4 CAPITOLUL 4 Regulatoare

Regulatorul reprezintă elementul decizional din structura unui sistem de reglare automată. Rolul regulatorului este acela:

- de a calcula eroarea sau abaterea, prin compararea referinței (valoarea dorită pentru mărimea de ieșire a procesului) cu măsura (valoarea curentă a ieșirii procesului);
- de a prelucra abaterea după un anumit algoritm și de a genera un semnal de comandă, astfel încât abaterea să fie cât mai mică, în cazul ideal egală cu zero.

Un regulator este alcătuit din două blocuri funcționale (fig. 4.1), corespunzătoare celor două funcții realizate de acesta, și anume:

- **elementul de comparație aditivă** (EC) care realizează compararea referinței/prescrierii (r) și a reacției/semnalului de măsură (m), rezultând abaterea/eroarea (e);
- **blocul de calcul** (BC) care realizează prelucrarea abaterii (e) pe baza unui anumit algoritm, generând semnalul de comandă (c).

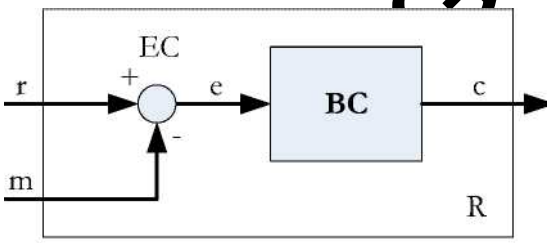

Figura 4.1 Fig. 4.1. Schema bloc a unui regulator: EC - element de c, BC - bloc de calcul, R - regulator, r - referință (prescriere), m - măsură (reacție), e - eroare (abatere), c - comandă.

Blocul de calcul este realizat sub forma unei structuri cu reacție, ce are pe canalul direct un amplificator, iar pe canalul de reacție un bloc de reacție, în care este implementat algoritmul de reglare (fig. 4.2). [Marinoiu, Paraschiv, 1992]

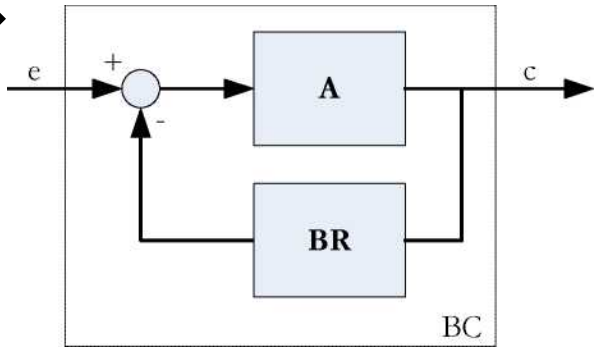

Figura 4.2 Fig. 4.2. Schema bloc a blocului de calcul: BC - bloc de calcul, A - amplificator, BR - bloc de reacție, e - eroare (abatere), c - comandă.

Din punctul de vedere al energiei utilizate, regulatoarele pot fi electronice, pneumatice și hidraulice, amplificatorul din structura blocului de calcul, fiind de asemenea electronic, pneumatic sau hidraulic. În cazul regulatoarelor electronice amplificatorul din structura blocului de calcul este un amplificator operațional caracterizat printr-un factor de amplificare relativ mare, de ordinul miilor și un răspuns rapid, ce poate fi considerat fără inerție.

RAMT - 2017

Ținând cont de observațiile făcute anterior cu privire la amplificatorul din structura regulatorului electronic, funcția de transfer a regulatorului, fig. 4.2., se poate scrie:

$$G_R(s) = \frac{C(s)}{E(s)} = \frac{k_A}{1 + k_A\, G_{BR}(s)} = \frac{1}{1/k_A + G_{BR}(s)} \cong \frac{1}{G_{BR}(s)} \qquad (4.1)$$

în care:

$G_R(s)$ - este funcția de transfer a regulatorului;

C(s) - transformata Laplace a comenzii;

E(s) - transformata Laplace a erorii;

k_A - factorul de amplificare al amplificatorului;

$G_{BR}(s)$ - funcția de transfer a blocului de reacție.

În figura 4.3 este reprezentată schema funcțională a unui regulator standard. Prescrierea/referința regulatorului poate fi locală (internă) sau externă, de la un element de comandă ierarhic superior. Traductorul de intrare (TI), încorporat în regulator, realizează conversia deplasării mecanice (r_i) a unui buton, indicată pe o scală, de regulă în procente, în semnal unificat (r) de aceeași natură fizică cu semnalul de reacție (m).

În cazul în care comutatorul AUTOMAT/MANUAL (CAM) este trecut în poziția M, regulatorul funcționează în așa numitul regim MANUAL, comanda (c) fiind generată cu ajutorul blocului de comandă manual (BCM).

În cazul în care comutatorul AUTOMAT/MANUAL (CAM) este trecut în poziția A, regulatorul funcționează în așa numitul regim AUTOMAT, comanda (c) fiind generată în mod automat, pe baza unui algoritm de reglare.

Cel mai cunoscut algoritm de reglare este **algoritmul Proporțional-Integral- Derivativ (PID), ce calculează comanda regulatorului prin prelucrarea adecvată a erorii. Comanda regulatorului este proporțională cu abaterea, depinde de integrala abaterii și de derivata acesteia**.

