

4

REGULATOARE, CONVERTOARE, ROBINETE DE REGLARE

4.1. REGULATOARE

Intr-un sistem de reglare după eroare (abatere), regulatorul îndeplinește rolul elementului de *comandă*, de decizie. Regulatorul primește la intrare două semnale: *semnalul de referință* (numit și *setpoint*), care exprimă procentual valoarea dorită a mărimii reglate (de ieșire a procesului) și *semnalul de măsură*, generat de traductorul mărimii reglate sau de ansamblul traductor-adaptor. În urma procesării celor două semnale după un algoritm convenabil, dependent de comportamentul dinamic al procesului reglat, regulatorul elaborează *semnalul de comandă* a elementului de execuție, prin intermediul căruia se intervine asupra procesului reglat pentru a aduce mărimea reglată la o valoare cât mai apropiată de valoarea referinței. La trecerea sistemului de reglare din regimul MANUAL în regimul AUTOMAT, algoritmul de comandă al regulatorului înlocuiește raționamentul, judecata, logica operatorului uman.

În funcție de natura fizică a semnalelor de intrare și de ieșire, regulatorul poate fi: electronic, pneumatic, hidraulic sau mecanic. În funcție de forma semnalelor procesate, regulatoarele pot fi continue (analogice), discrete (numerice), bipoziționale sau tripoziționale. Cele mai performante și mai frecvent utilizate sunt, evident, *regulatoare electronice numerice*.

4.1.1. Regulatoare electronice continue

Regulatoarele electronice continue unificate au semnalele de intrare și de ieșire sub forma unui curent electric în gama 4 ... 20 mA. Regulatorul convențional generează comanda c prin prelucrarea erorii curente $e=r-m$ după algoritmul **PID** (de tip proporțional-integral-derivativ):

$$c = K_p \left(e + \frac{1}{T_i} \int_0^t e dt + T_d \frac{de}{dt} \right) + c_0, \quad (4.1)$$

în care K_p este factorul de proporționalitate, T_i - constanta de timp integrală, T_d - constanta de timp derivativă. Între factorul de proporționalitate K_p și banda de proporționalitate B_p , cu care se operează frecvent în practică, există relația $K_p=100/B_p$. În cazurile particulare $T_d=0$ și $T_i=\infty$, algoritmul de comandă PID devine PI și, respectiv, PD.

În majoritatea cazurilor, panoul frontal al regulatorului conține un comutator A/M pentru stabilirea regimului de lucru (AUTOMAT sau MANUAL), un comutator I/E pentru stabilirea tipului de referință (INTERNĂ sau EXTERNĂ), un buton pentru fixarea valorii semnalului de referință (atunci când referința este INTERNĂ), un buton pentru fixarea valorii semnalului de comandă (atunci când regimul este MANUAL) și trei scale indicatoare pentru semnalele de referință, de eroare și de comandă. La regulatoarele unificate, scalele celor trei semnale ale regulatorului sunt gradate în procente (valorilor de 4, 12 și 20 mA ale curentului unificat le corespund respectiv valorile procentuale 0, 50 și 100 %).

În interiorul carcasei regulatorului se găsesc butoanele pentru modificarea parametrilor de acordare K_p (sau B_p), T_i și T_d , precum și un comutator de sens (DIRECT sau INVERS). Sensul DIRECT corespunde cazului $K_p < 0$, iar sensul INVERS corespunde cazului $K_p > 0$. Din ecuația regulatorului de tip P (proporțional),

$$c = K_p(r - m) + c_0, \quad (4.2)$$

rezultă că atunci când comutatorul de sens se află în starea DIRECT, creșterea semnalului de măsură m determină creșterea semnalului de comandă c .

Regulatoarele electronice cu *amplificatoare operaționale* au, de regulă, câte un amplificator operațional cu reacție negativă pentru fiecare din cele cinci operații ale algoritmului de reglare PID (comparație, însumare, multiplicare, integrare și derivare). Un al șaselea amplificator operațional este utilizat la stabilirea sensului DIRECT/INVERS. Mărimile de intrare și de ieșire ale amplificatoarelor cu reacție sunt semnale sub formă de tensiune. Semnalele de intrare în curent 4 ... 20 mA ale regulatorului sunt transformate în tensiuni 1 ... 5 V cu ajutorul unor rezistențe de 250 Ω , conectate la bornele de intrare ale regulatorului. În plus, regulatorul mai conține un *convertor-amplificator de putere*, care transformă tensiunea de comandă generată de ultimul amplificator operațional în semnal unificat de ieșire 4 ... 20 mA. Pentru ca semnalul unificat de ieșire să fie independent de rezistența totală de sarcină (în condițiile în care aceasta nu depășește o anumită valoare limită impusă de fabricant, de exemplu 750 Ω , adică trei rezistențe standard a câte 250 Ω înseriate), convertorul-amplificator de putere conține un circuit de reacție negativă (puternică) în raport cu curentul de ieșire.

Amplificatoarele operaționale sunt circuite integrate cu următoarele proprietăți principale: a) un factor de amplificare în tensiune foarte mare (cel puțin de ordinul sutelor de mii); b) o rezistență de intrare foarte mare (cel puțin 1 M Ω); c) o tensiune de intrare foarte mică (sub 0,1 mV); d) un curent de intrare extrem de mic, practic neglijabil (sub 0,1nA). Pe baza acestor proprietăți, ecuațiile simplificate ale amplificatoarelor operaționale cu reacție pot fi obținute foarte ușor. În cazul elementului de comparație din figura 4.1-a, ținând seama că $i \cong 0$, avem:

$$i_1 + i - i_r = 0, \quad i_1 - i_r \cong 0, \quad \frac{u_1 - \bar{u}_1}{R_1} - \frac{\bar{u}_1 - u_e}{R} \cong 0, \quad u_e \cong -\frac{R}{R_1} u_1 + \frac{R_1 + R}{R_1} \bar{u}_1$$

