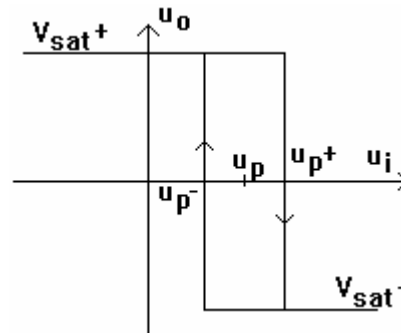


Figura 2.5: Caracteristica deplasată

$$U_{p^+} = E \cdot \frac{R_2}{R_1 + R_2} + V_{sat^+} \cdot \frac{R_1}{R_1 + R_2}$$

$$U_{p^-} = E \cdot \frac{R_2}{R_1 + R_2} + V_{sat^-} \cdot \frac{R_1}{R_1 + R_2}$$

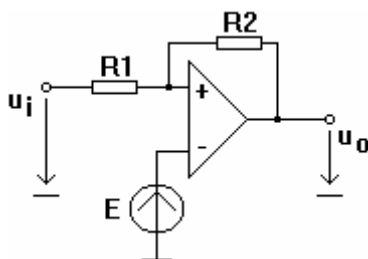


Figura 2.6: Circuit neinversor

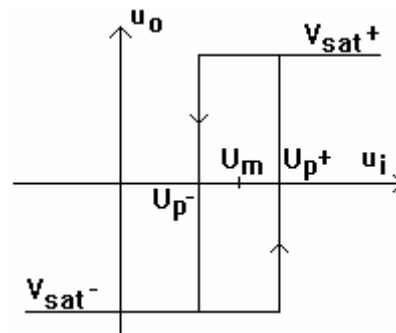


Figura 2.7: Caracteristica deplasată

$$U_{p^+} = E \cdot \frac{R_1 + R_2}{R_2} - V_{sat^-} \cdot \frac{R_1}{R_2}$$

$$U_{p^-} = E \cdot \frac{R_1 + R_2}{R_2} - V_{sat^+} \cdot \frac{R_1}{R_2}$$

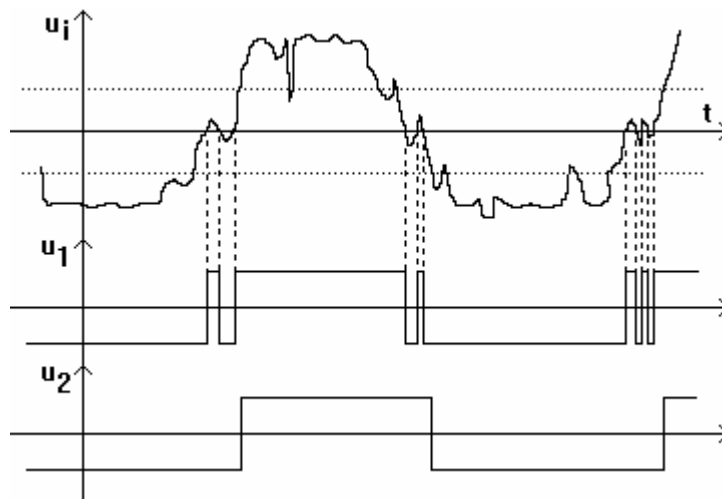


Figura 2.8: "Curățarea" impulsurilor parazite cu circuit cu histerezis

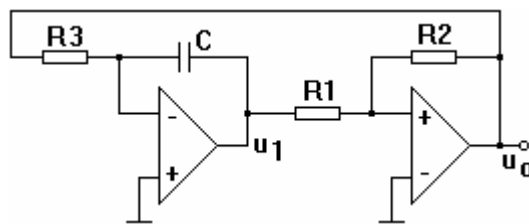


Figura 2.9: Oscilator de relaxare cu circuit cu histerezis

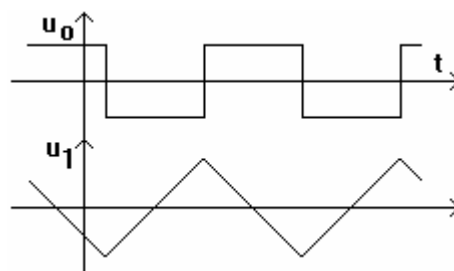


Figura 2.10: Diagramele de semnal

$$p_1 = p^+ = -V_{sat^-} \cdot \frac{R_1}{R_2} \qquad p_2 = p^- = -V_{sat^+} \cdot \frac{R_1}{R_2}$$

$$\frac{du_1}{dt} = -V_{sat^-} \cdot \frac{1}{R_3 C}, \quad t_1 = R_3 C \cdot \frac{p_1 - p_2}{-V_{sat^-}}$$

$$\frac{du_1}{dt} = -V_{sat^+} \cdot \frac{1}{R_3 C}, \quad t_2 = R_3 C \cdot \frac{p_1 - p_2}{V_{sat^+}}$$

$$T = R_3 C \cdot \frac{R_1}{R_2} \cdot \frac{(V_{sat^+} - V_{sat^-})^2}{V_{sat^+} \cdot (-V_{sat^-})}$$