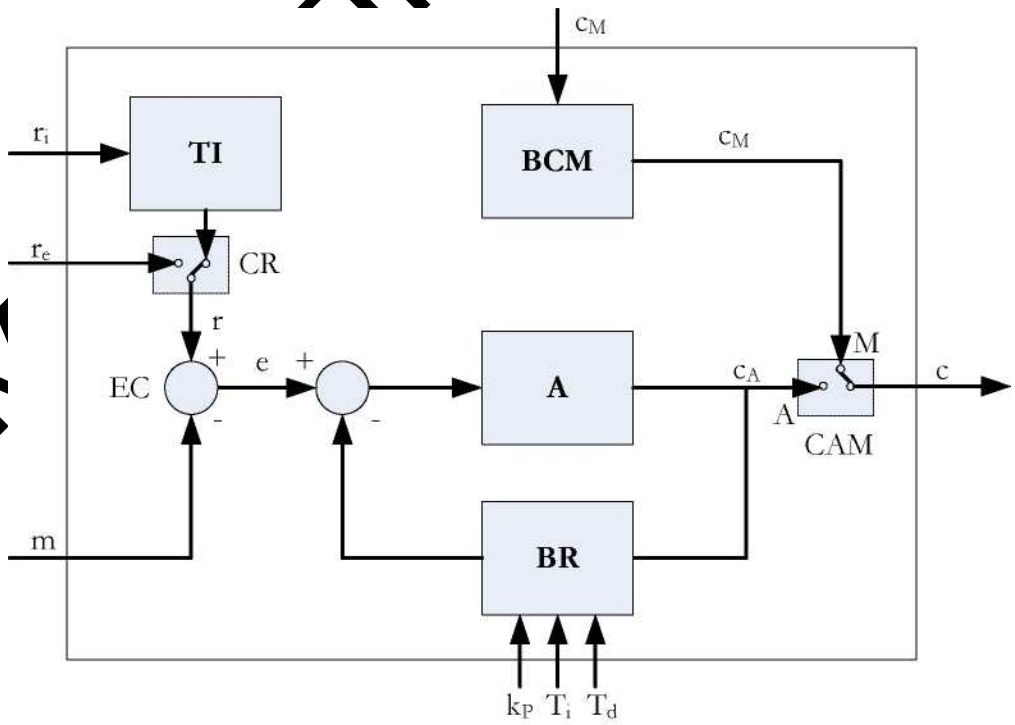

Figura 4.3 Fig.4.3. Schema bloc funcțională a unui regulator: TI - traductor de intrare, BCM - bloc comandă manuală, A - amplificator, BR - bloc de reacție, EC - element de comparație, CR - comutator referință, CAM -

comutator AUTOMAT / MANUAL, A - automat, M - manual;
r_i - referință internă, r_e - referință externă, r - referință, e - eroare (abatere), m - măsură, c - comandă, c_A - comandă automat, c_M - comandă manual, k_p T_i, T_d - parametrii ce intervin în algoritmul de reglare PID.

4.1 4.1. Regulatoare continue

Regulatoarele electronice continue unificate au semnale de intrare și de ieșire sub forma unui curent electric în gama 4...20 mA. Regulatorul generează comanda (c) prin prelucrarea erorii curente (e = r - m) după algoritmul PID (Proporțional- Integral-Derivativ): [Mihalache, 2008]

$$c = k_p\left(e + \frac{1}{T_i}\int_0^t e\,dt + T_d\frac{de}{dt}\right) + c_0 \qquad (4.2)$$

în care: k_p - factorul de proporționalitate; T_i - constanta de timp integrală; T_d - constanta de timp derivativă; c_0 - comanda în lipsa abaterii.

Între factorul de proporționalitate (k_P) și banda de proporționalitate (BP), cu care se operează în practică, există relația k_P = 100/BP. În cazurile particulare $T_i = \infty$ și $T_d = 0$, algoritmul PID devine PD și, respectiv, PI.

4.1.1 Regulatorul Proporțional (R-P): $T_i = \infty$ și $T_d = 0$

În acest caz comanda are forma

$$c = k_p\, e + c_0 \qquad (4.3)$$

cu funcția de transfer

$$G_R(s) = kP \qquad (4.4)$$

În funcție de modul de calcul a erorii, factorul de proporționalitate (k_P) poate fi pozitiv (SENS INVERS, e = r - m) sau negativ (SENS DIRECT, e = m - r). În cazul regulatoarelor analogice sensul se stabilește cu ajutorul unui comutator, în timp ce la regulatoarele numerice acest lucru se realizează prin configurare software.

În continuare se va considera sensul invers ca sens implicit și ca atare toate caracteristicile regulatoarelor se vor reprezenta în acest caz particular.

Regulatorul proporțional prezintă **avantajul** unui răspuns rapid, cu consecințe în ceea ce privește performanțele dinamice ale sistemelor de reglare automată. **Dezavantajul** componentei proporționale este acela al imposibilității eliminării în totalitate a abaterii, din cauza faptului că la intrări egale și momente de timp diferite, comanda are aceeași valoare (c_0), (fig 4.5).

