

Capitolul 6 Reglatoare automate și circuite asociate

Subansamble care îndeplinesc funcțiuni de reglare și protecție:

- Reglatoare pentru procese continue, comandă continuă
- Reglatoare pentru procese continue, comandă discretă
- Reglatoare pentru procese continue, comanda eșantionată (reglatoare numerice)
- Circuite de producere a referinței (în sisteme de reglare automată)
- Circuite de protecție automată, control
- Sisteme de optimizare

Noțiunea de regulator automat.

Reglatoare pentru procese continue:

- reglatoare bi- și tri-poziționale (comandă discretă, lege de reglare cu histerezis);
- reglatoare cu legi de reglare continue (P, PI, PD, PID etc.);
- reglatoare cu ieșire discontinuă și efect continuu (P, PI, PD, PID etc.);
- reglatoare numerice (orice algoritm menționat, algoritmi de complexitate mare).

6.1 Reglatoare bipoziționale

Reglare de temperatură, nivel etc.

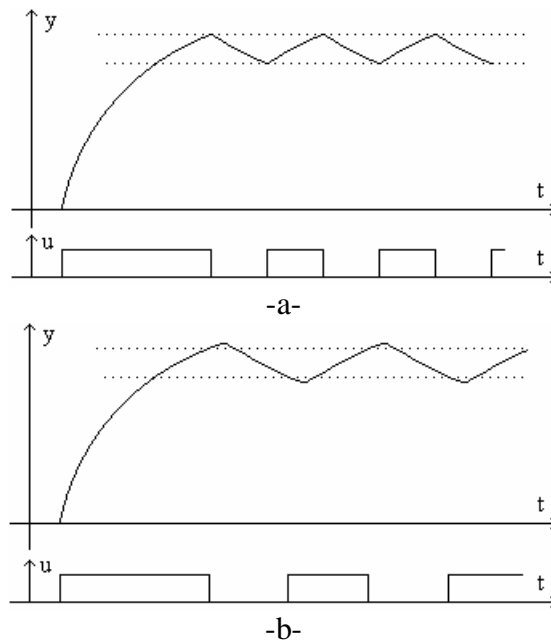


Figura 6.1: Ieșirea și comanda într-un proces dotat cu regulator bipozițional
a – proces de ordinul I, fără timp mort; b – proces cu timp mort

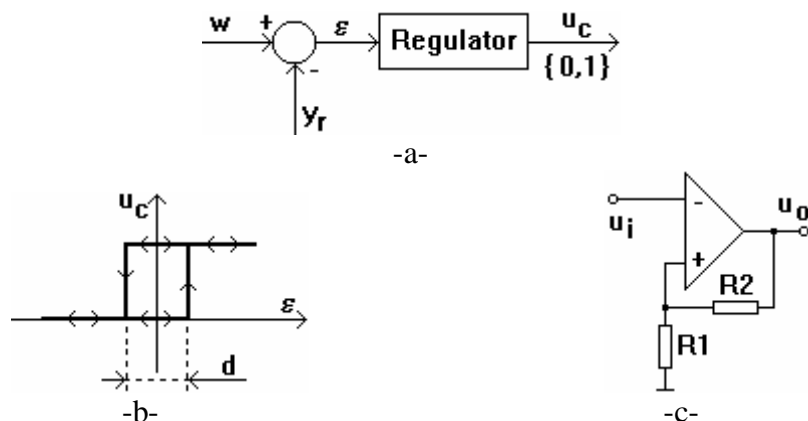


Figura 6.2: Regulator bipozițional cu circuit analogic cu histerezis

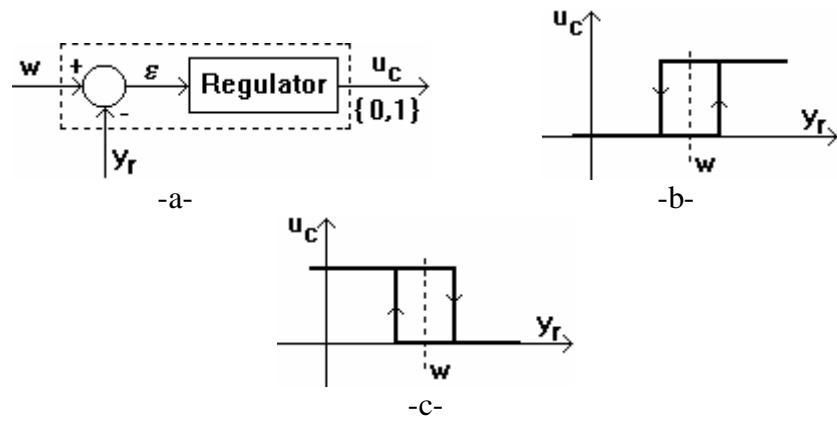


Figura 6.3: Caracteristică de reglator bipozițional care include și calculul erorii

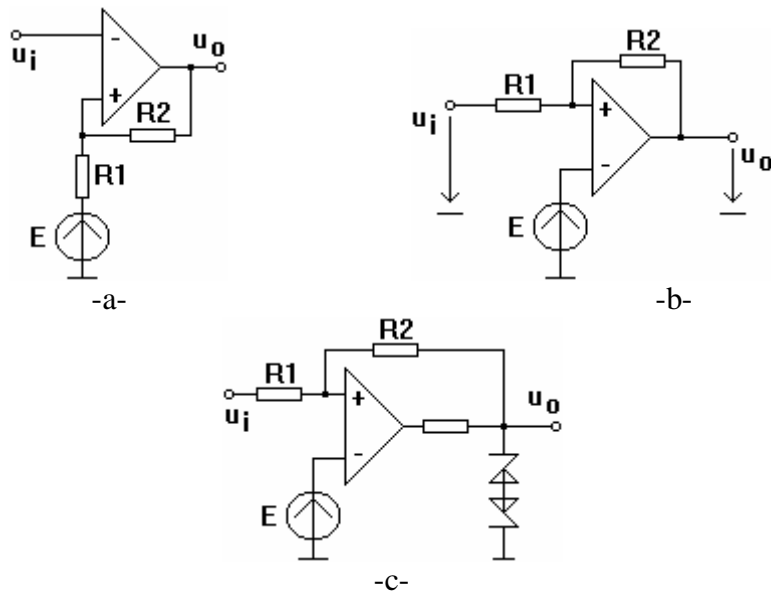


Figura 6.4: Reglator care include referința și calculul erorii

Referința (a) $E \cdot \frac{R_2}{R_1 + R_2}$ (b) $E \cdot \frac{R_1 + R_2}{R_2}$.