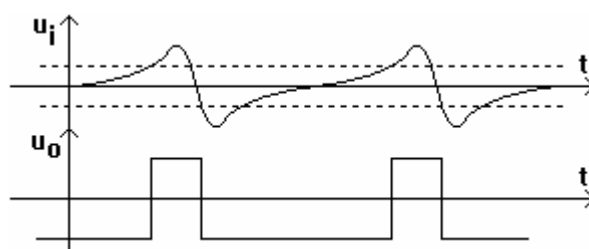


Figura 2.11: Diagrama de semnal provenit de la senzor Hall

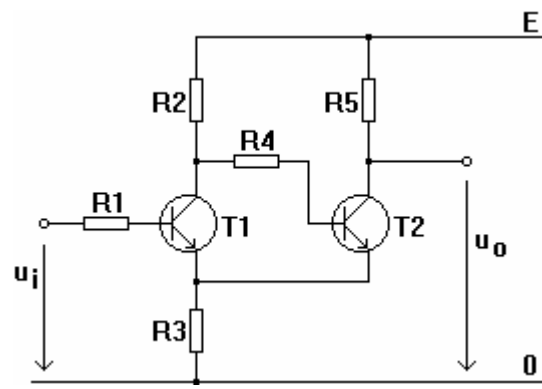


Figura 2.12: Circuit Trigger Schmitt, $R_2 > R_5$

Circuite de limitare

- **Niciodată** limitarea semnalului de la traductor
- Limitarea mărimii de comandă a elementelor de execuție: curent în convertor, unghi de amorsare tiristoare, unghi sau cursă elemente mecanice, forță etc.