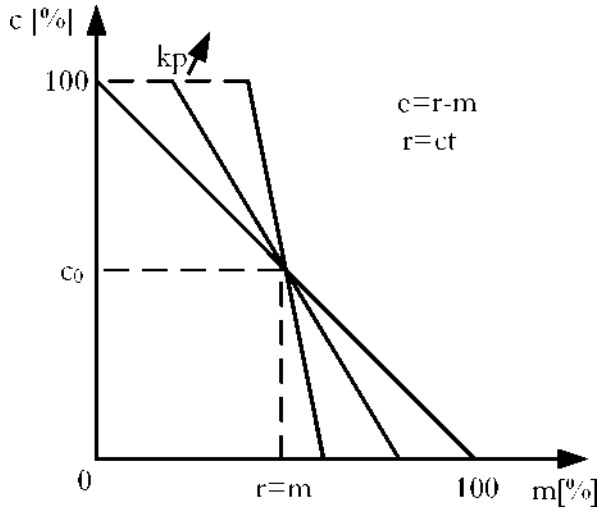

Figura 4.4 Fig. 4.4. Caracteristica statică a R-P: r - referință, e - eroare (abatere), m - măsură, c - comandă, c_Q - comanda în lipsa erorii, k_P - factorul de amplificare al regulatorului.

RAMT - UCAL - 2017

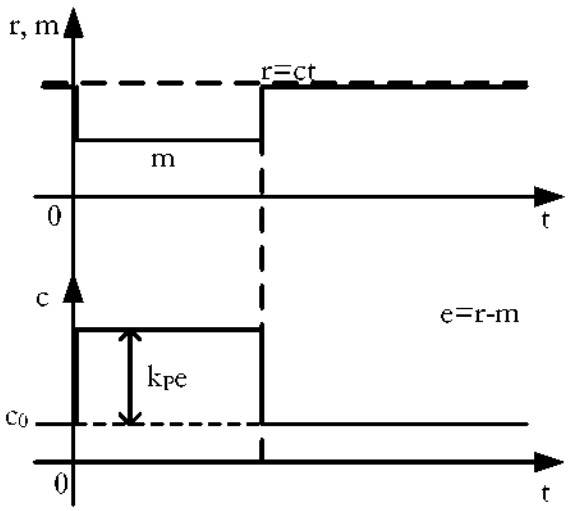

Figura 4.5 Fig.4.5. Caracteristica dinamică a R-P: r - referință, e - eroare (abatere), m - măsură, c - comandă, c_0 - comanda în lipsa erorii, k_P - factorul de amplificare al regulatorului.

4.1.2 Regulatorul Proporțional-Integral (R-PI): $T_d = 0$

În acest caz comanda are forma

$$c = k_p\left(e + \frac{1}{T_i}\int_0^t e\,dt\right) + c_0 \qquad (4.5)$$

cu funcția de transfer

$$G_R(s) = k_p\left(1 + \frac{1}{T_i s}\right) \qquad (4.6)$$

Componenta integratoare prezintă **avantajul** eliminării în totalitate a erorii staționare, deoarece la momente de timp diferite și intrări egale, comenzile au valori diferite (fig.4.6).

Dezavantajul acestei componente este dat de performanțele dinamice modeste în comparație cu cele ale componentei proporționale.

Regulatorul Proporțional-Integral reunește avantajele componentelor proporțională și integrală, conferind rapiditate în răspuns, datorită componentei proporționale și posibilitatea eliminării erorii în regim staționar, datorită componentei integrale.

În figura 4.6 se prezintă caracteristica dinamica a R-PI.

RAMT - CURS UAL 2017

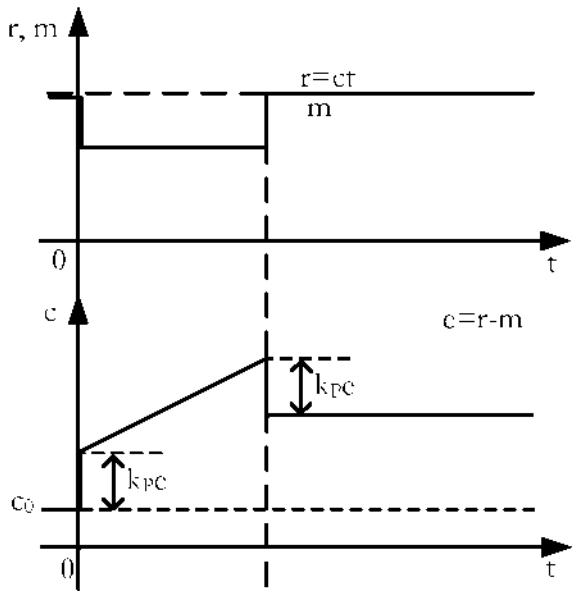

Figura 4.6 Fig.4.6. Caracteristica dinamică a R-PI: r - referință, e - eroare (abatere), m - măsură, c - comandă, c_0 - comanda în lipsa erorii, k_P- factorul de amplificare al regulatorului.

4.1.3 Regulatorul Proporțional-Derivativ (R-PD): $T_i = \infty$

În acest caz comanda are forma

$$c = k_P \left(e + T_d \frac{de}{dt}\right) + c_0 \qquad (4.6)$$

cu funcția de transfer

$$G_R(s) = k_P(1 + T_d s) \qquad (4.7)$$

Componenta derivativă are rol anticipativ, asigurând un surplus de comandă necesar eliminării rapide a abaterii. Această componentă se folosește, de obicei, în cazul proceselor lente.