și

$$i_2 - i - i_3 = 0, \quad i_2 - i_3 \cong 0, \quad \frac{u_2 - \bar{u}_2}{R_2} - \frac{\bar{u}_2}{R_3} \cong 0, \quad \bar{u}_2 \cong \frac{R_3}{R_2 + R_3} u_2.$$

Din proprietatea c) rezultă $\bar{u}_1 \cong \bar{u}_2$, deci

$$u_e \cong -\frac{R}{R_1} u_1 + \frac{R_1 + R}{R_1} \cdot \frac{R_3}{R_2 + R_3} u_2.$$

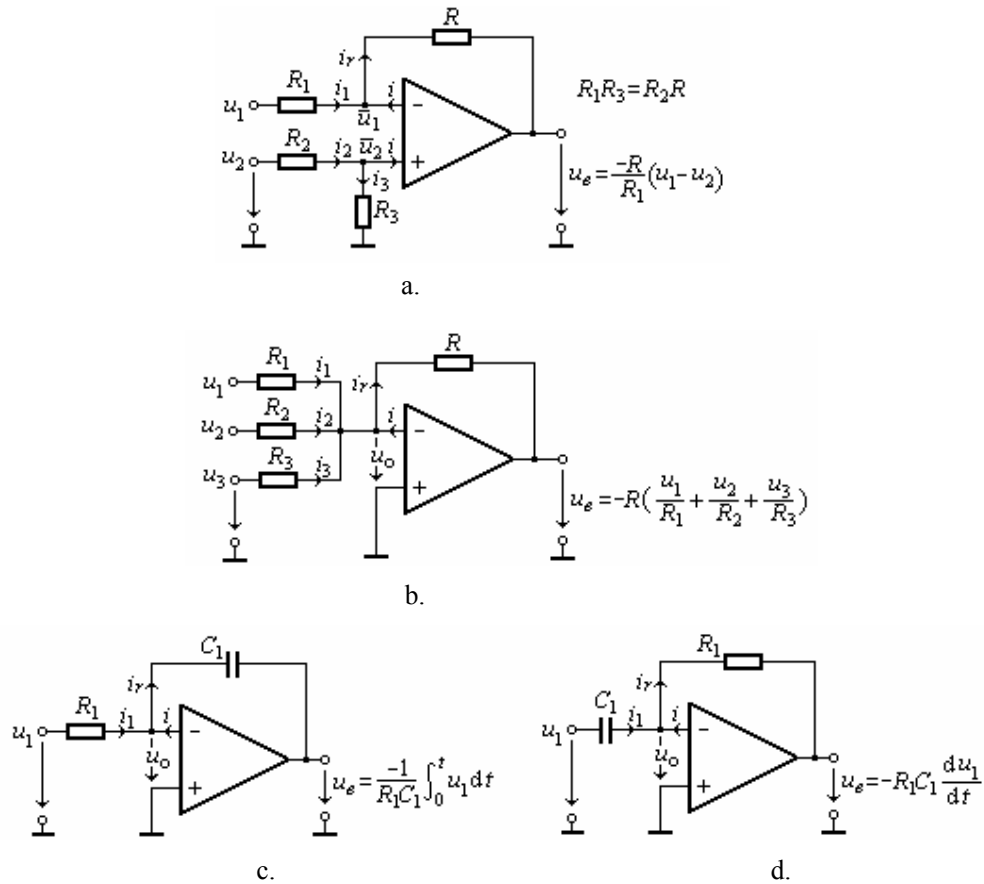


Fig. 4.1. Principalele tipuri de amplificatoare operaționale cu reacție ale regulatorului PID:

a) elementul de comparație; b) elementul sumator; c) elementul integral; d) elementul derivativ

In cazul particular $R_1 R_3 = R_2 R$, avem $\frac{R}{R_1} = \frac{R_1 + R}{R_1} \cdot \frac{R_3}{R_2 + R_3}$, iar ecuația elementului de comparație capătă forma simplificată

$$u_e = -\frac{R}{R_1}(u_1 - u_2). \quad (4.3)$$

In mod similar, pentru elementul sumator din figura 4.1-b, avem

$$i_1 + i_2 + i_3 + i - i_r = 0, \quad i_1 + i_2 + i_3 - i_r \cong 0, \quad \frac{u_1 - u_0}{R_1} + \frac{u_2 - u_0}{R_2} + \frac{u_3 - u_0}{R_3} - \frac{u_0 - u_e}{R} \cong 0,$$

iar din $u_0 \cong 0$, rezultă

$$u_e = -R \left(\frac{u_1}{R_1} + \frac{u_2}{R_2} + \frac{u_3}{R_3} \right). \quad (4.4)$$

Pentru elementul integral din figura 4.1-c, avem

$$i_1 + i - i_r = 0, \quad i_1 - i_r \cong 0, \quad \frac{u_1 - u_0}{R_1} - C_1 \frac{d(u_0 - u_e)}{dt} \cong 0,$$

iar din $u_0 \cong 0$, rezultă

$$u_e = -\frac{1}{R_1 C_1} \int_0^t u_1 dt + u_{e0}. \quad (4.5)$$

Pentru elementul derivativ din figura 4.1-d, avem

$$i_1 + i - i_r = 0, \quad i_1 - i_r \cong 0, \quad C_1 \frac{d(u_1 - u_0)}{dt} - \frac{u_0 - u_e}{R_1} \cong 0,$$

iar din $u_0 \cong 0$, rezultă

$$u_e = -R_1 C_1 \frac{du_1}{dt}. \quad (4.6)$$

Cu mai puțină acuratețe, algoritmul de reglare PID poate fi realizat cu un singur amplificator operațional cu reacție negativă. De exemplu, algoritmul PI poate fi realizat cu schema de principiu din figura 4.2.