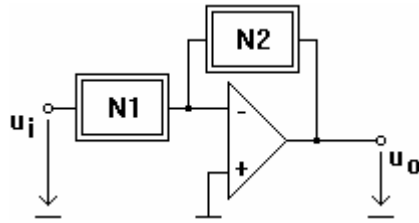


Figura 2.13: Structura simplă a unui circuit neliniar

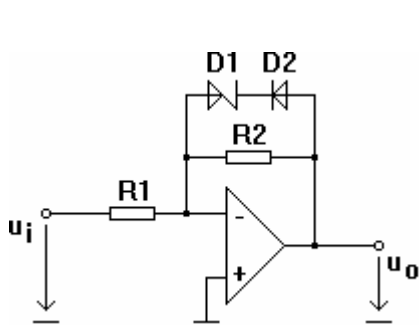


Figura 2.14: Circuit de limitare

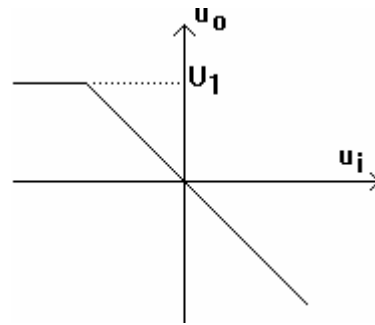


Figura 2.15: Caracteristica circuitului 2.14

$$\frac{du_o}{du_i} = -\frac{(r_d + r_z) \parallel R_2}{R_1}$$

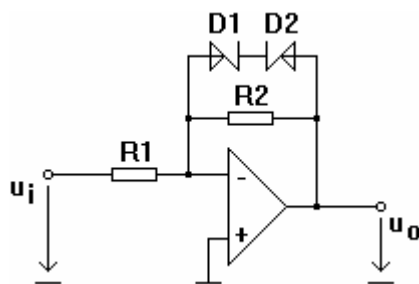


Figura 2.16: Circuitul de limitare bilaterală

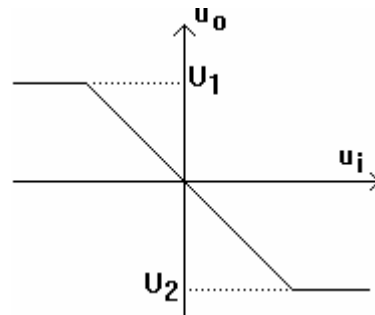


Figura 2.17: Caracteristica cu limitare bilaterală

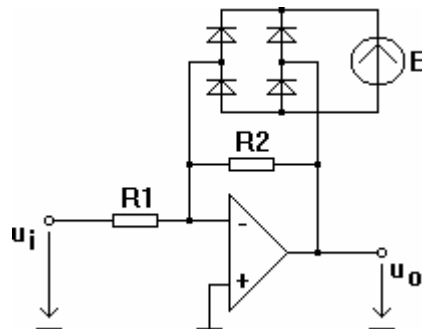


Figura 2.18: Limitare bilaterală simetrică, cu sursă suplimentară

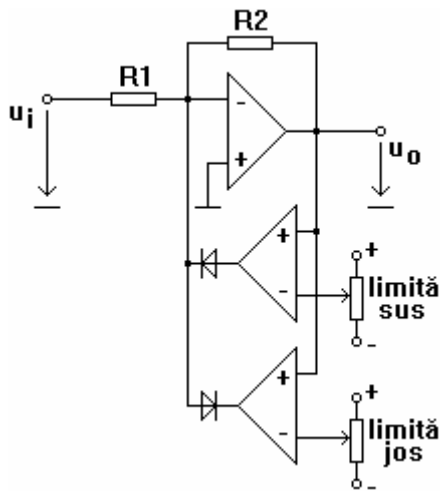


Figura 2.19: Circuit de limitare bilaterală reglabilă

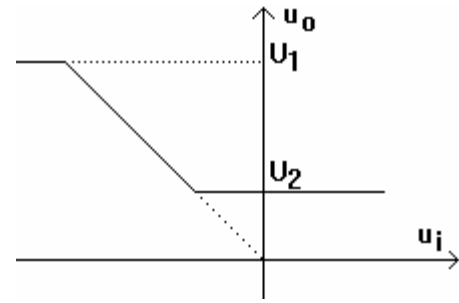


Figura 2.20: Caracteristica circuitului 2.19

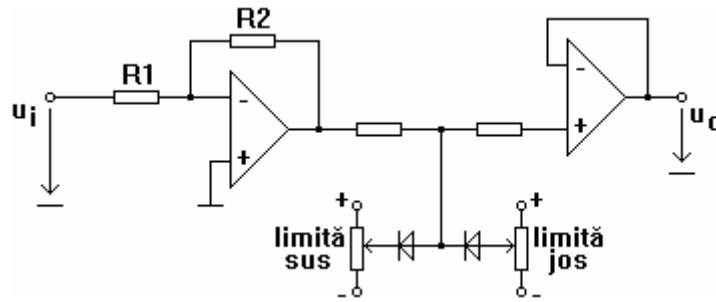


Figura 2.21: Circuit de limitare bilaterală reglabilă

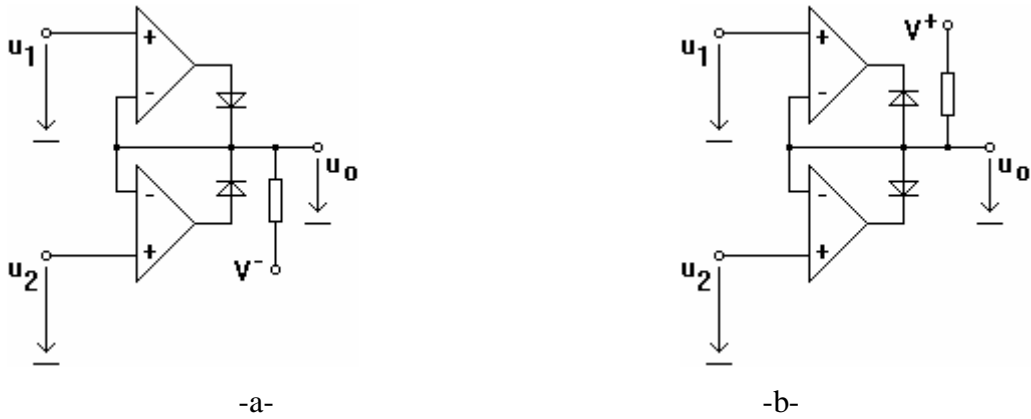


Figura 2.22: Circuite de calcul al maximului (a) și minimului (b)

$$u_o = \max(u_1, u_2), \text{ respectiv } u_o = \min(u_1, u_2)$$

Circuite de aproximare prin segmente

Compensarea unor neliniarități ale traductoarelor, generarea de semnale de formă prestabilită

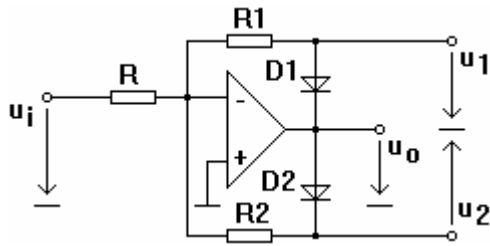


Figura 2.23: Redresor de precizie monoalternanță

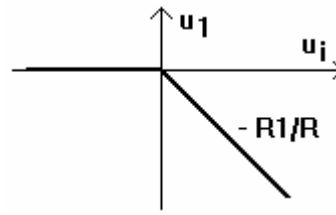


Figura 2.24: Ieșirea u_1

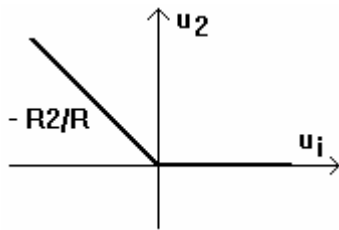


Figura 2.25: Ieșirea u_2

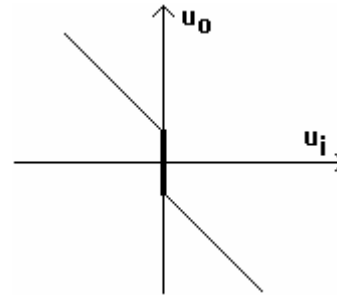


Figura 2.26: Ieșirea AO

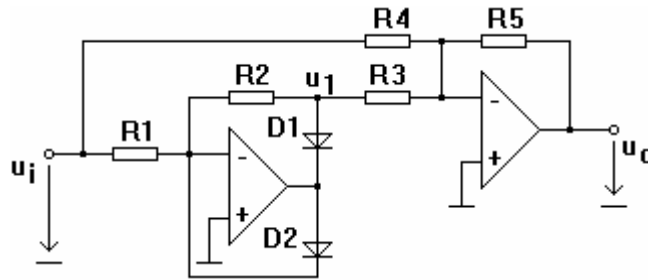


Figura 2.27: Redresor de precizie bialternanță

$$u_1 = 0 \quad \text{dacă } u_i < 0 \quad \text{și}$$

$$u_1 = -u_i \quad \text{dacă } u_i > 0$$

$$u_o = -u_i - 2 \cdot u_1 = -u_i \quad \text{dacă } u_i < 0 \quad \text{și}$$

$$u_o = -u_i - 2 \cdot u_1 = u_i \quad \text{dacă } u_i > 0, \quad \text{adică}$$