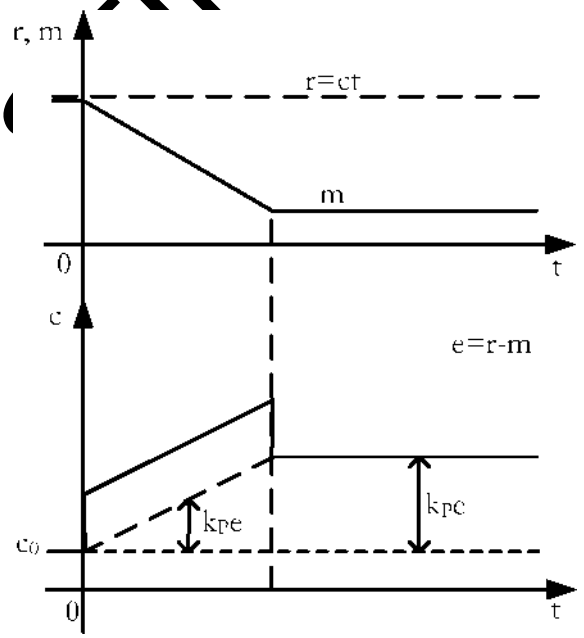

Figura 4.7 Fig.4.7. Caracteristica dinamică a R-PD: r - referință, e - eroare (abatere), m - măsură, c - comandă, c_0 - comanda în lipsa erorii, k_P - factorul de amplificare al regulatorului.

În figura 4.7 se prezintă caracteristica dinamica a R-PD.

RAMT - CURS LICEAL - 2017

4.1.4 Regulatorul Proporțional-Integral-Derivativ

Acest regulator îmbină avantajele celor trei componente prezentate anterior (rapiditate în răspuns, eroare staționară nulă și surplus de comandă) și are la bază relația

$$c = k_p\left(e + \frac{1}{T_i}\int_0^t e\,dt + T_d\frac{de}{dt}\right) + c_0 \qquad (4.8)=(4.2)$$

cu funcția de transfer

$$G_R(s) = k_p\left(1 + \frac{1}{T_i s} + T_d s\right) \qquad (4.9)$$

Parametrii k_p, T_i și T_d poartă denumirea de parametrii de acordare ai regulatorului, valorile lor influențând performanțele reglării prin stabilitate și calitate.

În figura 4.8 se prezintă caracteristica dinamică a regulatorului PID.

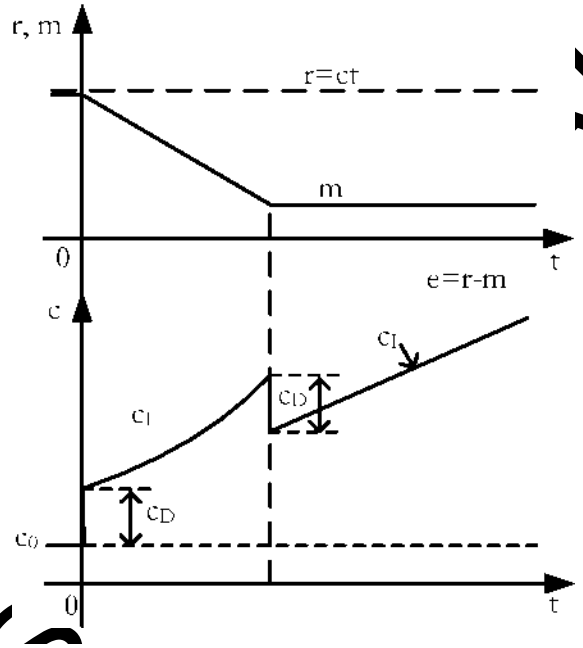

Figura 4.8 Fig. 4.8. Caracteristica dinamică a R-PID: r - referință, e - eroare (abatere), m - măsură, c - comandă, c_0 - comanda în lipsa erorii, c_D - comanda aferentă componentei derivative, c_I - comanda aferentă componentei integrale, k_P- factorul de amplificare al regulatorului.

Componenta integrală are caracter persistent, în sensul că nu-și încetează acțiunea decât atunci când eroarea este zero, iar componenta derivativă are caracter anticipativ deoarece depinde de viteza de variație a erorii, anticipând evoluția acesteia (la viteză nulă va rămâne constantă, la viteză pozitivă va crește, la viteză negativă va scădea).

Componenta derivativă reprezintă un element impropriu, și ca atare nu se poate implementa fizic. Practic, în aplicații, algoritmul PID are forma [Cîrtoaje, 2004]:

$$c = k_p\left(e + \frac{1}{T_i}\int_0^t e\,dt + D\right) + c_0; \qquad \tau_d\frac{dD}{dt} + D = T_d\frac{de}{dt} \qquad (4.10)$$

4.2 4.2. Regulatoare Numerice

Regulatoarele numerice conțin

- un microprocesor specializat pentru prelucrarea datelor numerice,
- unitate de memorie pentru stocarea datelor,

- magistrală pentru transmisia datelor,
- interfață serială pentru comunicație și cuplare la calculator,
- unitate de intrare pentru achiziția semnalelor ce dispune de un convertor analog/numeric pentru conversia semnalului de măsură și a celui de referință din semnal electric 4...20 mA, în semnal numeric,
- unitate de ieșire ce dispune de un convertor numeric/analogic pentru conversia semnalului numeric de comandă în semnal electric, dispozitiv de afișare a datelor, etc. [Paraschiv ș.a., 1996]

În figura 4.9 se prezintă schema bloc a unui astfel de regulator numeric.