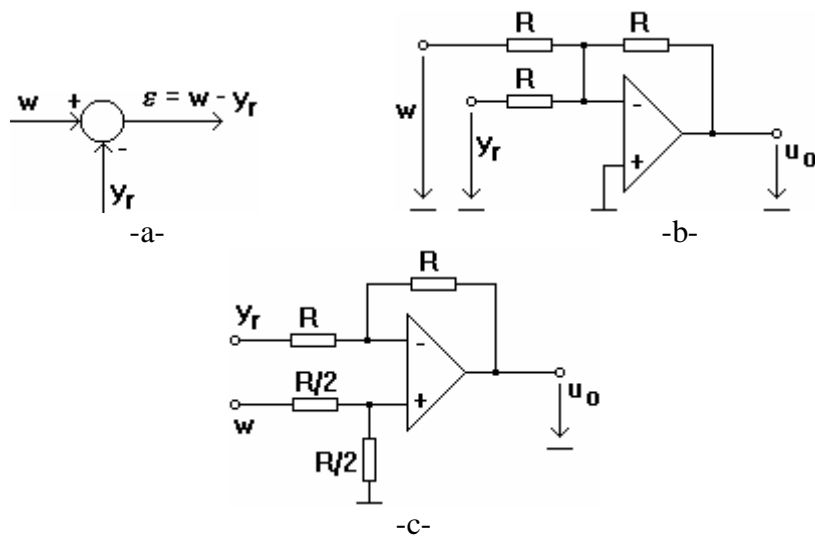


Figura 6.5: Circuite pentru calculul separat al erorii

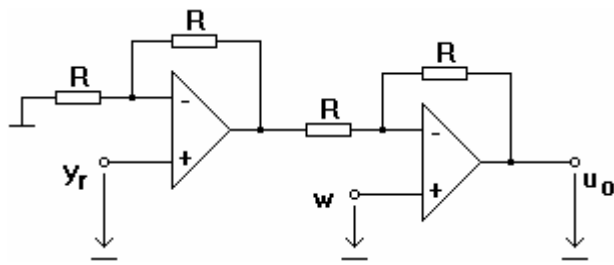


Figura 6.6: Calculul erorii

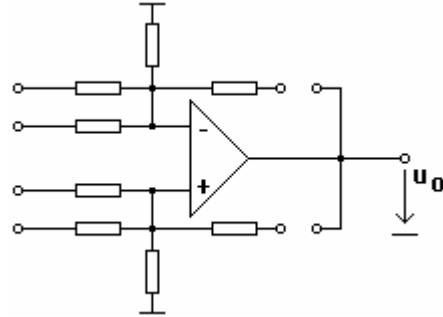


Figura 6.7: Circuit versatil, care poate fi configurat de utilizator

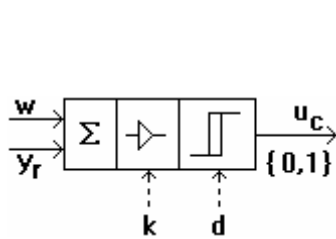


Figura 6.8: Modul general pentru caracteristică cu histerzis

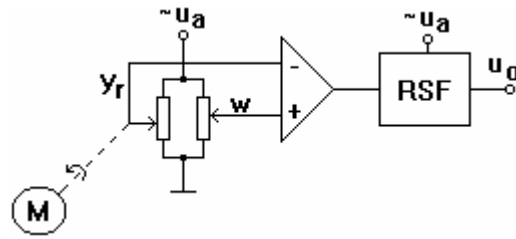
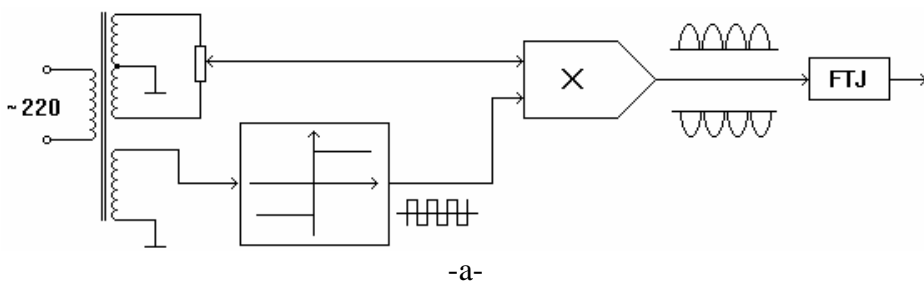
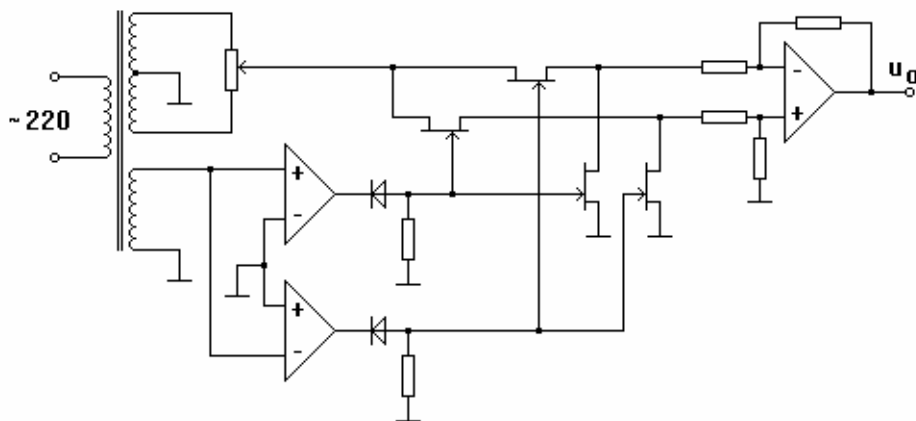


Figura 6.9: Calculul erorii pentru referință și reacție în curent alternativ



-a-



-b-

Figura 6.10: Demodularea sincronă prin înmulțire "valoare cu semn"

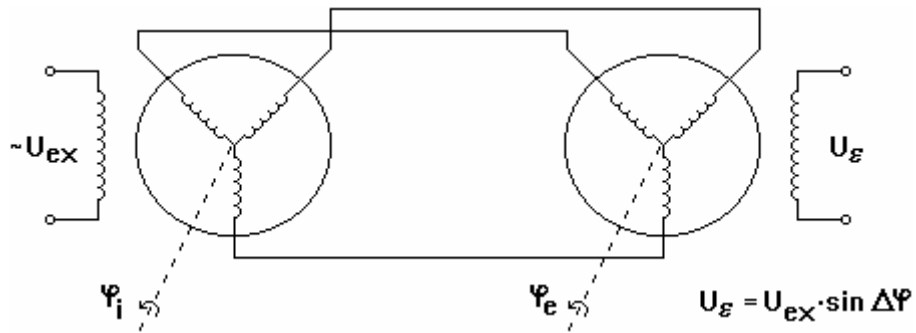


Figura 6.11: Eroarea de poziție transmisă prin selsine

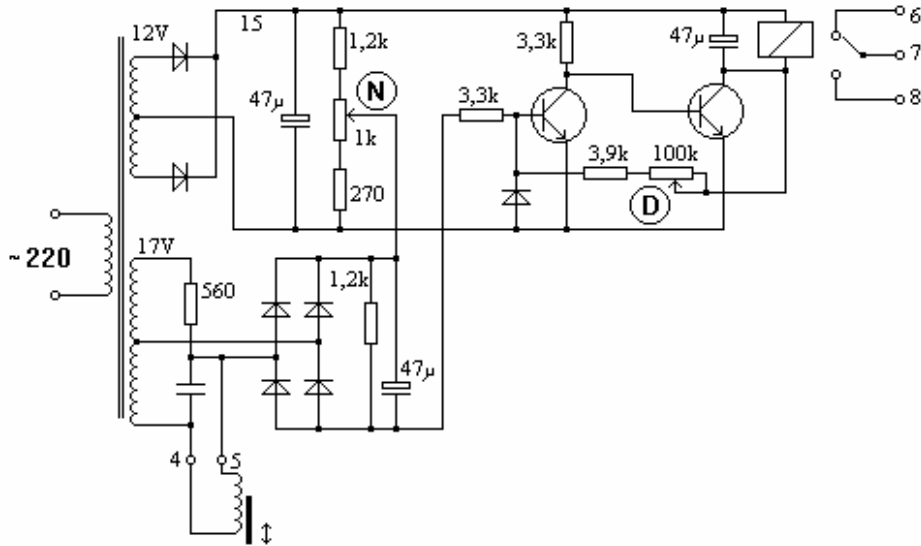


Figura 6.12: Schema regulatorului de nivel Danfoss E038 (inductanța cu miez mobil face parte din traductorul de nivel cu plutitor)

6.2. Reglatoare tripoziționale

"stînga-stop-dreapta" sau "înainte-stop-înapoi"
Termostat, guvernarea navei etc.