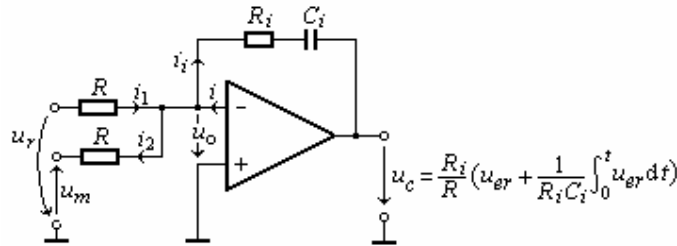


Fig. 4.2. Schema de implementare a algoritmului PI.

Avem

$$i_1 = \frac{u_r - u_0}{R} \cong \frac{u_r}{R}, \quad i_2 = \frac{u_0 - (-u_m)}{R} \cong \frac{u_m}{R},$$

$$i_1 + i - i_2 - i_i = 0, \quad i_i \cong i_1 - i_2 \cong \frac{u_r - u_m}{R}, \quad i_i \cong \frac{u_{er}}{R},$$

unde $u_{er} = u_r - u_m$. Rezultă

$$u_c = u_0 + R_i i_i + \frac{1}{C_i} \int_0^t i_i dt \cong R_i i_i + \frac{1}{C_i} \int_0^t i_i dt,$$

deci

$$u_c \cong \frac{R_i}{R} \left(u_{er} + \frac{1}{R_i C_i} \int_0^t u_{er} dt \right). \quad (4.7)$$

4.1.2. Reglatoare electronice bipoziționale

La reglatoarele bipoziționale, semnalul de comandă ia numai două valori distincte, ce pot fi notate convențional cu 0 și 1. Reglatoarele bipoziționale sunt elemente de comandă neliniare, cu caracteristica statică de tip releu cu histerezis (fig. 4.3).

Dacă semnalul de comandă c are valoarea 0, iar semnalul de eroare e crește și atinge valoarea a , atunci semnalul c comută în valoarea 1. Invers, dacă semnalul de comandă c are valoarea 1, iar semnalul de eroare e scade și atinge valoarea $-a$, atunci semnalul c comută în valoarea 0. Histerezisul regulatorului este egal cu $2a$.

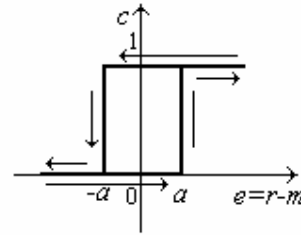


Fig. 4.3. Caracteristica statică a regulatorului bipozițional

Regulatorul bipozițional unificat este un sistem cu structura deschisă. El conține un *amplificator de tensiune AT* cu factorul de amplificare k ajustabil și un *tranzistor de putere T*, având ca sarcină un *releu electromagnetic R* (fig. 4.4). Contactele CL și CH ale releului electromagnetic, unul normal deschis și celălalt normal închis, sunt la dispoziția utilizatorului, pentru a obține valorile adecvate ale semnalului de comandă.

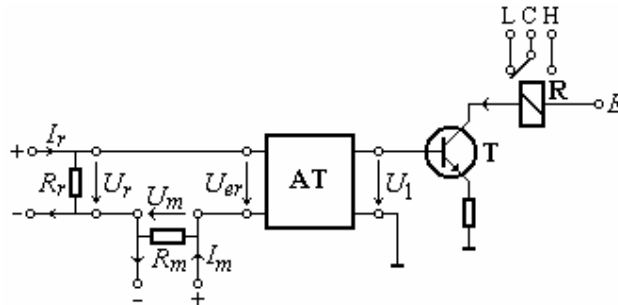


Fig. 4.4. Schema regulatorului electronic bipozițional.

Histerezisul magnetic inerent al releului electromagnetic R determină histerezisul regulatorului. Dacă factorul de amplificare în tensiune al tranzistorului de putere T este egal cu 1, atunci valoarea procentuală a semihisterezisului a al regulatorului este dată de formula

$$a = \frac{h_0}{4k} \cdot 100 \%, \quad (4.8)$$

unde h_0 este valoarea în volți a semihisterezisului releului electromagnetic. Prin mărirea factorului de amplificare k , histerezisul regulatorului bipozițional se reduce.

Reglarea bipozițională este eficientă numai atunci când cele două valori ale comenzii c reușesc să aducă mărimea reglată la valori situate de o parte și de alta a valorii mărimii de referință r (fig. 4.5). Semnalul de măsură m și implicit mărimea reglată *oscilează* în jurul valorii de referință, iar amplitudinea oscilațiilor este cel puțin egală cu semihisterezisul a al regulatorului (fiind mai mare la procesele cu inerție, adică cu ordinul mai mare ca doi, precum și la procesele cu timp mort).

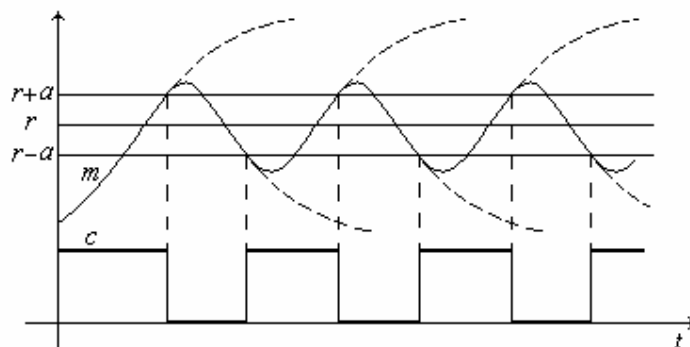


Fig. 4.5. Variația în timp a semnalelor de măsură și de comandă la reglarea bipozițională.