$$u_o = |u_i|$$

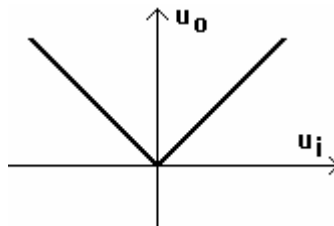


Figura 2.28: Caracteristica redresorului

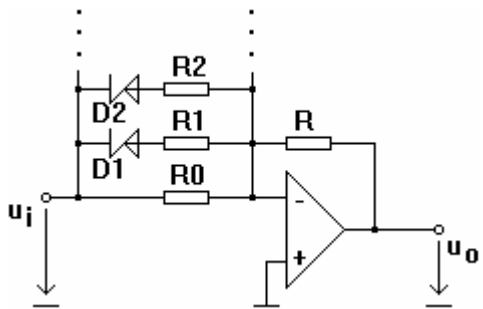


Figura 2.29: Circuit nelinier, cu caracteristica realizată arbitrar din segmente

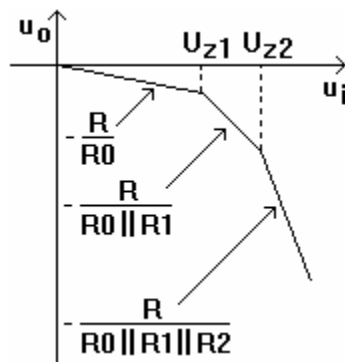


Figura 2.30: Caracteristica circuitului 2.29

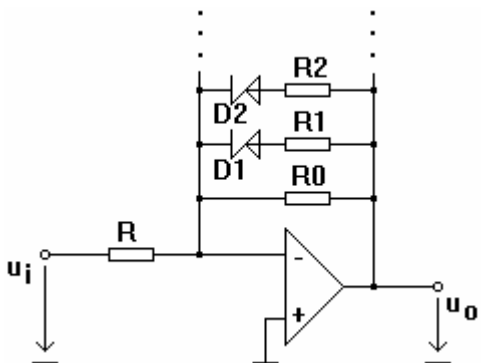


Figura 2.31: Circuit nelinier, cu caracteristica realizată arbitrar din segmente

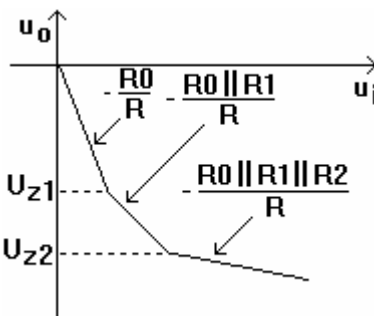


Figura 2.32: Caracteristica circuitului 2.31

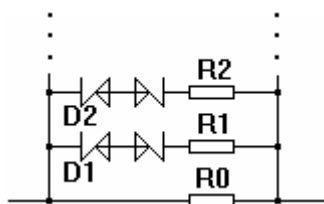


Figura 2.33: Dipol nelinier simetric, funcționând în ambele cadrane

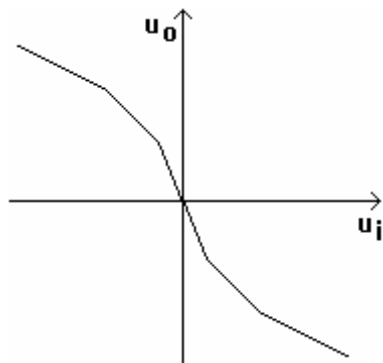


Figura 2.34: Caracteristica neliniară pentru ambele semne ale intrării

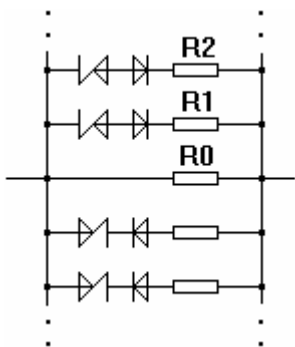


Figura 2.35: Dipol nelinier nesimetric

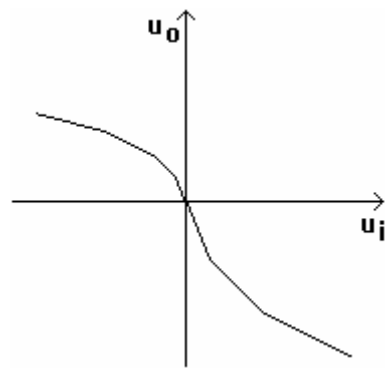


Figura 2.36: Caracteristica nesimetrică

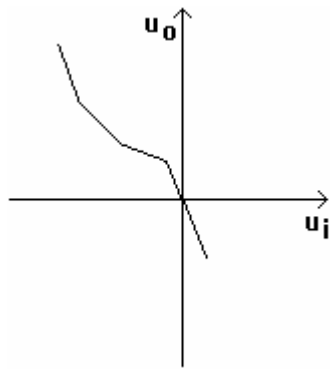


Figura 2.37: Caracteristica cu schimbare a curburii

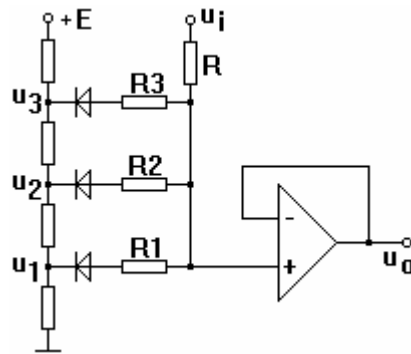


Figura 2.38: Circuit neliniar cu tensiuni de frîngere determinate prin divizor rezistiv