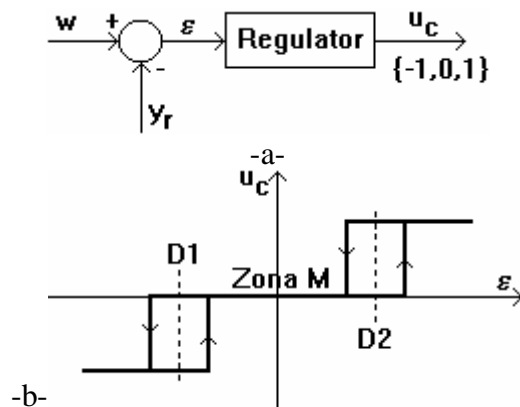


Figura 6.13: Caracteristică tripozițională

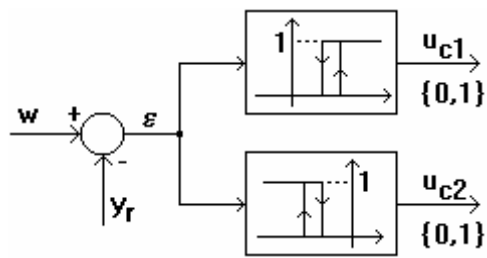


Figura 6.14: Implementarea caracteristicii tripoziționale cu două reglatoare bipoziționale

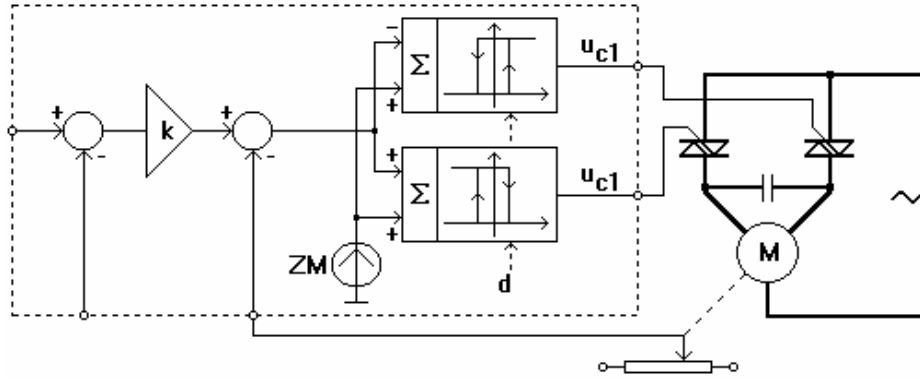


Figura 6.15: Reglare tripoziționă în poziționarea cu motor de curent alternativ

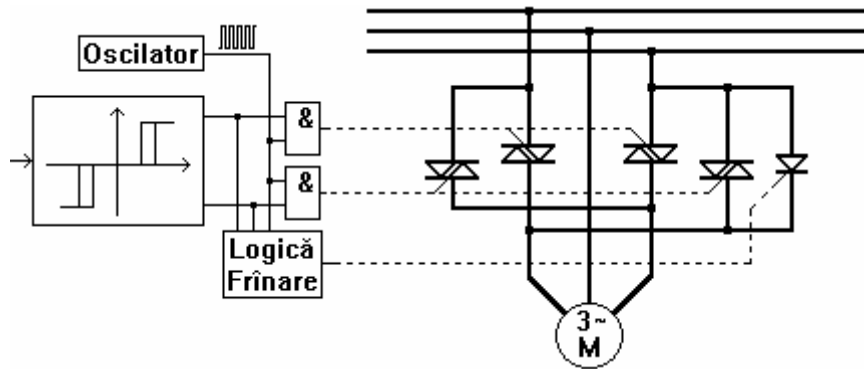


Figura 6.16: Servomecanism cu motor trifazat

6.3. Reglatoare continue

$$H_R(s) = K_p \left(1 + \frac{1}{T_i s} + T_d s \right) \quad (6.1)$$

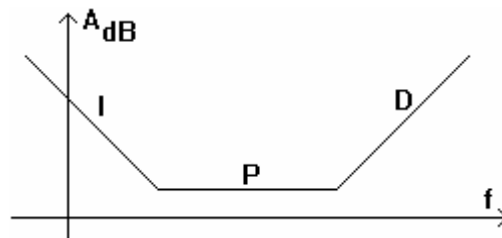


Figura 6.17: Caracteristica de frecvență a regulatorului PID

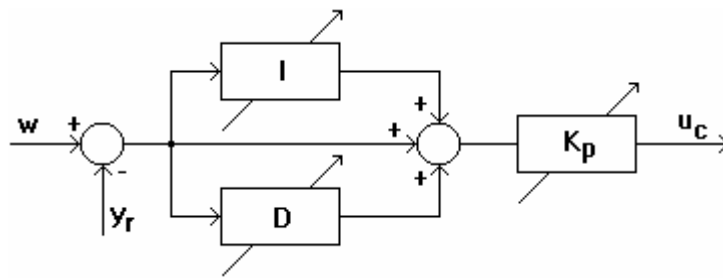


Figura 6.18: Regulator PID cu reglaj fără interacțiunea parametrilor

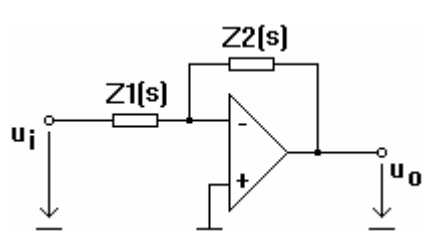


Figura 6.19: $H(s) = -\frac{Z_2(s)}{Z_1(s)}$

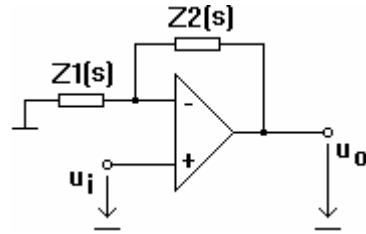


Figura 6.20: $H(s) = 1 + \frac{Z_2(s)}{Z_1(s)}$

Integratorul

Funcția de transfer:

$$H(s) = -\frac{1}{aRCs} = -\frac{1}{T_i s} \quad (6.2)$$

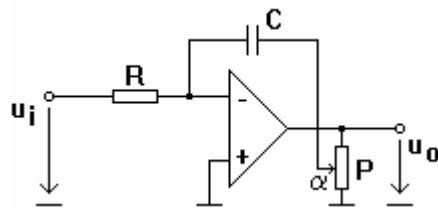


Figura 6.21: Integratorul

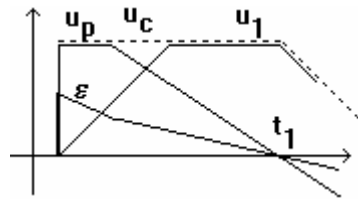


Figura 6.22: Evoluția ieșirii la saturarea integratorului

Limitele parametrului alfa (6.21)

Extremele constantei de timp de integrare T_i

Condensatorul nu este folosit pentru reglaj fin; reglajul în trepte

Baterii de condensatoare și rezistoare

Erorile integratorului - la procese lente

Saturarea integratorului - fenomenul de wind-up (6.22)

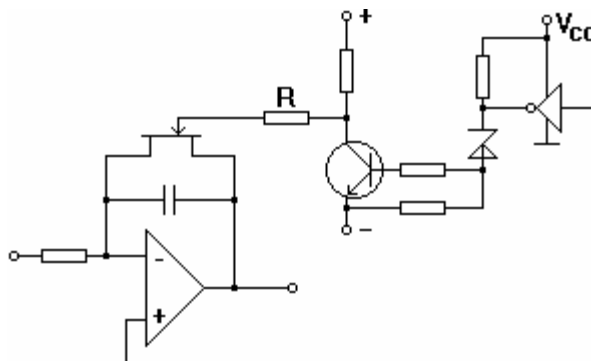


Figura 6.23: Soluție pentru scurtcircuitarea regulatorului

Funcționarea regulatorului de curent, la referință nulă, dar cu offset

Derivatorul

$$H(s) = T_d s \tag{6.3}$$

Nu este fizic realizabilă
 Saturat pentru orice salt în semnalul de intrare (chiar sub 1mV)
 Necesară filtrarea semnalului de intrare

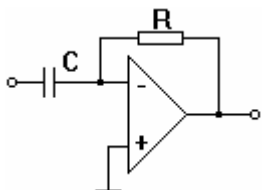


Figura 6.24: Derivator ideal

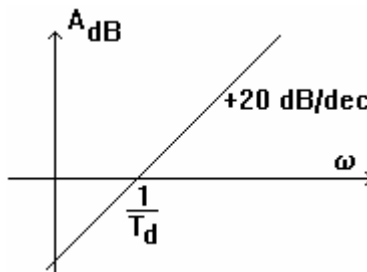


Figura 6.25: Caracteristica de frecvență a derivatorului ideal

Derivator adaptat la semnal

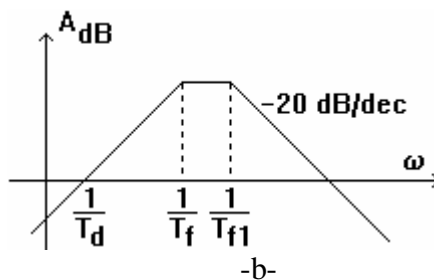
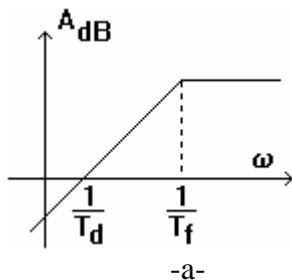