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, lucru inacceptabil în cazul multor procese. În comparație cu reglarea continuă, reglarea bipozițională este mai puțin precisă, dar mai simplă și mai robustă.

4.1.3. Reglatoare pneumatice

Reglatoarele pneumatice continue funcționează cu semnal pneumatic unificat 0,2...1,0 bar și sunt utilizate în special ca aparate de câmp, la reglarea proceselor relativ lente. Ele au o *structură închisă*, similară cu cea a reglatoarelor electronice continue cu un singur amplificator operațional cu

reacție. Sunt formate dintr-un *element de comparație* a presiunilor de referință și de măsură, un *amplificator de presiune*, un *amplificator pneumatic de putere* și un *bloc de reacție* cu rezistențe și capacități pneumatice. Rezistențele pneumatice sunt elemente obturatoare de construcție specială prin care aerul instrumental (uscat și fără impurități) circulă în regim de curgere laminar, iar capacitățile pneumatice sunt camere de înmagazinare a aerului instrumental. Rezistențele pneumatice variabile sunt de regulă tuburi capilare elicoidale cu lungimea variabilă, construite pe principiul ”șurub-piuliță”.

Comparația a două semnale pneumatice se face cu ajutorul a două burdufuri elastice identice, ale căror capete libere sunt unite cu o pârghie metalică. În cazul elementului de comparație a presiunii de referință p_r cu presiunea de măsură p_m din figura 4.6, semnalul de eroare (abatere) este deplasarea δ_{er} :

$$\delta_{er} \cong \frac{\delta_r - \delta_m}{2} = \frac{k_{el}(p_r - p_m)}{2}, \quad (4.9)$$

unde k_{el} reprezintă constanta elastică a burdufurilor de referință B_r și de măsură B_m .

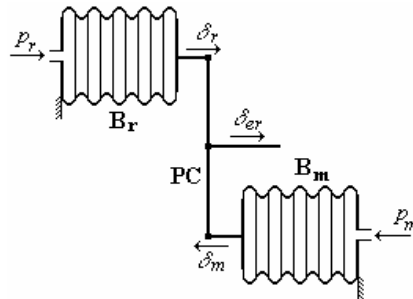


Fig. 4.6. Comparator pneumatic.

În schema de principiu a regulatorului pneumatic din figura 4.7, PC și PC1 sunt pârghii de comparație, C-A este convertor-amplificator de presiune, APB – amplificator de putere cu bilă, BR – bloc de reacție, iar B1 – burduf de reacție locală.

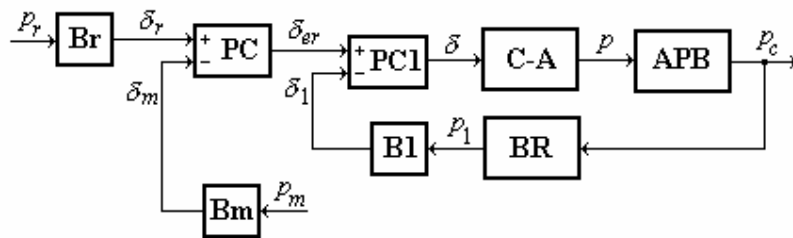


Fig. 4.7. Schema de principiu a regulatorului pneumatic.

Convertorul-amplificator de presiune C-A are ca mărime de intrare deplasarea δ , iar ca mărime de ieșire presiunea p . De regulă, acest convertor-amplificator este de tipul “cu clapetă și duze” (fig. 4.8). Duza D_2 este un tub capilar cu rezistență pneumatică foarte mare, prin care aerul instrumental circulă cu un debit foarte mic, în timp ce duza D_1 are un diametru mult mai mare. În consecință, pentru o reducere de câteva zecimi de milimetru a distanței δ dintre clapeta C și duza D_1 , presiunea p din camera aflată între cele două duze variază de la o extremă la cealaltă (teoretic, de la 0 la 1,4 bar), asigurându-se astfel un factor de proporționalitate de valoare ridicată. Deoarece debitul aerului instrumental de la ieșirea convertorului-amplificator C-A are valoarea mică, puterea semnalului pneumatic de la ieșirea amplificatorului de presiune este redusă. Din acest motiv, presiunea p de la ieșirea amplificatorului de presiune trebuie aplicată la intrarea unui amplificator pneumatic de putere.

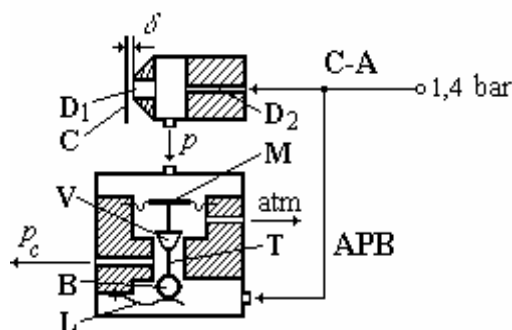


Fig. 4.8. Amplificatoare pneumatice de presiune și putere.

Amplificatorul de putere cu bilă APB din figura 4.8 are ca mărime de ieșire chiar presiunea de comandă p_c de la ieșirea regulatorului. La creșterea presiunii p , ansamblul mobil format din membrana M , tija T , ventilul V , bila B și lamela elastică L coboară proporțional, reducând secțiunea de trecere a aerului de la ieșirea amplificatorului înspre atmosferă (în zona ventilului V) și mărirând secțiunea de trecere a aerului de la rețeaua de 1,4 bar înspre ieșirea amplificatorului (în zona bilei B). În consecință, presiunea p_c de la ieșirea amplificatorului va crește. În mod similar, la scăderea presiunii de intrare p , presiunea de ieșire p_c se reduce.