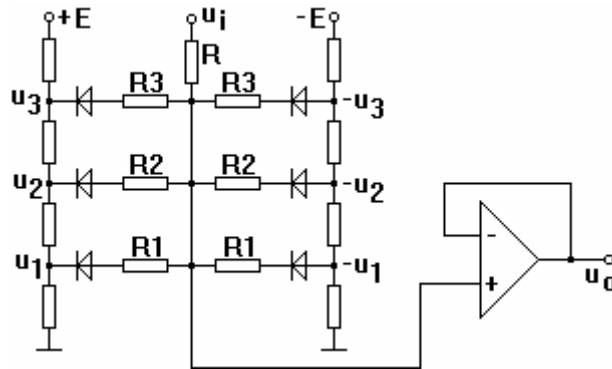


Figura 2.39: Circuit similar, pentru caracteristică bilaterală

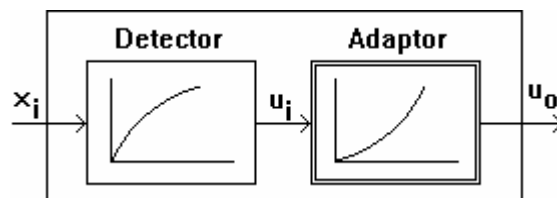


Figura 2.40: Structura traductoarelor cu senzor neliniar

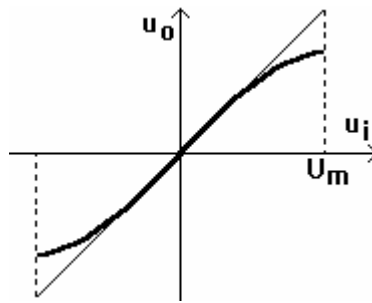


Figura 2.41: Caracteristica neliniară, identică cu o restricție a funcției sinus

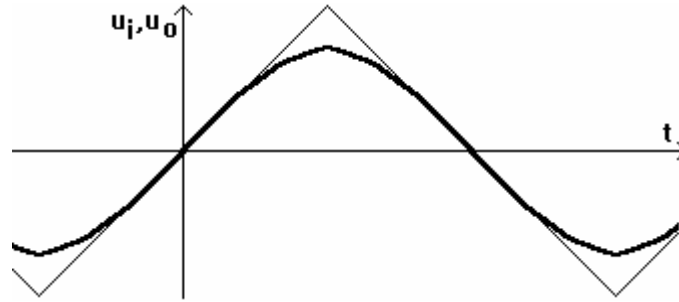


Figura 2.42: Aproximarea semnalului sinusoidal

Circuite cu caracteristică netedă

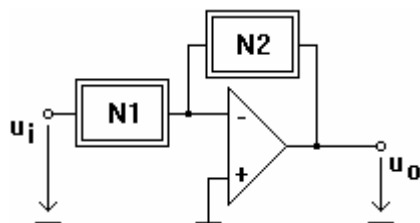


Figura 2.43: Structura circuitului neliniar

$$i_C = I_{CS} \cdot \left[\exp\left(\frac{qu_{BE}}{m k T}\right) - 1 \right]$$

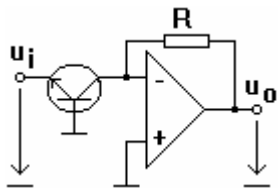


Figura 2.44: Caracteristică exponențială

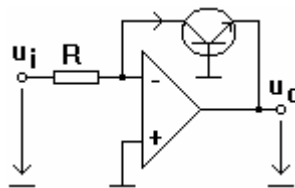


Figura 2.45: Caracteristică logaritmică

$$i_C \cong I_{CS} \cdot \exp\left(\frac{u_{BE}}{m v_t}\right) \quad u_o = R I_{CS} \cdot \exp\left(\frac{-u_i}{m v_t}\right) \quad u_i = R I_{CS} \cdot \exp\left(\frac{-u_o}{m v_t}\right) \quad u_o = -m v_t \cdot \ln\left(\frac{u_i}{R I_{CS}}\right)$$

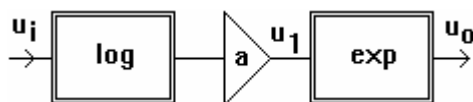


Figura 2.46: Circuit de ridicare la putere arbitrară

$$u_1 = -a k_1 \ln\left(\frac{u_i}{k_2}\right) \quad u_o = k_3 \exp\left(\frac{u_1}{-k_4}\right) \quad u_o = k_3 \cdot \exp\left(\frac{a \cdot k_1 \ln\left(\frac{u_i}{k_2}\right)}{k_4}\right) = k_3 \left(\frac{u_i}{k_2}\right)^{a \frac{k_1}{k_4}} = k_3 \left(\frac{u_i}{k_2}\right)^a$$

Dimensiunile constantelor

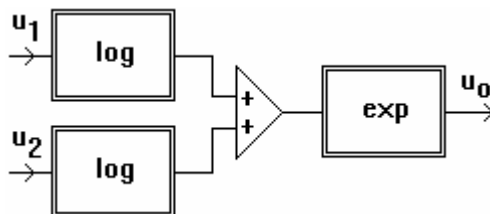


Figura 2.47: Circuit de înmulțire

$$u_o = k_3 \exp\left(\frac{-k_{11} \ln\left(\frac{u_1}{k_{21}}\right) - k_{12} \ln\left(\frac{u_2}{k_{22}}\right)}{-k_4}\right) \quad u_o = k_3 \exp\left(\ln\left(\frac{u_1 u_2}{k_{21} k_{22}}\right)\right) = \frac{k_3}{k_{21} k_{22}} \cdot u_1 u_2 = \frac{u_1 u_2}{C}$$

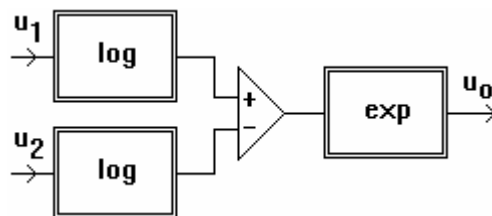


Figura 2.48: Circuit de împărțire

$$u_o = C \frac{u_1}{u_2}$$

Limite de funcționare, $|u_1| < |u_2|$.