Figura 6.26: Caracteristici de derivator la limită cauzal, respectiv strict cauzal

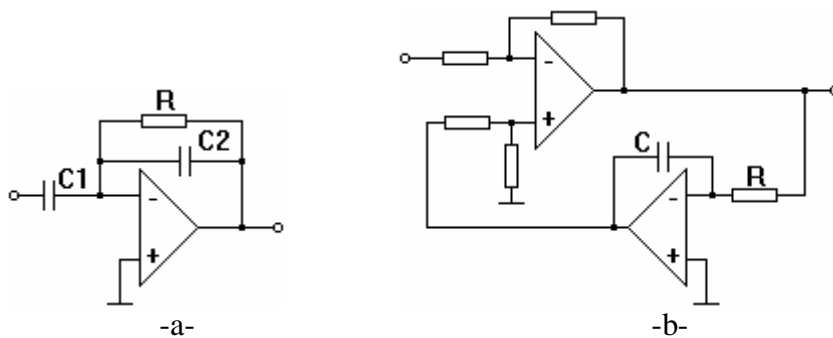


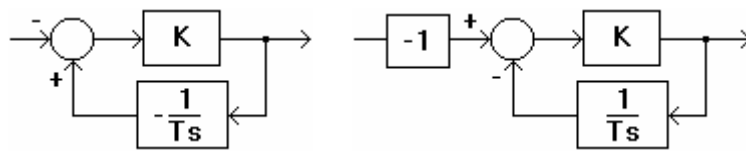
Figura 6.27: Derivator la limită cauzal

$$H(s) = -\frac{sC_1R}{sC_2R+1} = -\frac{T_d s}{T_f s+1}, \tag{6.4}$$

Reglare simultană T_d și T_f
 R variabil

$$H(s) = -\frac{sCR}{s\frac{CR}{K}+1} = -\frac{T_d s}{T_f s+1}, \tag{6.5}$$

Reglajul parametrilor (din RC și K)



-a-
-b-
Figura 6.28: Schema bloc a implementării derivatorului la limită cauzal

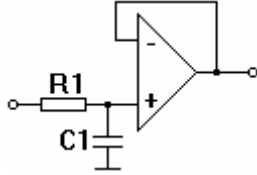


Figura 6.29: Filtru trece-jos

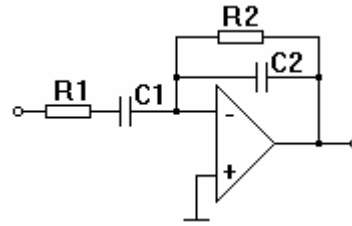


Figura 6.30: Derivator strict cauzal

$$H(s) = \frac{1}{C_1 R_1 s + 1} = \frac{1}{T_f s + 1}. \quad (6.6)$$

$$H(s) = -\frac{s C_1 R_2}{(s C_2 R_2 + 1)(s C_1 R_1 + 1)} = -\frac{T_d s}{(T_f s + 1)(T_{f1} s + 1)} \quad (6.7)$$

Reglajul parametrilor T_d și T_f

Reglatoare PI cu interacțiunea parametrilor

$$H_1(s) = -\frac{R_2}{R_1} \left(1 + \frac{1}{s C R_2}\right) = -K_p \left(1 + \frac{1}{T_i s}\right); \quad (6.8)$$

$$H_2(s) = 1 + \frac{1}{s C R} = 1 + \frac{1}{T_i s}; \quad (6.9)$$

$$H_3(s) = \frac{R_1 + R_2}{R_1} \left(1 + \frac{1}{s C (R_1 + R_2)}\right) = K_p \left(1 + \frac{1}{T_i s}\right). \quad (6.10)$$

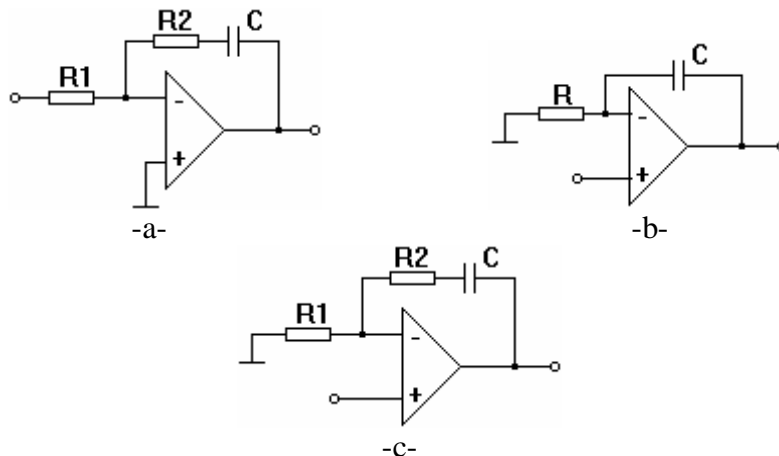


Figura 6.31: Reglatoare PI cu interacțiunea parametrilor

Varianta preferată în acționări, vezi exemplu rilor H0, H1

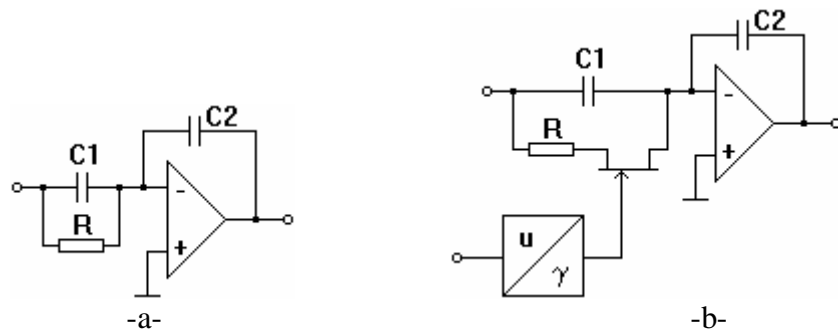


Figura 6.32: Regulator PI cu parametru comandat în tensiune

Circuit pentru adaptare (ajustarea automată a parametrilor)

$$H(s) = -\frac{C_1}{C_2} \left(1 + \frac{1}{sC_1R}\right) = -K_p \left(1 + \frac{1}{T_i s}\right). \quad (6.11)$$

$$T_i = \frac{RC_1}{g}. \quad (6.12)$$

Reglatoarele PD cu interacțiunea parametrilor

$$H_1(s) = -\frac{R_2}{R_1} (1 + sCR_1) = -K_p (1 + T_d s); \quad (6.13)$$

$$H_2(s) = 1 + sCR = 1 + T_d s; \quad (6.14)$$

$$H_3(s) = -\frac{R_1 + R_2}{R} \left(1 + sC \frac{R_1 R_2}{R_1 + R_2}\right) = -K_p (1 + T_d s). \quad (6.15)$$

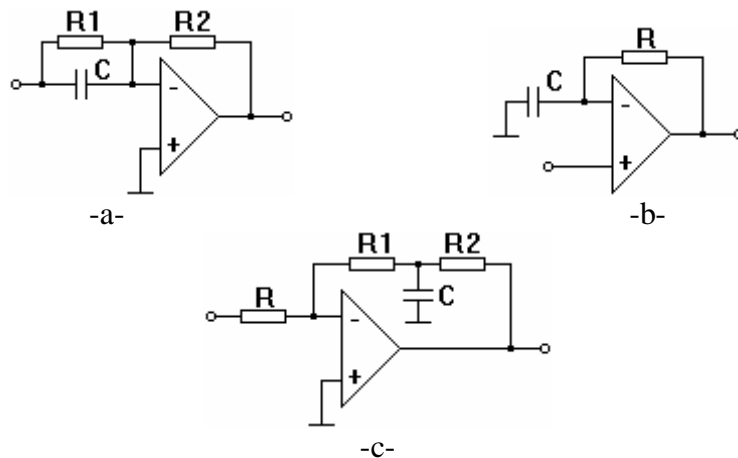


Figura 6.33: Reglatoarele PD cu interacțiunea parametrilor

Necesitatea filtrării

Regulator PD la limită cauzal

$$H_1(s) = 1 + \frac{sC_1R}{1 + sC_2R} = 1 + \frac{T_d s}{T_f s + 1}; \quad (6.16)$$

$$H_2(s) = -\frac{R_2}{R_1} \left(1 + \frac{s(C_1R_1 - C_2R_2)}{1 + sC_2R_2}\right) = -K_p (1 + T_d s) \quad (6.17)$$