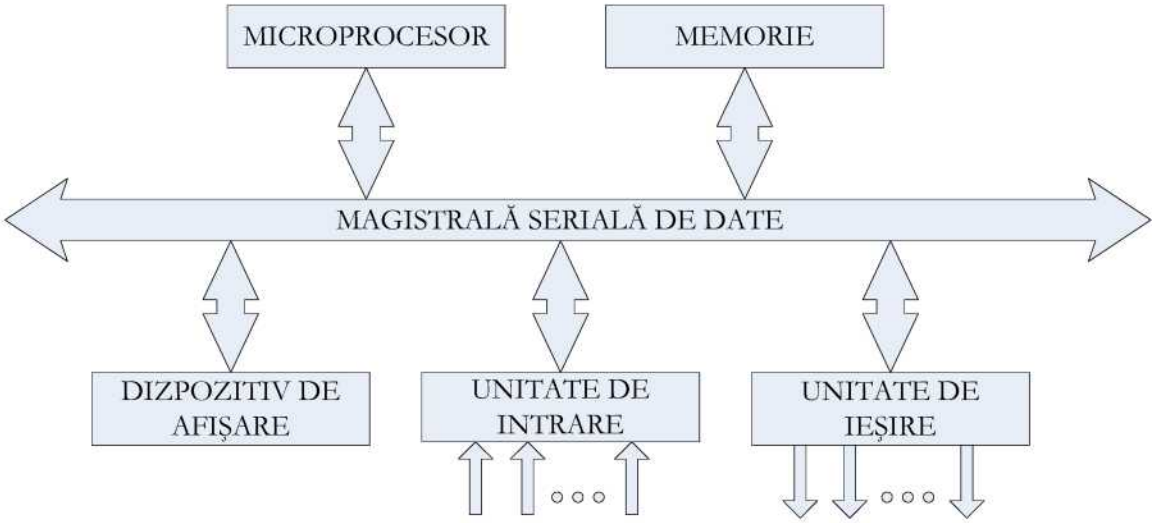

Figura 4.9 Fig.4.9. Schema bloc a unui regulator numeric.

Regulatoarele numerice dispun și de posibilitatea determinării automate a parametrilor de acordare prin funcția de autotuning.

Algoritmul PID implementat în regulatoarele numerice se obține prin discretizarea relației continue (4.8) cu perioada de eșantionare T, cu $t_K = kT$ și $t_{K-1} = (k-1)T$, k e N, obținându-se:

$$c_k = c_0 + k_P \cdot \left[e_k + \frac{T}{T_i} \cdot \sum_{j=0}^{k} e_j + T_d \cdot \frac{e_k - e_{k-1}}{T} \right], \tag{4.11}$$

$$c_{k-1} = c_0 + k_P \cdot \left[e_{k-1} + \frac{T}{T_i} \cdot \sum_{j=0}^{k-1} e_j + T_d \cdot \frac{e_{k-1} - e_{k-2}}{T} \right]. \tag{4.12}$$

Pentru obținerea relațiilor de mai sus s-a folosit metoda dreptunghiurilor pentru integrarea numerică, astfel $\int_0^{t=kT} e(\tau)d\tau \cong T\sum_{j=0}^{k} e_j$, iar pentru derivarea numerică a fost folosită aproximarea [Mihalache, 2008]

Relația (4.11) poartă denumirea de forma poziţională a algoritmului PID. Această formă prezintă dezavantajul necesităţii iniţializării la fiecare pas.

Prin scăderea relaţiilor (4.11) şi (4.12) se obţine

$$c_k = c_{k-1} + k_P \cdot \left[e_k - e_{k-1} + \frac{T}{T_i} \cdot e_k + \frac{T_d}{T} \cdot (e_k - 2e_{k-1} + e_{k-2}) \right] \quad (4.13)$$

ce poate fi scris sub forma

$$c_k = c_{k-1} + k_P \cdot (b_0 \cdot e_k + b_1 \cdot e_{k-1} + b_2 \cdot e_{k-2}), \quad (4.14)$$

în care

$$b_0 = 1 + \frac{T}{T_i} + \frac{T_d}{T}, b_1 = -(1 + \frac{2 \cdot T_d}{T}), b_2 = \frac{T_d}{T} \quad (4.15)$$

Relaţia (4.14) poartă denumirea de forma recursivă a algoritmului PID, relaţie ce nu mai necesită iniţializarea la fiecare pas şi prin care se evită propagarea erorilor de integrare.

În cazul în care forma de reprezentare a algoritmului PID este cea din relaţia (4.10), forma numerică se poate scrie astfel: [Cîrtoaje, 2004]

$$\begin{cases} c_k = k_P \cdot (e_k + I_k + D_k) \\ I_k = I_{k-1} + \frac{T}{T_i} \cdot e_k \\ D_k = e^{-\frac{T}{\tau_d}} \cdot D_{k-1} + \frac{T_d}{T}(e_k - e_{k-1}) \end{cases} \quad (4.16)$$

4.3 4.3. Regulatoare Bipoziţionale

Regulatoarele bipoziţionale generează un semnal de comandă ce poate avea numai două valori distincte, notate convenţional cu 0 şi 1. Aceste regulatoare sunt elemente de comandă neliniare, ce au caracteristica statică de tip releu cu histerezis (fig.4.10).