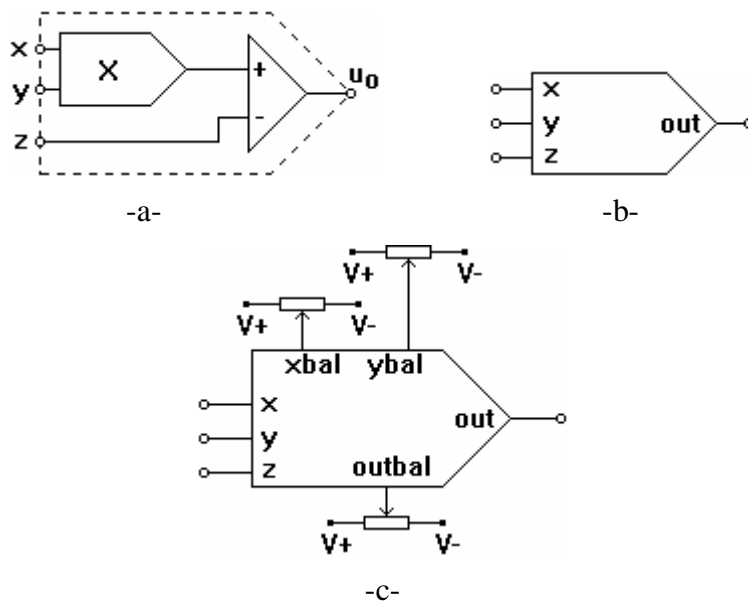


Figura 2.49: Circuit specializat pentru înmulțire

$$u_o = A \left(\frac{x \cdot y}{C} - z \right)$$

$$u_o - u_{od} = A \left(\frac{(x_1 - x_2) \cdot (y_1 - y_2)}{C} - z \right)$$

AD 534, AD 428 (Analog Devices) și 4213, 4205 (Burr Brown), la care constanta $C = 10V$.

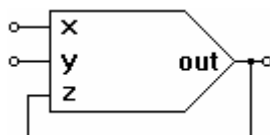


Figura 2.50: Circuit de înmulțire

$$u_o = A \left(\frac{xy}{C} - u_o \right) \qquad u_o = \frac{xy}{C}$$

Tipul reacției

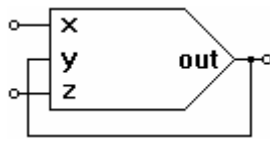
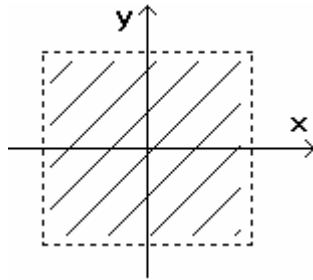
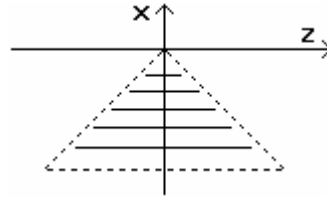


Figura 2.51: Circuit de împărțire

$$u_o = A \left(\frac{x \cdot u_o}{C} - z \right) \qquad u_o = C \frac{z}{x} \qquad |z| < |x|$$



-a-



-b-

Figura 2.52: Limitele tensiunilor de intrare pentru circuitul de înmulțire, respectiv cel de împărțire

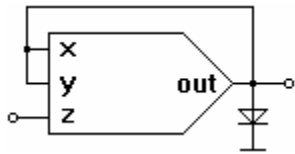


Figura 2.53: Circuit de extragere a radicalului

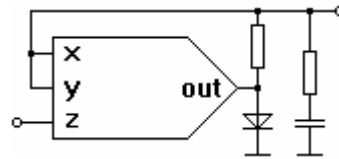


Figura 2.54: Circuit compensat în frecvență

$$u_o = A \left(\frac{u_o u_o}{C} - z \right)$$

$$u_o = -\sqrt{C \cdot z}$$

Exemplu de aplicație: măsurarea indirectă a debitului (proporțional cu pătratul presiunii diferențiale)

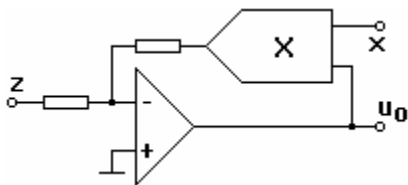


Figura 2.55: Altă soluție pentru împărțire

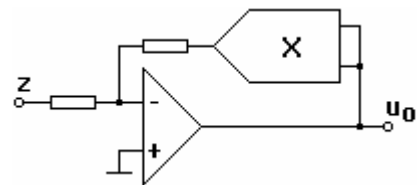


Figura 2.56: Circuit de extragere a radicalului



Figura 2.57: Calculul valorii efective

$$U_{ef} = \sqrt{\frac{1}{T} \int_0^T u_i^2(t) dt}$$

$$u_o = \sqrt{C_1 \left(\frac{u_i^2}{C_2} \right)}$$

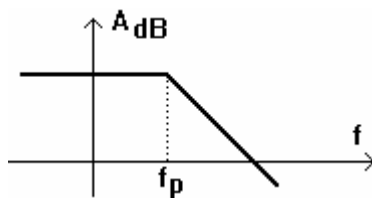


Figura 2.59: Caracteristica de frecvență a filtrului "trece-jos"