Deoarece secțiunea de trecere din dreptul bilei permite circulația unui debit de aer relativ mare, semnalul pneumatic generat de APB are o putere suficient de mare pentru a comanda într-un timp convenabil, de ordinul secundelor, un servomotor pneumatic cu membrană situat la o distanță de câțiva metri. Dacă însă distanța până la servomotor este mare (cca. 100 metri), atunci timpul de

aționare a servomotorului este de ordinul zecilor de secunde. În lipsa amplificatorului de putere, acest timp devine extrem de mare, sau chiar infinit (în cazul în care sistemul nu este perfect etanș).

Blocul de reacție BR are ca mărime de intrare presiunea de comandă p_c de la ieșirea regulatorului, iar ca mărime de ieșire presiunea p_1 (v. fig. 4.7). La regulatoarele PID, acest bloc este format din elemente pneumatice pasive (fără alimentare proprie cu energie), mai exact din două rezistențe pneumatice variabile, două capacități pneumatice fixe și un bloc sumator (fig. 4.9).

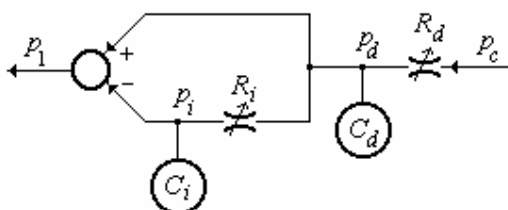


Fig. 4.9. Structura blocului de reacție al regulatorului pneumatic de tip PID.

Constanta de timp derivativă T_d este egală cu produsul dintre rezistența pneumatică R_d și capacitatea pneumatică C_d , iar constanta de timp integrală T_i este egală cu produsul dintre rezistența pneumatică R_i și capacitatea pneumatică C_i . Factorul de proporționalitate al regulatorului se poate modifica prin ajustarea convenabilă a lungimilor pârghiei de comparație PC1 (fig. 4.7), iar constantele de timp integrală și derivativă se pot modifica cu rezistențele pneumatice variabile R_i și respectiv R_d .

4.1.4. Reglatoare numerice

Reglatoarele numerice conțin un *convertor analog-numeric* pentru conversia semnalului de măsură și a semnalului de referință externă tip curent 4...20 mA în semnale numerice, o *magistrală pentru transmisia datelor* numerice, un *microprocesor* specializat pentru prelucrarea datelor numerice, o unitate de *memorie*, un *convertor numeric-analogic* pentru conversia semnalului numeric rezultat din calcul în tensiune continuă, un *convertor-amplificator de putere* pentru transformarea tensiunii continue în semnal de ieșire 4...20 mA, o *interfață serială* de comunicație și conectare la calculator etc.

Panoul frontal al unui regulator numeric conține display-uri pentru afișarea valorilor curente ale mărimilor de intrare și de ieșire ale regulatorului și un set de taste pentru programarea stării regulatorului (automat/manual, cu referință locală/externă), a valorii parametrilor de acordare, a domeniului mărimii

reglate, a gamei de variație a semnalului de măsură, a caracteristicilor comunicației seriale ș.a. Unele regulatoare mai complexe sunt prevăzute și cu un ecran pentru reprezentarea grafică a variației în timp a variabilelor de intrare și de ieșire ale regulatorului.

Perioada de eșantionare a reguletoarelor uzuale (cuprinsă între momentele în care se efectuează, practic instantaneu, achiziția valorii semnalelor de măsură și de referință, procesarea informației și modificarea semnalului de ieșire) este de circa 0,5 secunde, deci suficient de mică pentru ca regulatorul să poată fi utilizat și la reglarea proceselor rapide (cu timp de răspuns de ordinul secundelor).

În cazul *reguletoarelor numerice*, algoritmul de comandă **PI** are forma intrare-stare-ieșire

$$\begin{cases} I_k = I_{k-1} + \frac{T}{T_i} e_k \\ c_k = K_p (e_k + I_k) + c_0 \end{cases} \quad (4.10)$$

și forma intrare-ieșire

$$c_k = c_{k-1} + K_p [(e_k - e_{k-1}) + \frac{T}{T_i} e_k], \quad (4.11)$$

unde T reprezintă perioada de eșantionare, e_k este eroarea curentă, iar c_0 este valoarea comenzii în momentul dinaintea comutării regulatorului din regim MANUAL în regim AUTOMAT.

Algoritmul numeric **PID** poate fi scris sub forma

$$\begin{cases} D_k = p_d D_{k-1} + K_p \frac{T_d}{\tau_d} (e_k - e_{k-1}) \\ (PI)_k = (PI)_{k-1} + K_p [(e_k - e_{k-1}) + \frac{T}{T_i} e_k] \\ c_k = (PI)_k + D_k + c_0 \end{cases} \quad (4.12)$$

unde $p_d = e^{-T/\tau_d}$.

Operația de schimbare a regimului de lucru din MANUAL în AUTOMAT trebuie să se realizeze fără a produce o variație bruscă a semnalului de comandă. În acest scop este recomandat ca operația de comutare să fie precedată de operația de inițializare a variabilelor și să fie efectuată în regim staționar, cu eroare zero. Ultima condiție se poate realiza rapid prin aducerea referinței la valoarea măsurii. În cazul algoritmului de reglare (4.12), operația de inițializare constă în:

- inițializarea variabilelor e_{k-1} , D_{k-1} și $(PI)_{k-1}$ cu valoarea zero;
- inițializarea variabilei c_0 cu valoarea curentă a comenzii.

În aceste condiții, prima valoare a comenzii generate în regim AUTOMAT, la momentul $k=1$, va avea valoarea

$$c_1 = K_p \left(1 + \frac{T}{T_i} + \frac{T_d}{\tau_d} \right) e_1 + c_0 \cong c_0.$$

Datorită preciziei ridicate de implementare a algoritmului de reglare și posibilității de conectare la calculator, regulatoarele numerice sunt din ce în ce mai frecvent utilizate în domeniul automatizărilor industriale.