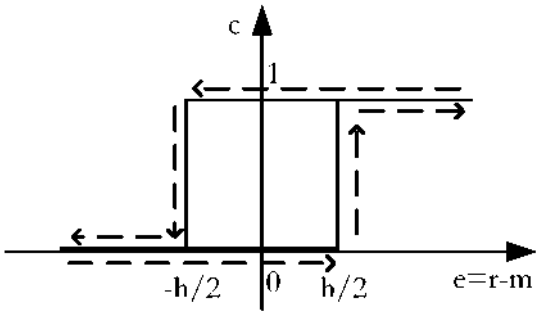

Figura 4.10 Fig. 4.10. Caracteristica statică a regulatorului bipoziţional: r - referinţă, e - eroare (abatere), m - măsură, c - comandă, h - histerezis.

Dacă semnalul de comandă are valoarea 0, iar eroarea creşte şi atinge valoarea h/2, atunci comanda devine 1, iar dacă semnalul de comandă are valoarea 1, iar eroarea scade şi atinge valoarea -h/2, atunci comanda comută la valoarea 0. Histerezisul regulatorului este egal cu h.

Ca şi construcţie regulatorul bipoziţional conţine în structura sa un releu electromagnetic ce prezintă un histerezis inerent şi care determină histerezisul regulatorului.

RAMT - STIUGAL - 2017

În cazul folosirii regulatorului bipozițional, semnalul de măsură (m) și implicit mărimea reglată oscilează în jurul valorii de referință (r) (fig. 4.11), iar amplitudinea oscilațiilor este cel puțin egală cu semi-histerezisul h/2 regulatorului, fiind mai mare la procesele cu inerție mare și la cele cu timp mort. [Cîrtoaje ș.a., 2003]

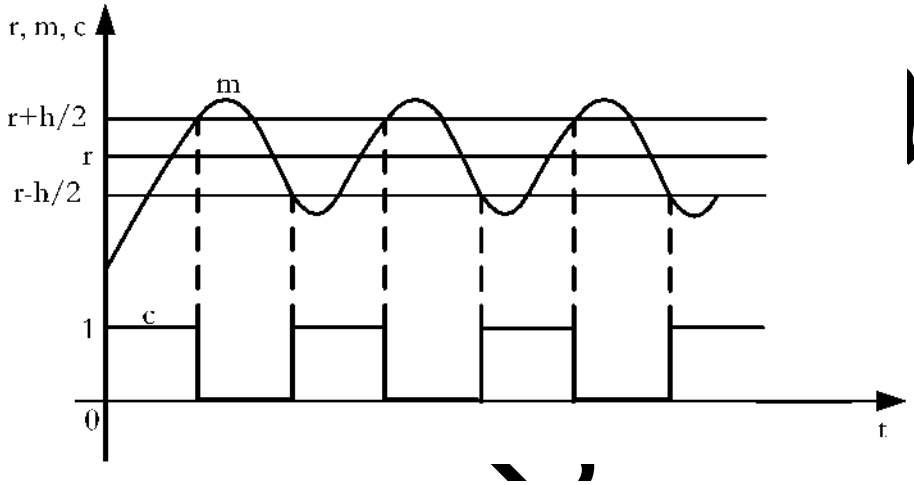

Figura 4.11 Fig.4.11. Evoluția unei variabile reglate (m) folosind un regulator bipozițional: m - măsura, r - referința, c - comanda, h - histerezisul regulatorului.

Dacă histerezisul regulatorului este mic, precizia de reglare este bună, dar frecvența de comutare a comenzii regulatorului de la o valoare la alta este mare. Spre deosebire de reglarea continuă, reglarea bipozițională este mai puțin precisă, dar mai simplă și mai robustă.

4.4 Regulatoare tripoziționale

?

4.5 4.4. Regulatoare logice programabile

Înainte de apariția circuitelor logice cu semiconductor sistemele logice de comandă erau proiectate și realizate exclusiv cu relee electromecanice.

În câteva cazuri un panou de comandă realizat cu astfel de circuite acoperea un perete întreg, iar timpul necesar pentru a putea descoperi o eroare în sistem era destul de mare, mai ales în cazul sistemelor complexe. [Zhang, 2008]

În plus, timpul de utilizare a contactelor unui releu era limitat, deci unele relee trebuiau să fie înlocuite, dispozitivele comandate trebuiau oprite, oprindu-se, ca atare, și producția.

La sfârșitul anilor ‘60, o companie americană pe nume Bedford Associates, a lansat un dispozitiv de calcul denumit MODICON, pentru înlocuirea releelor electromagnetice. Acesta a devenit mai târziu și numele diviziei care se ocupa cu proiectarea, realizarea și vânzarea acestor dispozitive ce au fost îmbunătățite, primind denumirea de PLC (Programmable Logic Controller), sau, în traducere, regulator logic programabil.

Avantajele panoului de comandă care se bazează pe un PLC pot fi prezentate în câteva idei:

- numărul de fire conductoare este redus cu 80% față de o realizare clasică;

RAMT - STIINȚE 2017

- consumul este mult redus deoarece un PLC nu consumă mai mult decât consumă câteva relee;
- există funcții de diagnosticare și detectare automată a erorilor;
- schimbarea unei secvențe de operare este ușor de îndeplinit, prin simpla modificare de program;
- este mult mai ieftin comparativ cu un sistem convențional, mai ales în cazurile în care există un număr mare de componente de intrare/ieșire și când funcțiile de operare sunt complexe.
- fiabilitatea unui PLC este mai mare decât cea a unui releu mecanic sau un releu de timp.

Un PLC reprezintă un computer specializat pe aplicații industriale de reglare, ce implementează funcții logice.