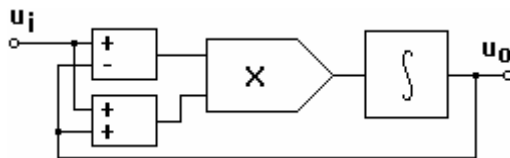


Figura 2.58: Calculul valorii efective, în buclă

$$u_o(t) = \frac{1}{T_i} \int_0^t \frac{1}{C} (u_i^2(t) - u_o^2(t)) dt + u_o(0) \qquad \frac{1}{T} \int_0^T u_i^2(t) dt = u_o^2$$

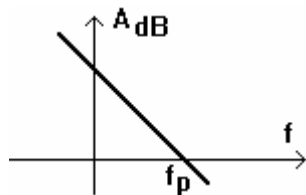
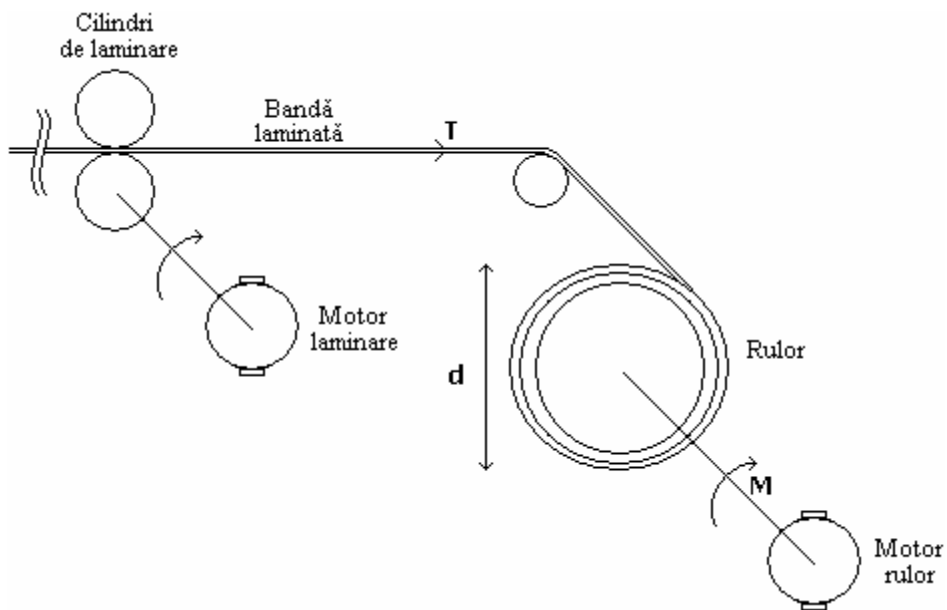


Figura 2.60: Caracteristica de frecvență a integratorului

Exemplu de aplicație: măsurarea indirectă a forței de tracțiune la rulor (proporțională cu raportul dintre cuplu și diametru), pentru reglarea automată a tracțiunii



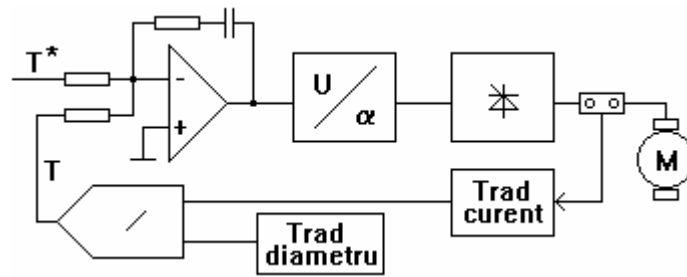
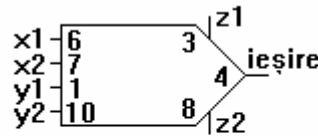


Figura 2.61: Reglarea forței de tracțiune (cu măsurare indirectă)

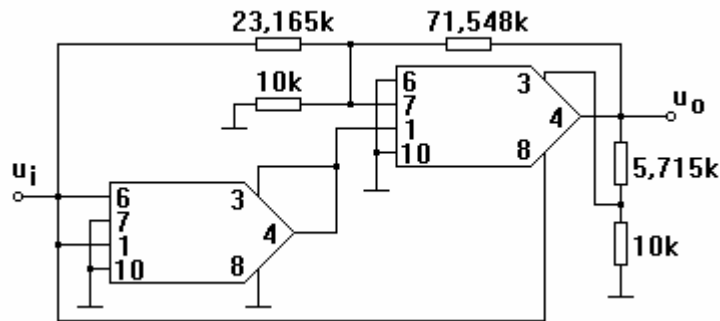
$$T = \frac{i \cdot k}{d} \quad (d \text{ este diametrul, } i \text{ este curentul rotoric iar } k \text{ este constanta de proporționalitate}).$$