4.2. CONVERTOARE ELECTRO-PNEUMATICE

Convertorul electro-pneumatic este utilizat ca element de interfață între un regulator electronic unificat și un element de execuție cu servomotor pneumatic de acționare. Ele convertesc semnalul electronic unificat $I_c = 4 \dots 20$ mA generat de regulator în semnal pneumatic unificat $p_c = 0,2 \dots 1,0$ bar.

Convertorul electro-pneumatic este un sistem cu *structură închisă*, care funcționează pe *principiul compensării forțelor* și are o *amplificare în buclă deschisă de valoare ridicată* (de ordinul zecilor). El este format dintr-un circuit electromagnetic CM în interiorul căruia se află armătura din material feromagnetic (permalloy) AF, clapeta C, convertorul-amplificator de presiune C-A, amplificatorul pneumatic de putere cu bilă APB, burduful de reacție Br și șurubul de zero Sz (fig. 4.10).

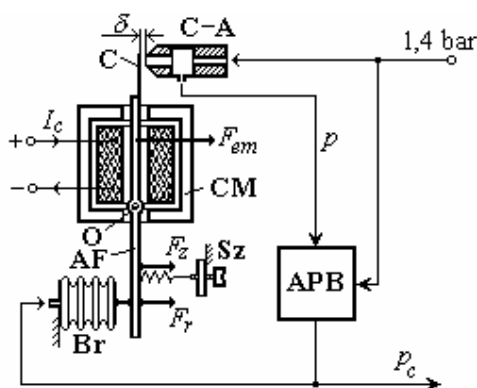


Fig. 4.10. Convertor electro-pneumatic.

La creșterea curentului de intrare I_c din înfășurarea circuitului electromagnetic, forța electromagnetică F_{em} care acționează asupra armăturii feromagnetice AF crește, rotind ușor armătura A împreună cu clapeta C în sens orar, în jurul articulației O. Distanța δ dintre clapeta C și duza alăturată a convertorului-amplificator de presiune C-A se reduce, presiunea p de la ieșirea acestuia crește și, de asemenea, presiunea de comandă p_c de la ieșirea

convectorului electro-pneumatic crește. Creșterea presiunii p_c determină, prin intermediul burdufului de reacție BR, creșterea forței de reacție F_r , care tinde să rotească armătura A în sens antiorar, pentru a o readuce practic în poziția inițială.

Prin intermediul resortului și șurubului de zero Sz, operatorul poate ajusta convenabil *punctul de zero* al convectorului, astfel încât unui curent de intrare de 12 mA să-i corespundă o presiune de ieșire de 0,6 bar. În plus, resortul de zero are și rolul de-a amortiza eventualele oscilații care pot apărea în funcționarea convectorului.

4.3. ROBINETE DE REGLARE

Robinetul de reglare servește la *modificarea debitului de fluid* care circulă printr-o conductă, prin modificarea secțiunii de trecere a fluidului. El este format dintr-un *dispozitiv de acționare* (servomotor) și un *element obturator* (organ de execuție). În varianta cu servomotor pneumatic cu membrană și cu obturator tip ventil, robinetul de reglare este elementul de execuție cel mai frecvent întâlnit în practica sistemelor de reglare. În anumite cazuri speciale, servomotorul este electric sau hidraulic, iar elementul obturator este clapetă, sertar, supapă, bilă, membrană etc. După cum sistemul de obturare este închis sau deschis în lipsa semnalului de comandă, robinetul de reglare este *normal închis* respectiv *normal deschis*. Pentru evitarea blocării ventilului în scaun, robinetul de reglare nu asigură închiderea completă a secțiunii de trecere. În cazul în care căderea de presiune pe robinet este mare, pentru compensarea forțelor care acționează asupra obturatorului mobil se poate utiliza varianta de robinet cu *două scaune*.

Ansamblul mobil al robinetului de reglare este format din *membrana M*, rigidizată pe ambele părți cu discuri metalice, *resortul R*, *tija T* și *ventilul V* (fig. 4.11). Resortul elastic are rolul de-a asigura proporționalitatea între deplasarea (cursa) h a tijei servomotorului și presiunea de comandă p_c . Ansamblul mobil se află în echilibru sub acțiunea următoarelor forțe: forța generată de acțiunea presiunii de comandă asupra membranei, forța elastică a resortului, forțele de frecare cu garnitura de etanșare, greutatea proprie și forțele create de presiunea fluidului de lucru pe ambele părți ale ventilului obturator.

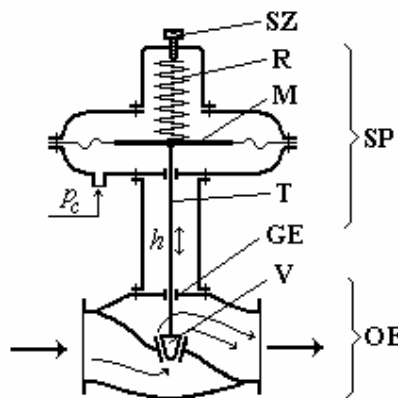


Fig. 4.11. Robinet de reglare

4.3.1. Servomotoare pneumatice

Datorită contactului direct între capătul inferior al tije servomotorului pneumatic și fluidul din conductă, o problemă importantă în construcția robinetului de reglare este aceea a *etanșării*. Tipul garniturii de etanșare (din teflon, azbest) și gradul de strângere al acesteia depind de natura, presiunea și temperatura fluidului de lucru. Datorită forțelor de frecare a tije de garnitura de etanșare, caracteristica statică a servomotorului pneumatic este neliniară, cu *histerezis* (fig. 4.12). Histerezisul se manifestă la *schimbarea sensului de variație a presiunii de comandă* a servomotorului, când forțele de frecare care acționează asupra tije servomotorului își schimbă sensul. Pentru restabilirea echilibrului la limită al ansamblului mobil, presiunea de comandă trebuie să sufere o variație care să modifice forța de acțiune asupra membranei cu o valoare egală cu dublul forței de frecare. Această insensibilitate care apare la fiecare schimbare de sens a presiunii de comandă influențează negativ calitatea reglării, cu atât mai mult cu cât histerezisul este mai mare. Pentru un histerezis al servomotorului mai mare de 3 % este necesar să se aplice măsuri speciale de reducere sau chiar de eliminare a efectului acestuia.