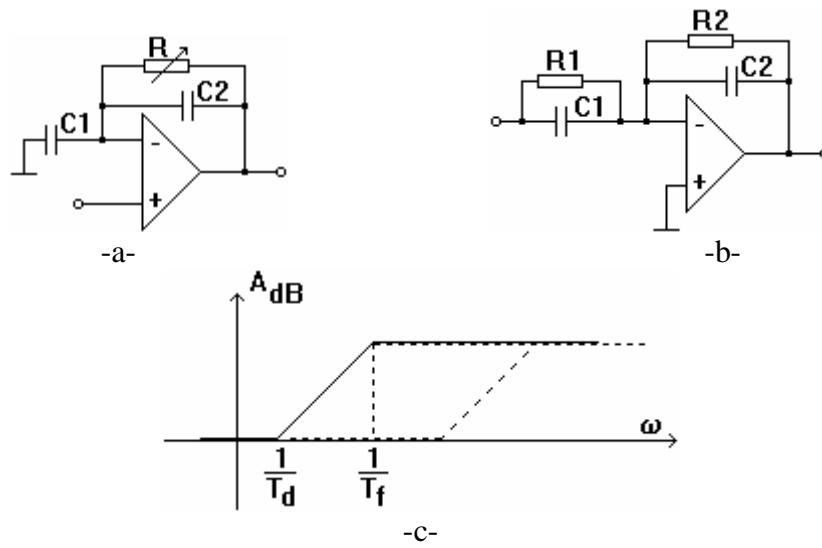


Figura 6.34: Regatoare PD la limită cauzale

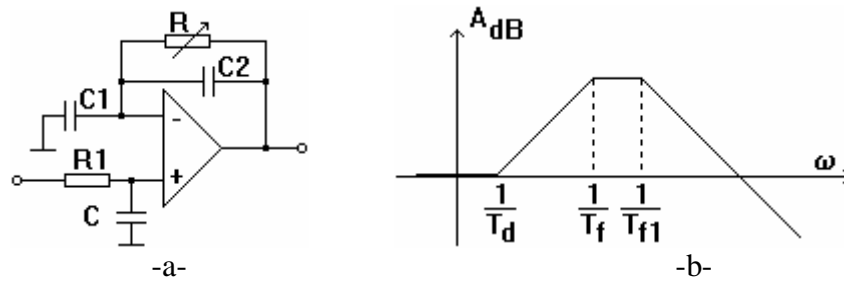


Figura 6.35: Regulator PD strict cauzal

$$H(s) = \frac{1}{sCR_1} \left(1 + \frac{sC_1R}{1 + sC_2R} \right) = \frac{1}{T_{f1}s + 1} \left(1 + \frac{T_d s}{T_f s + 1} \right) \quad (6.18)$$

Blocuri PID

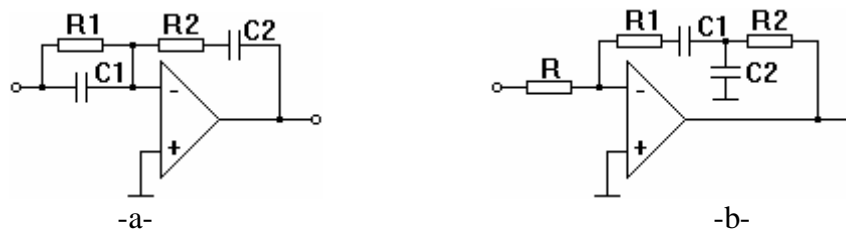


Figura 6.36: Regatoare PID cu interacțiunea parametrilor

$$H(s) = -\left(\frac{C_1}{C_2} + \frac{R_2}{R_1} \right) \left(1 + \frac{1}{s(C_1R_1 + C_2R_2)} + s \frac{C_1R_1C_2R_2}{C_1R_1 + C_2R_2} \right) \quad (6.19)$$

$$H(s) = -\frac{R_1C_1 + R_2C_1 + R_2C_2}{RC_1} \left(1 + \frac{1}{s(R_1C_1 + R_2C_1 + R_2C_2)} + \frac{sC_1R_1C_2R_2}{R_1C_1 + R_2C_1 + R_2C_2} \right) \quad (6.20)$$

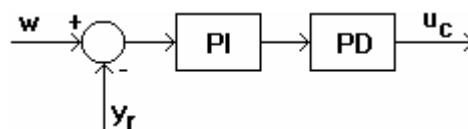


Figura 6.37: Regulator PID

Vezi exemplu regulator PI SIMADYN

6.4. Reglatoare cu ieșire discontinuă și cu efect PD, PI, PID

"duty-cycle", PWM

procese rapide, procese lente.

principal diferită de reglarea bipozițională

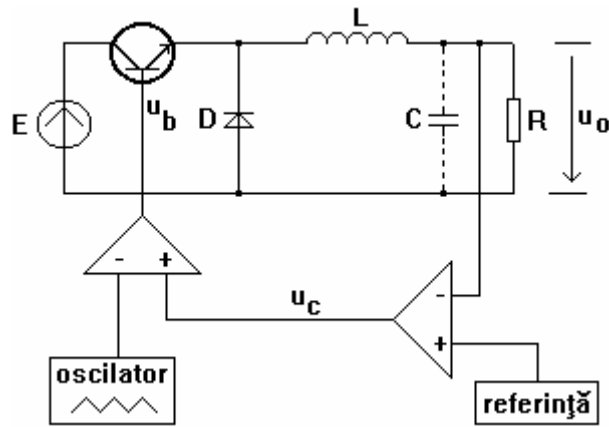


Figura 6.38: Reglarea tensiunii în variatoare de tensiune continuă

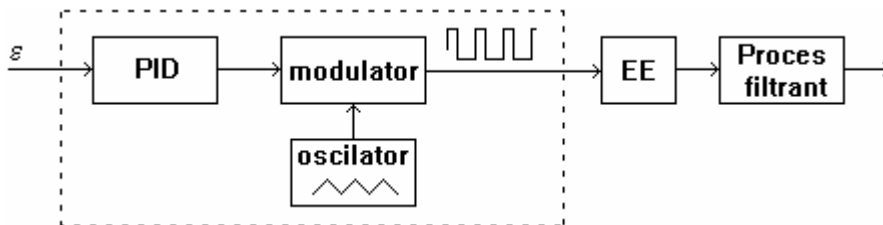
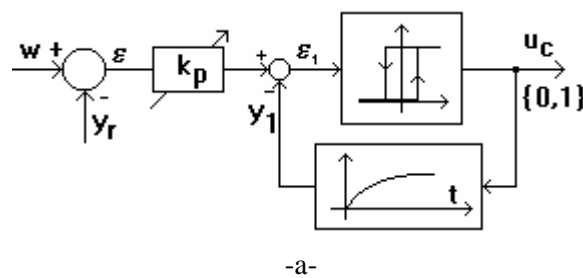


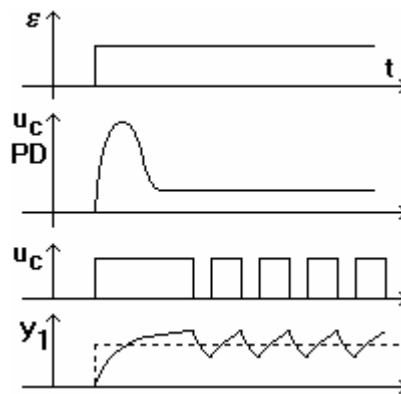
Figura 6.39: Circuit echivalent al regloarelor cu ieșire discontinuă și efect continuu

Procese lente, regulator PD

$\frac{1}{Ts+1}$ pe calea de reacție



-a-



-b-

Figura 6.40: Regulator PD cu ieșire în impulsuri

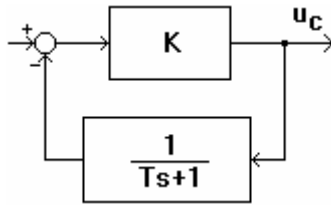


Figura 6.41: Circuit liniar, cu filtru trece-jos pe calea de reacție

$$H(s) = \frac{K}{1 + \frac{K}{Ts+1}} = \frac{K}{K+1} \left(1 + \frac{\frac{TK}{K+1}s}{\frac{T}{K+1}s+1} \right) = K_p \left(1 + \frac{T_d s}{T_f s+1} \right), \quad (6.21)$$