Astfel, în loc de tastatura de la un computer clasic, PLC-ul poate avea o consolă de programare, cu câteva butoane. De asemenea, informațiile sunt afișate pe un ecran LCD, atât cele legate de editarea programului, cât și cele ce țin de funcționarea programului salvat în memoria lui.

Din punct de vedere constructiv un PLC (fig. 4.12) se compune din:

- unitate centrală de prelucrare, de obicei implementată cu ajutorul unui microcontroller;
- interfețe pentru semnale digitale și analogice, care conțin circuite de adaptare pentru semnale industriale;
- memorie de tip Flash ROM pentru stocarea programului;
- modul de alimentare electrică;
- opțional: interfețe de comunicație serială, cum ar fi RS232, RS485 și în rețea, cum ar fi CAN, PROFIBUS etc;
- carcasă de protecție.

Unitatea centrală folosită de un PLC nu este prea avansată, deoarece acesta nu necesită o putere de calcul asemănătoare cu a unui PC.

Unitatea centrală este un microcontroler pe 8 biți sau mai recent pe 16 sau 32 biți. Aceasta controlează comunicațiile, conexiunile dintre celelalte părți ale PLC, executarea programului, operațiile cu memoria și controlul intrărilor și ieșirilor. Unitatea centrală realizează, de asemenea, și operații de verificare ale funcționării corecte a PLC, orice eroare fiind semnalizată.

Memoria unui PLC este de tip Flash ROM, adică informațiile se pot inscripționa electric pe un circuit integrat de tip EEPROM, dar se pot și șterge și apoi reinscripționa.

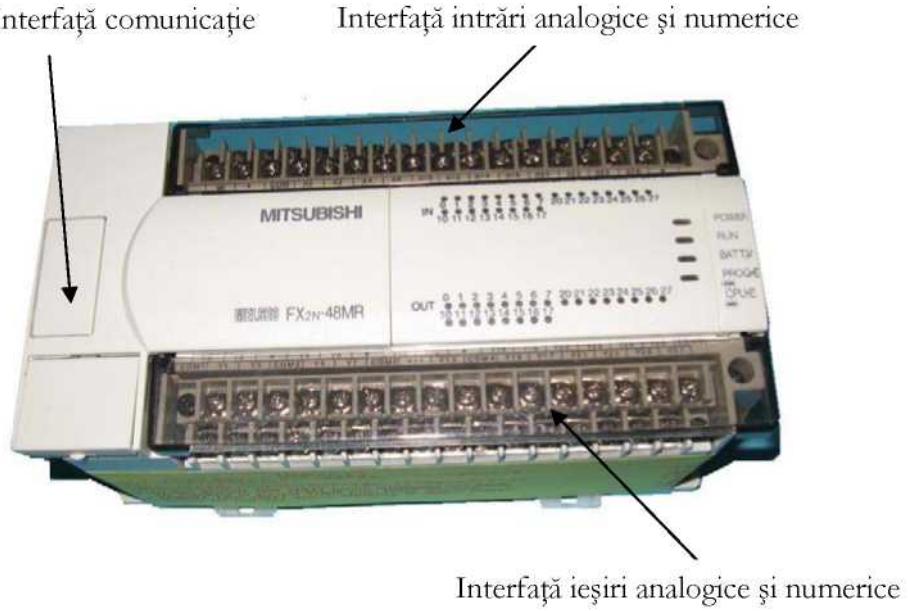

Figura 4.12 Fig. 4.12. Exemplu de PLC.

RAM - STIM - UGAL - 2017

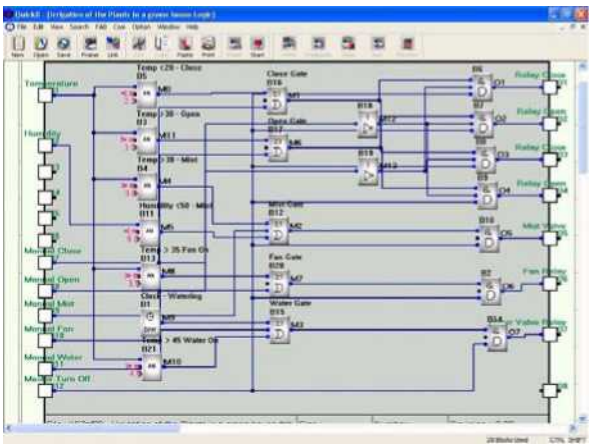

Figura 4.13 Fig. 4.13. Exemplu de program PLC.

Alimentarea cu energie electrică se realizează atât la tensiunea de 24 V c.c., cât și la 220 V c.a.. Unele dintre PLC-uri pot avea sursa de alimentare ca un modul separat, acestea sunt, de obicei, de mari dimensiuni. Cele de dimensiune mică sau medie au sursa incorporată în interiorul PLC.

Utilizatorul trebuie sa determine cât curent folosește de la modulele de intrare/ieșire pentru a se asigura ca acea sursa de alimentare furnizează intensitatea de curent necesară. Diferite tipuri de module utilizează diferite valori pentru curent.

Această sursă de alimentare nu este folosită în mod uzual pentru a alimenta intrările sau ieșirile externe.

Partea hardware de la un PLC este alcătuită din: alimentare, intrări, ieșiri.

Partea software este alcătuită din instrucțiuni ce sunt organizate unele sub altele (Fig. 4.13).