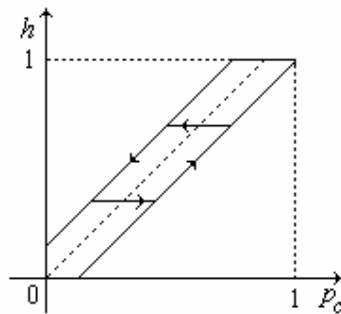


Fig. 4.12. Caracteristica SP.

Cea mai eficientă cale de reducere a efectului de histerezis constă în includerea servomotorului pneumatic într-o buclă cu reacție negativă și amplificare mare pe calea directă. Acest tip de structură închisă, întâlnit aproape la toate elementele din componența unui sistem de reglare automată (la adaptoarele de semnal unificat, la aparatele de vizualizare tip

potențiomtru sau punte automată, la regulatoarele continue și la convertoarele electro-pneumatice), se caracterizează prin următoarea proprietate: dacă factorul de amplificare în buclă deschisă este suficient de mare (cel puțin de ordinul zecilor), atunci *factorul de proporționalitate al buclei închise este practic egal cu inversul factorului de proporționalitate al elementului de pe calea de reacție negativă*, nefiind deci influențat de elementele de pe calea directă a buclei. În cazul servomotorului pneumatic cu reacție negativă din figura 4.13 (în care Br este blocul de reacție, A - amplificatorul de presiune, iar AP – amplificatorul de putere), corelația între mărimea de intrare p_c a buclei și cursa h a servomotorului pneumatic SP este practic independentă de

servomotor (acesta fiind conectat pe calea directă), nefiind deci afectată de histerezisul servomotorului:

$$\Delta h \cong \frac{1}{K_{Br}} \cdot \Delta p_c. \quad (4.13)$$

Servomotorul pneumatic cu reacție negativă este un sistem de reglare automată, la care presiunea p_c este mărime de referință, iar cursa h a servomotorului pneumatic este mărimea reglată. În practică, dispozitivul de reglare al servomotorului este cunoscut sub numele de *poziționar*.

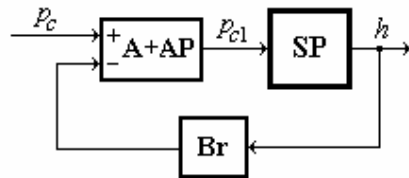


Fig. 4.13. Schema bloc a servomotorului pneumatic cu poziționar.

În cazul *reguletoarelor electronice cu semnal de comandă unificat* $I_c = 4 \dots 20$ mA, bucla de reacție include atât servomotorul pneumatic, cât și convertorul electro-pneumatic. În această configurație, convertorul electro-pneumatic este montat direct pe servomotor și cunoscut sub denumirea de *convertor cu poziționar*. De remarcat faptul că în structura convertorului electro-pneumatic cu poziționar nu mai apare legătura de reacție locală (realizată prin intermediul burdufului de reacție BR - v. fig. 4.9), ceea ce are ca efect creșterea de câteva zeci de ori a factorului de proporționalitate al convertorului. În schema bloc a sistemului convertor-servomotor cu poziționar (fig. 4.14), blocul de reacție Br transmite poziția h a tije servomotorului pneumatic SP la convertorul electro-pneumatic aflat în imediata apropiere, sub forma deplasării de reacție h_r . Resortul de reacție Rr, fixat de armătura feromagnetică AF în locul burdufului de reacție, transformă deplasarea h_r în forța elastică de reacție F_r .

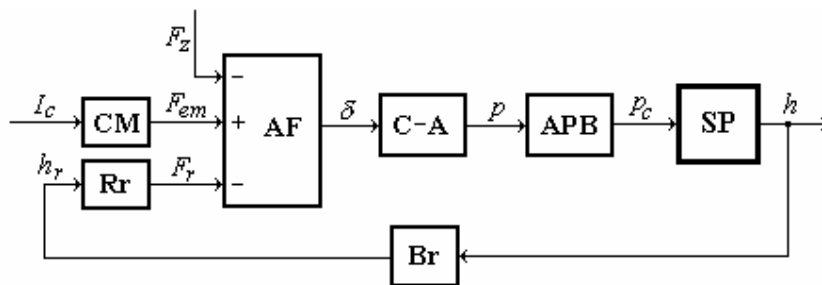


Fig. 4.14. Schema bloc a sistemului convertor-servomotor cu poziționar.

4.3.2. Organe de execuție

Prin definiție, *debitul specific* al organului de execuție reprezintă debitul de apă cu densitatea $\rho_0 = 1 \text{ kg/dm}^3$ care trecând prin robinet produce o cădere de presiune $\Delta P_{r0} = 1 \text{ bar}$. Debitul specific depinde în principal de aria medie a secțiunii de trecere, dar depinde și de forma acestei secțiuni (care influențează forma liniilor de curent, frecarea internă și frecarea de pereți a fluidului).