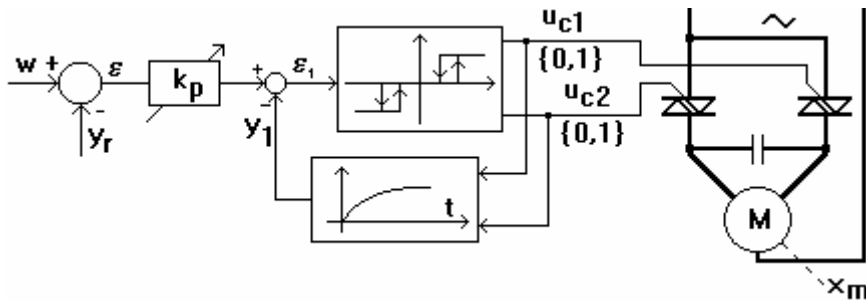


Figura 6.42: Regulator cu ieșire discretă și efect PI

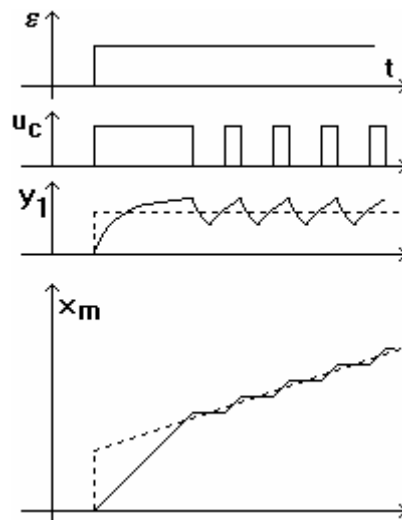


Figura 6.43: Răspunsul la treaptă al regulatorului 6.41

6.5. Alte circuite folosite în reglare automată sau protecție automată

Circuit de programare a referinței

Implementare numerică, vezi termostat pentru centrala de apartament

Circuit de limitare a vitezei de variație a referinței

$$U_o = -\frac{1}{sRC} aK(U_o - U_i) \quad (6.22)$$

$$H(s) = \frac{1}{\frac{RC}{aK} s + 1} = \frac{1}{Ts + 1} \quad (6.23)$$

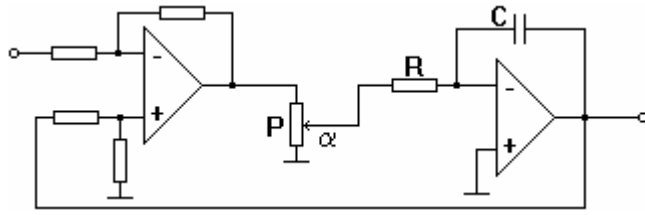


Figura 6.44: Circuit de limitare a vitezei de variație a referinței

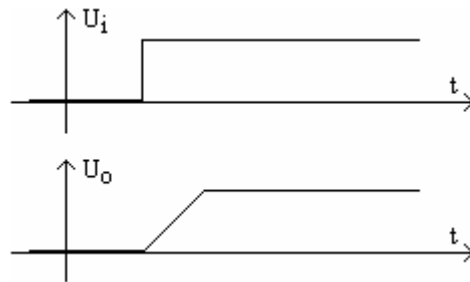
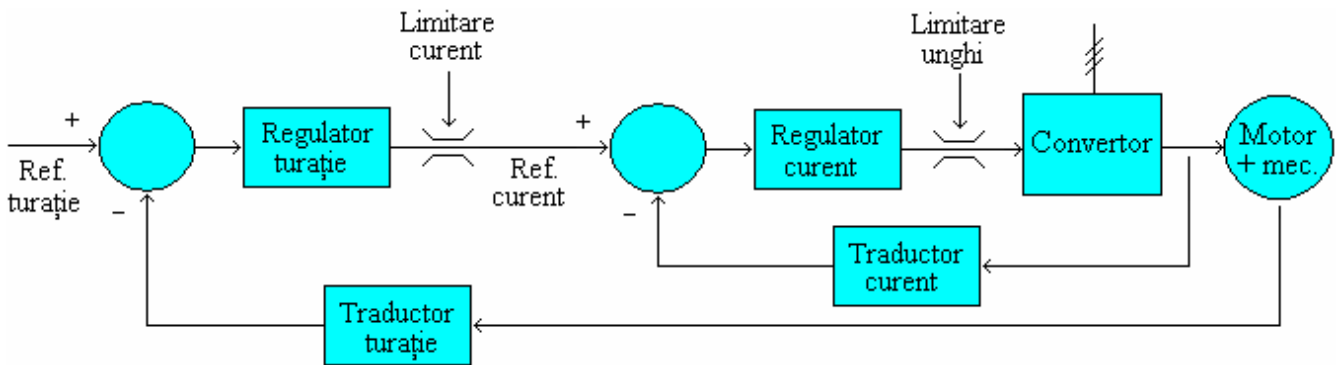


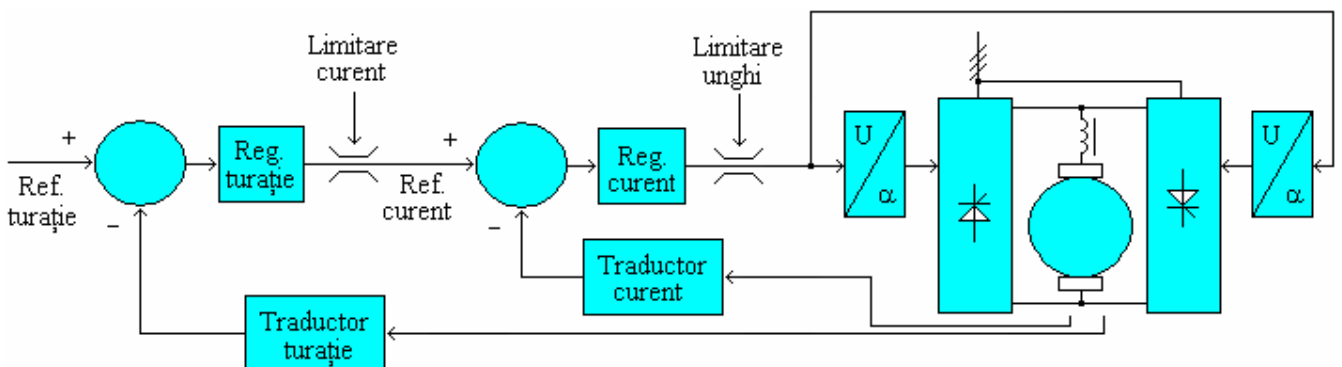
Figura 6.45: Limitarea vitezei de variație a semnalului

$$\left| \frac{dU_o}{dt} \right|_{\max} = aV_{sat} \frac{1}{RC}, \quad (6.24)$$

Logica de basculare în convertoare alimentate de la rețea



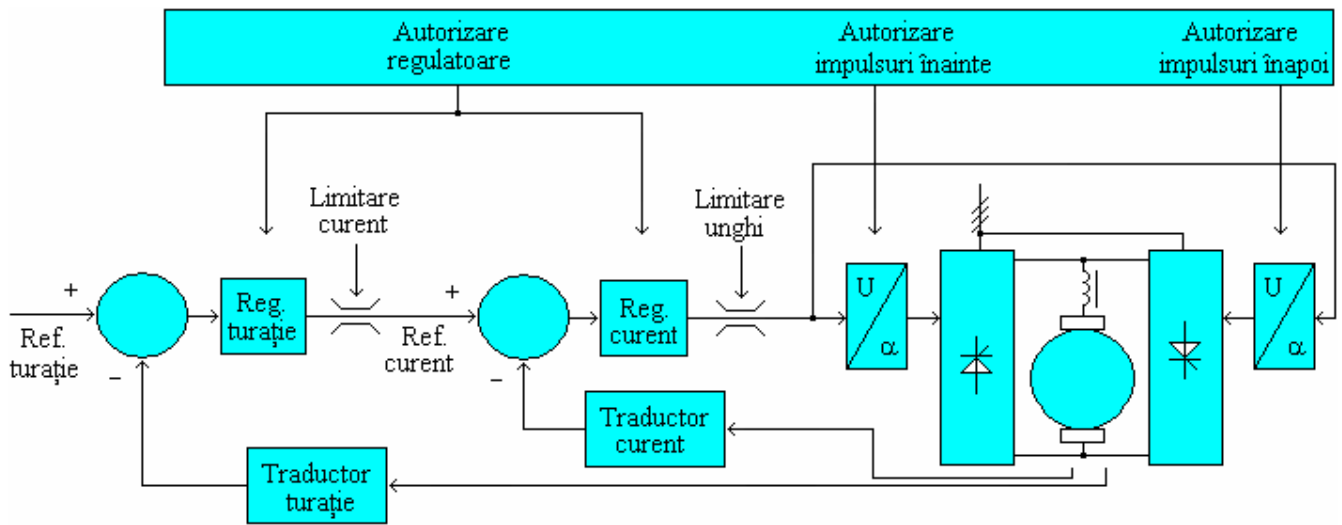
Schemă generală



Schemă pentru motor de c.c., convertor bidirecțional, cu blocarea impulsurilor

Necesară:

- menținerea în conducție a cel mult unei grupe - blocarea impulsurilor
- menținerea conducției pînă la anularea curentului (epuizarea energiei din bobine)
- evitarea acționării ca rezultat al integrării unei derivate (offset) – autorizarea reguletoarelor



Schemă care introduce autorizarea reguletoarelor și blocarea impulsurilor

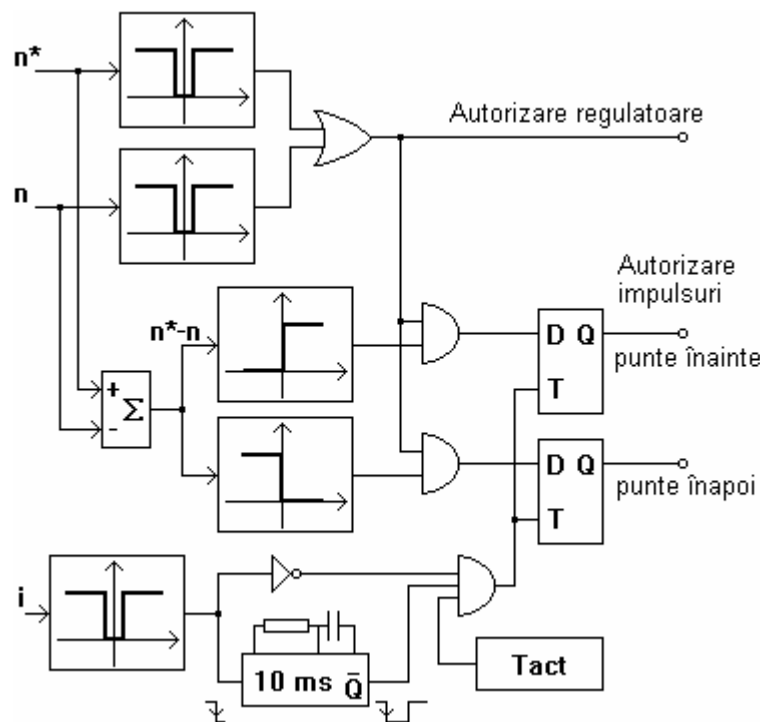


Figura 6.46: Logică de basculare a grupelor pentru convertor cu tiristoare

- regimul staționar pe mersul înainte (grupa înainte în regim de redresor);
- evacuarea energiei magnetice din bobine, înainte de anularea curentului (grupa înainte în regim de ondulator);
- pauza de conducție, impusă de logica de basculare (nici o grupă nu este autorizată);
- creșterea curentului pe grupa înapoi, pentru frînarea recuperativă a motorului, care încă se învîrte în sensul înainte (grupa înapoi în regim de ondulator);
- curent limitat, pînă la anularea turației (grupa înapoi în regim de ondulator);
- curent limitat, pentru accelerarea motorului pe sensul înapoi (grupa înapoi în regim de redresor);
- scăderea curentului pînă la valoarea de regim staționar;
- regimul staționar pe mersul înapoi.

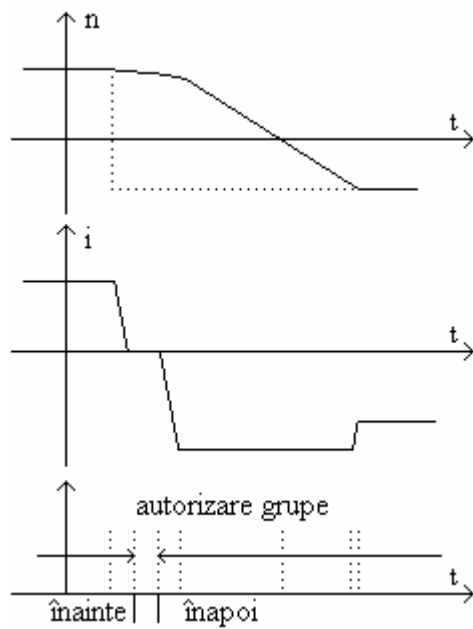


Figura 6.47: Diagramele semnalelor de reacție în timpul basculării

Circuite de protecție la depășirea valorilor maxime

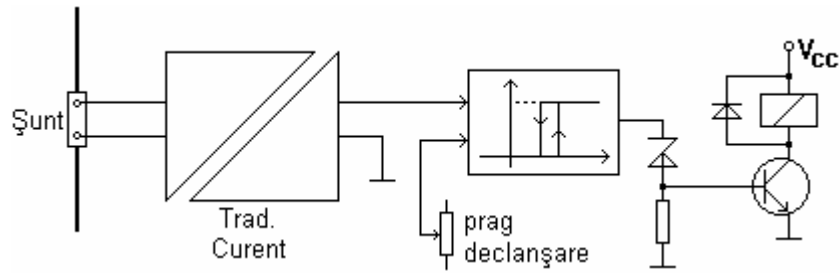


Figura 6.48: Circuit de protecție automată la curent maxim prin motor

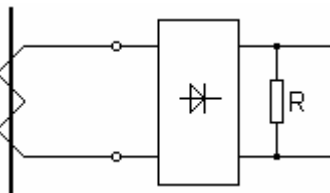
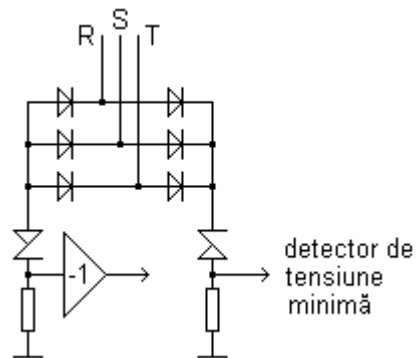


Figura 6.49: Reductorul de curent, folosit pentru protecția la curent maxim pe alimentare

Circuit de protecție la lipsa semnalului de sincronizare din convertor



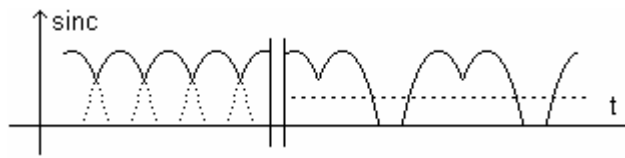


Figura 6.50: Protecție automată la lipsa semnalului de sincronizare

Circuit de supraveghere a pornirii la acționarea electrică

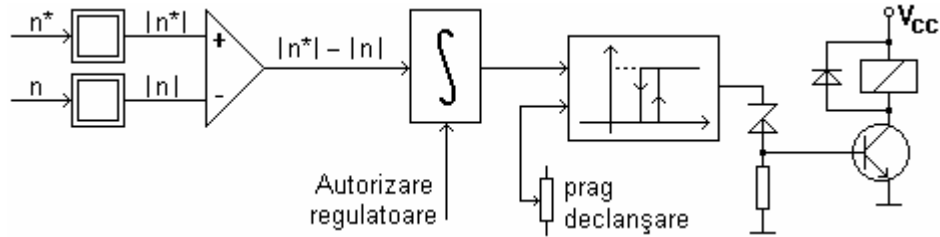


Figura 6.51: Supravegherea pornirii unei acționări electrice

Semnalișări

Cu lămpi, LED, sonerie, hupă, indicatori electromecanici, pîlpîire, ciuperca de avarie