În partea stânga a diagramei sunt trecute date legate de intrările PLC, iar în dreapta sunt date legate de ieșirile PLC. În stânga sunt, de obicei senzorii, iar în dreapta sunt elementele de execuție.

Standardul IEC 61131-3 stabilește 5 limbaje de programare utilizabile pentru programarea dispozitivelor de tip PLC: [John, Tiegelkamp, 2010]

- LD - Lader Diagram - limbaj grafic de tip “schemă cu relee”;
- FBD - Function Block Diagram - limbaj grafic de tip “flux de date” (cu blocuri funcționale interconectate);
- ST - Structured Text - limbaj de nivel înalt asemănător cu C sau Pascal;
- IL - Instruction List - limbaj de nivel scăzut de tip limbaj de asamblare;
- SFC - Sequential Function Chart - limbaj care permite exprimarea secvențelor de pași pentru un automat de stare.

Pentru dezvoltarea de aplicații se pot folosi diferite medii de programare, precum ISAGRAPH sau DX-Developer, care permit: editarea, compilarea, descărcarea pe un PLC țintă și execuția programului (în regim normal și în regim pas-cu-pas).

Pentru încărcarea și execuția programului, dezvoltat pe un PC, în memoria PLC, pentru a putea fi rulat independent de PC, se folosește interfața de comunicație serială sau se folosește o extensie printr-un modul de conversie USB-RS.

RAMT - STIM - UGAL - 2017

4.6 Altele

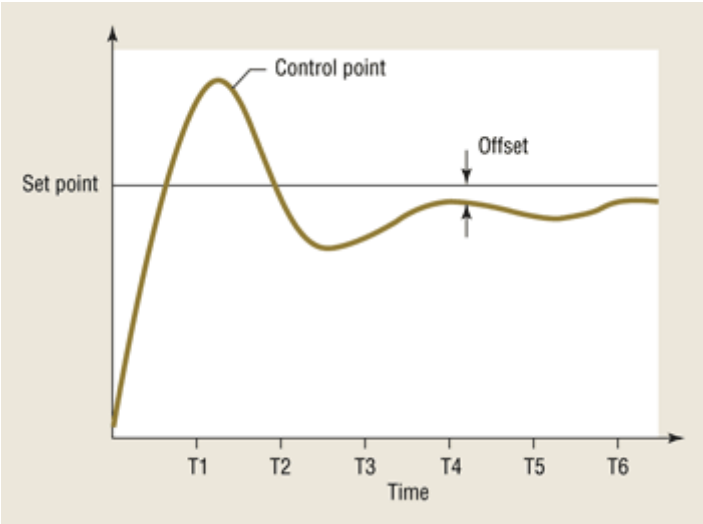

FIGURE 1. Proportional control.

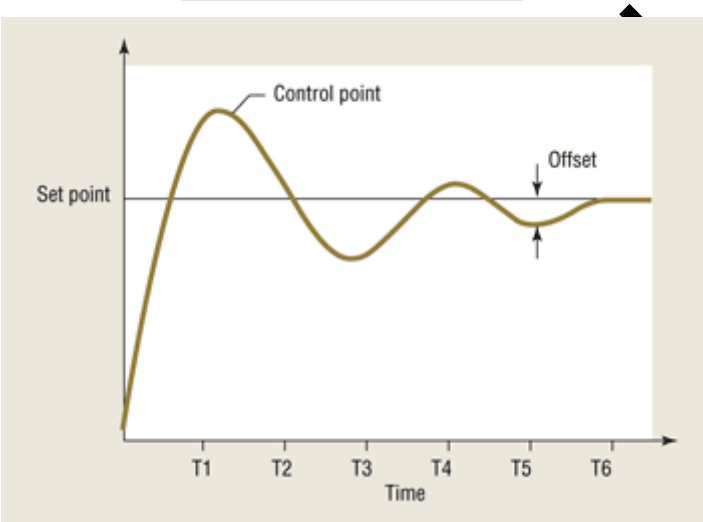

FIGURE 2. Proportional-integral control.

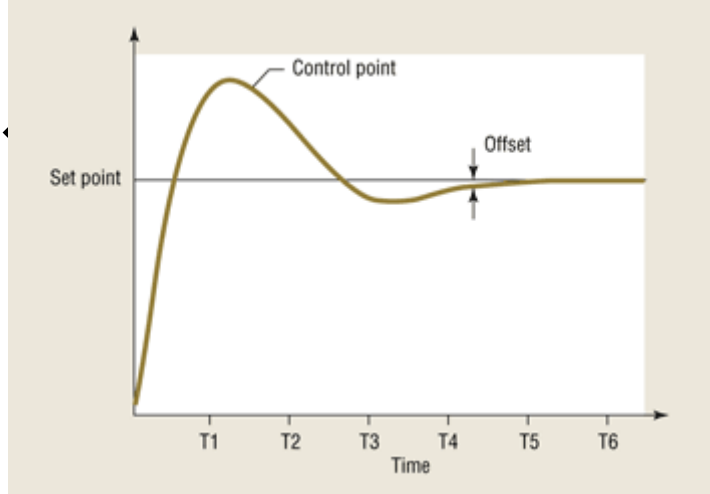

FIGURE 3. Proportional-integral-derivative control.

4.7 Bibliografie

[1] Băieșu, A-S - Tehnica reglării automate, Ed. Matrixrom, Bucuresti, 2012, ISBN: 9789737558152

RAMT - 2017