Dependența $K_v(h)$ dintre debitul specific K_v și cursa h a robinetului de reglare se numește *caracteristică intrinsecă*. Robinetele de reglare se

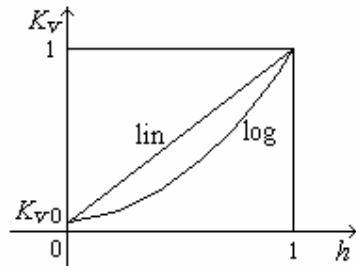


Fig. 4.15. Caracteristici intrinseci

construiesc de regulă cu caracteristică intrinsecă *liniară* sau *logaritmică* (fig. 4.15). Forma caracteristicii intrinseci este dată de profilul mecanic al obturatorului. Debitul specific de scăpări K_{v0} este aproximativ 3 % din debitul specific maxim.

Dependența $Q_v(h)$ dintre debitul volumic Q_v care circulă prin robinet și cursa h a robinetului de reglare, în condițiile în care robinetul se află montat într-un sistem hidraulic dat se numește *caracteristică de lucru*. *Alegerea tipului de caracteristică intrinsecă (liniară sau logaritmică) se face astfel încât caracteristica de lucru să fie cât mai liniară*. Forma caracteristicii de lucru este dependentă de forma caracteristicii intrinseci a robinetului de reglare și de caracteristicile sistemului hidraulic în care acesta este montat. Debitul volumic de lichid care circulă prin robinet este dat de relația:

$$Q_v = \alpha S \sqrt{\frac{2\Delta P_r}{\rho}},$$

unde ΔP_r este căderea de presiune pe robinet, α - coeficientul de debit, S - aria medie a secțiunii de trecere, iar ρ - densitatea lichidului. Pentru debitul specific se obține relația

$$K_v = \alpha S \sqrt{\frac{2\Delta P_{r0}}{\rho_0}},$$

iar din cele două relații, rezultă

$$Q_v = K_v \sqrt{\frac{\Delta P_r}{\Delta P_{r0}} \cdot \frac{\rho_0}{\rho}}. \quad (4.14)$$

Dacă densitatea ρ se exprimă în kg/dm^3 , iar căderea de presiune ΔP_r în *bari*, atunci relația de corelație între caracteristica de lucru și caracteristica intrinsecă capătă forma simplificată

$$Q_v(h) = K_v(h) \sqrt{\frac{\Delta P_r(h)}{\rho}} . \quad (4.15)$$

În cazul unui robinet de reglare normal închis (pentru $h=0$), caracteristica $\Delta P_r(h)$ este de regulă descrescătoare (căderea de presiune pe robinet scade pe măsură ce robinetul se deschide). În consecință, caracteristica de lucru $Q_v(h)$ are forma mai concavă decât cea a caracteristicii intrinseci $K_v(h)$. Gradul de deformare a caracteristicii de lucru față de caracteristica intrinsecă este cu atât mai mare cu cât sistemul hidraulic în care se află montat robinetul este mai încărcat. În consecință, pentru a se obține o *caracteristică de lucru cât mai liniară*, în cazul unui sistem hidraulic slab încărcat se va alege un robinet cu caracteristica intrinsecă liniară, iar în cazul unui sistem hidraulic puternic încărcat se va alege un robinet cu caracteristica intrinsecă logaritmică. În ultimul caz, caracteristica de lucru este mult mai concavă decât caracteristica intrinsecă logaritmică (convexă), având deci o formă cvasiliniară. Un sistem puternic încărcat are lungimea mare și conține multe rezistențe hidraulice (robinete de izolare, reducții, coturi etc.). Coeficientul de încărcare al unui sistem hidraulic în raport cu un robinet de reglare dat este raportul dintre căderea de presiune pe robinet și căderea de presiune pe întregul sistem, în condițiile în care robinetul de reglare este complet deschis (100 %):

$$\mu = \frac{\Delta P_{r100}}{\Delta P_{s100}} . \quad (4.16)$$

Sistemul hidraulic este considerat puternic încărcat pentru valori ale lui μ mai mici decât 0,2 și slab încărcat pentru valori cuprinse între 0,2 și 1.

Din punct de vedere *dimensional*, robinetul de reglare trebuie ales astfel încât, atunci când este complet deschis, să permită trecerea unui debit de fluid ceva mai mare decât debitul maxim necesar din considerente de ordin tehnologic. Principalul indicator dimensional al robinetului de reglare este debitul specific superior K_{vS} , egal cu debitul specific maxim corespunzător robinetului complet deschis. În cataloagele firmelor constructoare pot fi găsite valorile standardizate ale lui K_{vS} pentru întreaga gamă de robinete de reglare produse. Alegerea unui robinet de reglare subdimensionat (cu K_{vS} prea mic) nu permite obținerea debitului maxim necesar atunci când robinetul este complet deschis. Pe de altă parte, un robinet de reglare supradimensionat (cu K_{vS} prea mare) este scump (datorită gabariturii mare al organului de execuție

și al servomotorului), nu permite modificarea fină a debitului și are punctul nominal de funcționare situat într-o zonă neliniară a caracteristicii de lucru (în apropierea stării complet închise a robinetului).

În funcționarea robinetelor de reglare trebuie evitate regimurile de *curgere critică* și de *cavitație*, care produc deteriorarea rapidă a dispozitivului obturator. Regimul critic apare la curgerea gazelor sau vaporilor, atunci când presiunea absolută P_2 din avalul robinetului de reglare scade sub jumătatea presiunii din amonte P_1 . Regimul de cavitație apare la curgerea lichidelor, atunci când presiunea în zona de obturare (în care presiunea scade la o valoare mai mică decât presiunea din aval P_2) coboară sub presiunea de vapori a lichidului respectiv, ceea ce are ca efect vaporizarea unei părți a lichidului. După depășirea zonei de presiune minimă are loc fenomenul invers, de condensare (implozie) a bulelor de vapori. Regimul de cavitație produce erodarea rapidă a ventilului și scaunului robinetului de reglare. Modificarea regimului de curgere se poate face prin montarea în serie sau în paralel cu robinetul de reglare a unor robinete manuale deschise parțial, într-un grad convenabil.