Afișor alfanumeric (2x16), afișor grafic, monitor cu inerfață grafică

Înregistratoare pe hîrtie, bandă de magnetofon (abandonată), digitale, înregistrator de avarie

Exemplu de afișare pe monitor a referințelor, reacției, autorizărilor de funcționare, diagramei de timp

Exemplu de regulator numeric de temperatură



6.6. Regulator numerice

Regulator bipozițional, implementat numeric (laborator)

```
% parametrii
hist=0.5;                % jumătate din latimea histerezisului
lim_sup=5;              % comanda superioara
lim_inf=-5;            % comanda inferioara

% -----
% regulatorul
eroare=er(i);
if eroare>hist
    com(i)=lim_sup;
else if eroare<-hist
    com(i)=lim_inf;
else com(i)=com(i-1);
end
end
```

Regulator tripozițional, implementat numeric (laborator), se presupune că furnizează două ieșiri de comandă, care se aplică la două circuite separate ale elementului de execuție

```
% parametrii
hist=0.5;                % jumătate din latimea histerezisului
zm=0.5;                 % jumătate din zona moarta
lim_sup=5;              % comanda superioara
nul=0;                  % comanda inferioara

% -----
% regulatorul
eroare=er(i);
if eroare>-zm & eroare<zm
    com1(i)=nul;
    com2(i)=nul;
else if eroare>zm+2*hist
    com1(i)=lim_sup;
    com2(i)=nul;
else if eroare<-zm-2*hist
    com1(i)=nul;
    com2(i)=lim_sup;
else com1(i)=com1(i-1);
    com2(i)=com2(i-1);
end
end
end
```

Componenta proporțională

$$u_p(t) = K_p e(t) = K_p (w(t) - y(t)) \quad (6.25)$$

```
eps:=w-y;
up:=Kp*eps;
if up>lim_sup then up:=lim_sup;
if up<lim_inf then up:=lim_inf;
```

Componenta integrală

$$H(s) = \frac{K_p}{T_i s}, \quad (6.26)$$

$$u_i(t) = \frac{K_p}{T_i} \int_0^t e(t) \cdot dt + u_i(0). \quad (6.27)$$

$$H(z) = \frac{K_p T_e}{T_i} \cdot \frac{z^{-1}}{1 - z^{-1}} = \frac{K_p T_e}{T_i} \cdot (z^{-1} + z^{-2} + \dots). \quad (6.28)$$

$$H(z) = \frac{K_p T_e}{T_i} \cdot (1 + z^{-1} + z^{-2} + \dots) \quad (6.29)$$

$$u_i(t) = \frac{K_p T_e}{T_i} \cdot (e(t) + e(t-1) + e(t-2) + \dots). \quad (6.30)$$

```
ui_ant:=0;
-----
eps:=w-y;
ui:=Te/Ti*eps+ui_ant;
ui_ant:=ui;
u:=Kp*ui;
if u>lim_sup then u:=lim_sup;
if u<lim_inf then u:=lim_inf;
```

efect anti wind-up.

```
ui_ant:=0;
-----
eps:=w-y; (* calculul erorii curente *)
up:=eps; (* componenta proporțională *)
ui:=Te/Ti*eps+ui_ant; (* componenta integrală *)
u:=Kp*(up+ui); (* comanda *)
(* limitarea ieșirii și a componentei integrale *)
if u>lim_sup then u:=lim_sup;
if u<lim_inf then u:=lim_inf;
ui_ant:=u/Kp-up;
```

Filtru trece-jos de ordinul I

$$H(s) = \frac{Y(s)}{X(s)} = \frac{K}{Ts + 1}. \quad (6.31)$$

$$H(z) = \frac{Y(z)}{X(z)} = \frac{K(1-a)z^{-1}}{1-az^{-1}}, \quad (6.32)$$

notația:

$$a = \exp\left(-\frac{T_e}{T}\right), \quad (6.33)$$

$$y(t) = ay(t-1) + K(1-a) \cdot x(t-1) \quad (6.34)$$

Explicată varianta **la limită cauzală**

```
a:=exp(-Te/T);
b:=K*(1-a);
-----
y:=a*y+b*x;
```

Componenta derivativă

$$H(s) = K_p \frac{T_d s}{T_f s + 1}, \quad (6.35)$$

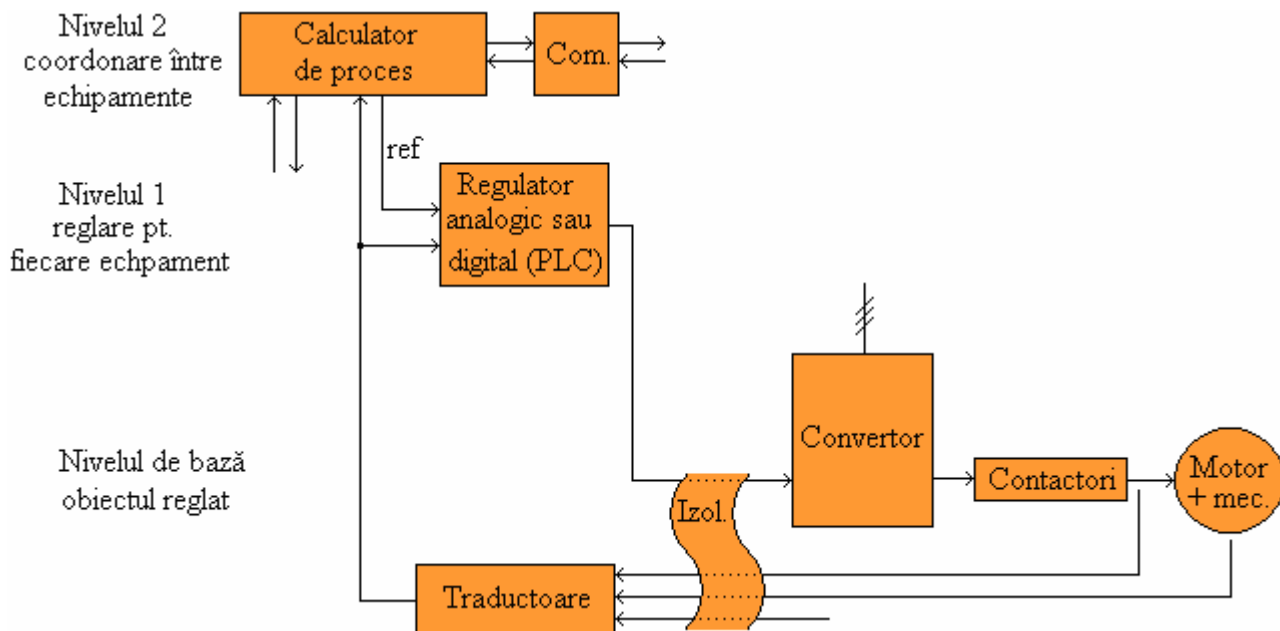
$$H(z) = K_p \frac{T_d}{T_e} \cdot \frac{1 - z^{-1}}{1 - \frac{1}{N} z^{-1}}. \quad (6.36)$$

$$u_d(t) = \frac{1}{N} u_d(t-1) + K_p \frac{T_d}{T_e} (e(t) - e(t-1)) \quad (6.37)$$

```
eps_ant:=0;
ud_ant:=0;
-----
eps:=w-y;
ud:=Kp*Td/Te*(eps-eps_ant);
ud:=ud+ud_ant/N;
ud_ant:=ud;
eps_ant:=eps;
u:=ud;
if u>lim_sup then u:=lim_sup;
if u<lim_inf then u:=lim_inf;
```

Concluzii:

- Circuitele pentru traductoare (liniare, neliniare, digitale)
- Circuitele neliniare pentru prelucrarea semnalelor
- Izolarea galvanică
- Reglatoare, protecții
- Circuitele numerice programabile pentru traductoare, reglatoare, protecții



Exemple de proiectare:

- Circuite liniare
- Circuite neliniare
- Reglatoare analogice
- Reglatoare numerice

Bibliografie:

L. Frangu, S. Caraman – Electronică industrială, Ed. Academica, Galați, 2001

**** Danfoss, foaie de catalog Regulator de nivel E038

**** Electrotehnica București, Manual de utilizare convertoare seria CPTR, 1980

**** Siemens AG, seria de module SIMADYN