Exemplu de aplicație: sinteza funcției sinus



$$u_o = A \left(\frac{[x1-x2][y1-y2]}{C} - [z1-z2] \right)$$

-a-



-b-

Figura 2.62: Aproximarea funcției sinus, folosind circuitul BurrBrown 4213 (2 bucăți)

$$\text{Funcția realizată de circuit: } u_o = \frac{1,5715 \cdot u_i - 0,004517 \cdot u_i^3}{1 + 0,001398 \cdot u_i^2}$$

$$\text{Funcția aproximată: } u_o = C \cdot \sin(C_1 \cdot u_i); \quad C = 10V; \quad C_1 = 9^\circ / V$$

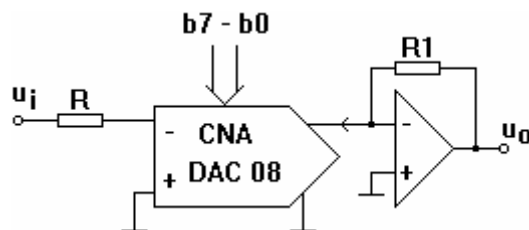


Figura 2.63: Înmulțirea dintre o mărime analogică și una numerică

$$I_{ref} = \frac{u_i}{R}, \quad I_o = -I_{ref} \left(b_7 \cdot \frac{1}{2} + b_6 \cdot \frac{1}{4} + \dots + b_0 \cdot \frac{1}{256} \right) = -I_{ref} \cdot \frac{N}{256}$$

$$u_o = -R_1 \cdot I_o = \frac{N}{256} \cdot I_{ref} \cdot R_1 = \frac{N \cdot u_i}{256} \cdot \frac{R_1}{R}$$

Implementarea numerică

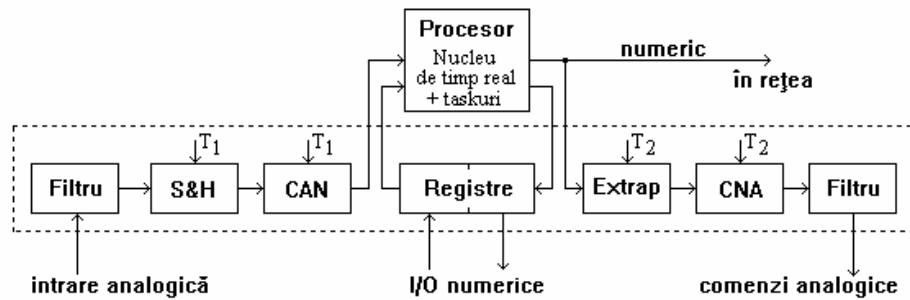


Figura 2.64: Funcții programate (microcontrolere, PIC, DSP, PC, automate programabile)

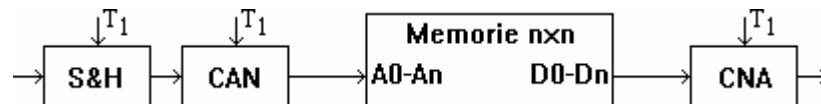
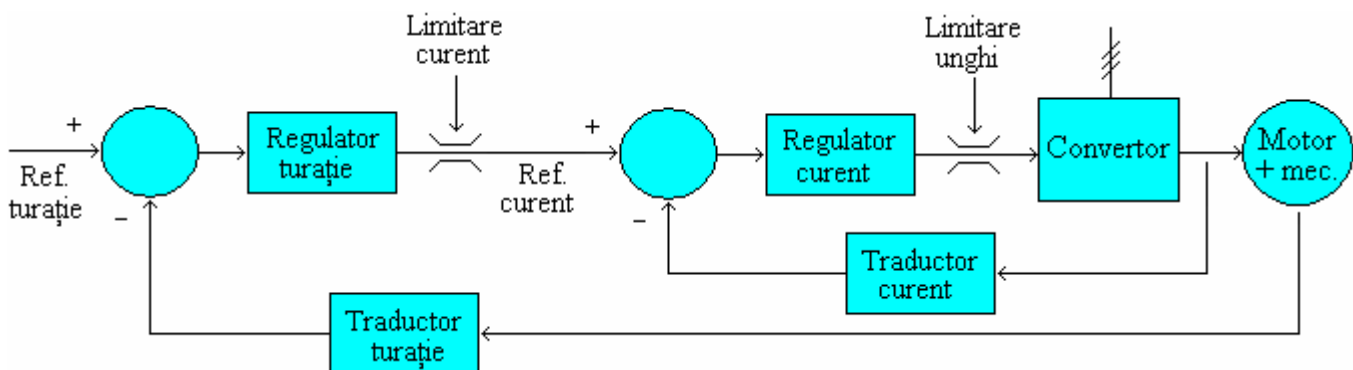


Figura 2.65: Funcții cablate (tabelate în ROM, FPLA)

Comparație:

Implementarea numerică a funcțiilor neliniare: potrivită pentru procesele lente, sau pentru cele în care „netezimea” formei de undă nu este necesară.

Implementarea analogică a funcțiilor neliniare: potrivită pentru procesele foarte rapide, sau cele la care este necesar ca forma de undă să fie netedă.



Rulor 1-H1

Pag. 46, limitare $\pm 11V$ cu diode, comutator analogic cu TEC-J

Pag. 51, limitarea reglabilă bilaterală, integrator folosit ca memorie analogică

Pag. 61, extractor de radical, ridicare la pătrat

Pag. 69, calculul cuplului prin înmulțire

Pag 71, calculul momentului de frecare, aproximarea neliniară prin segmente

Pag. 75, minimum

Pag. 76, limitarea impunerii, intrare neinversoare

Pag. 80, pag. 95, limitarea impunerii, intrare inversoare

Pag. 97, calculul fluxului statoric, aproximarea neliniară prin segmente