

Algoritmii de reglare automată PID

Prof. dr. ing. Sorin LARIONESCU - UTCB

Echipamentele moderne de conducere automată oferă posibilitatea folosirii unei game foarte largi de algoritmi. Unul dintre algoritmii cei mai frecvent folosiți este algoritmul proporțional integral derivativ PID, din care s-au identificat peste 297 de variante utilizate în reglatoarele comerciale. De exemplu, companiile National Instruments, ABB , Bailey, Fisher, Foxboro, Honeywell, Moore Products, Yokogawa și altele, comercializează reglatoare pentru care denumirea algoritmului, terminologia întrebuițată pentru descrierea lui și a unităților de măsură este diferită.

Schema bloc a unui sistem de reglare automată clasic este prezentată în Fig. 1. Cele trei intrări ale sistemului automat sunt referința R, perturbația P și zgomotul N de la ieșirea traductorului. Regulatorul este format dintr-un comparator și compensatorul K. Blocul G de pe calea directă modelează elementul de execuție și procesul automatizat. Traductorul este reprezentat de blocul H. Funcția de transfer a unui compensator K de tip PID are următoarea formă generală:

$$K(s) = \frac{U(s)}{E(s)} = K_c \left(1 + \frac{1}{T_i s} + T_d s + q \frac{T_d}{T_i} \right)$$

în care $K_c = (100\%) / BP$ este constanta de proporționalitate a compensatorului , iar BP este banda de proporționalitate măsurată în procente,

T_i : constanta de timp integral sau timpul de repetare [s / repetare],

T_d : constanta de timp derivativ [s],

q: factor influență.

Algoritmul PID cu factor de influență zero $q=0$, numit *ideal*, este cel preferat de teoreticieni și prezentat cu precădere în toate manualele și monografiile consacrate sistemelor automate

$$\begin{aligned} \text{PID ideal:} \quad & K(s) = K_c \left(1 + \frac{1}{T_i s} + T_d s \right) \\ \text{PID paralel:} \quad & K(s) = K_p + \frac{K_i}{s} + K_d s \\ \text{PID serie:} \quad & K(s) = K_c \left(1 + \frac{1}{T_i s} \right) (T_d s + 1) \end{aligned}$$

Forma algoritmului, numită algoritmul *PID paralel*, este preferată de unele firme și de unele manuale universitare. În acest caz se pune clar în evidență acțiunea proporțională (amplificarea) K_p , acțiunea integrală (restabilirea automată) K_i/s și acțiunea derivativă $K_d s$.

Algoritmul *PID serie (interactiv)* corespunde valorii $q=1$ a factorului de influență și se obține după câteva transformări simple din relația generală.

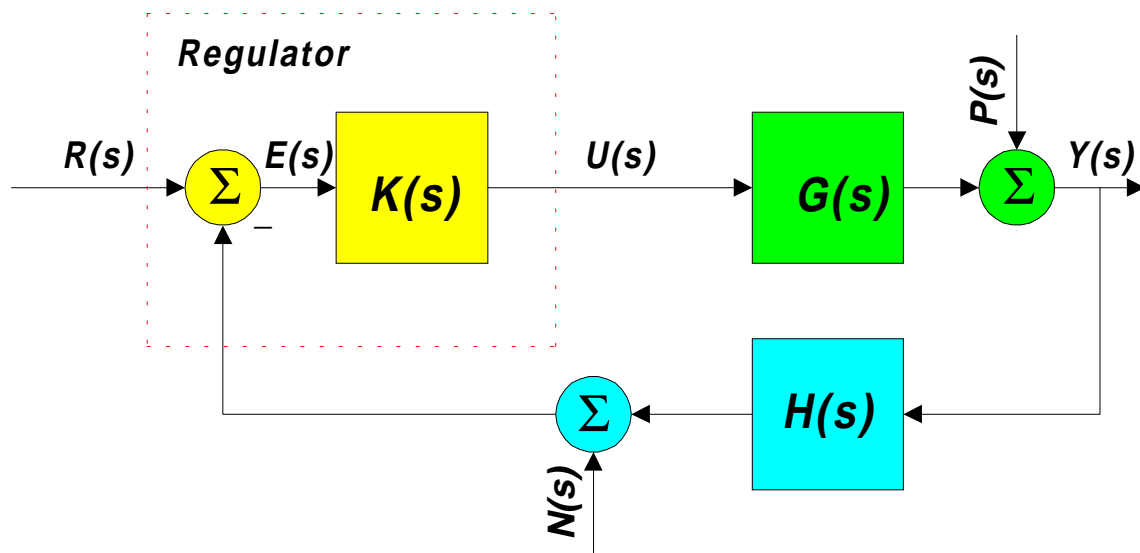


Fig. 1

Toate cele trei forme ale algoritmului PID sunt folosite în prezent de către producătorii de reglatoare automate. De exemplu, AEG Modicon și Texas Instruments folosesc tipul ideal, Foxboro și Fisher au adoptat algoritmul serie, Honeywel are reglatoare PID atât serie cât și ideale iar Bailey și Allen Bradley au reglatoare cu algoritmi tip PID ideal și paralel.

Dacă nu ne interesează firma producătoare și analizăm reglatoarele automate din alte puncte de vedere, se poate constata că aproape toate reglatoarele analogice electronice și pneumatice sunt de tip serie. Reglatoarele numerice sunt în cea mai mare parte de tip PID ideal. Un număr mai mic de reglatoare numerice sunt de tip serie pentru a fi echivalente cu reglatoarele analogice.

Compensatoarele PID se transformă ușor în compensatoare P dacă $T_d=0$ și $T_i=\infty$, în compensatoare PI dacă $T_d=0$, sau compensatoare PD dacă $T_i=\infty$. Compensatoarele tip PID ideal diferă de cele serie numai în cazul în care toate cele trei acțiuni P, I și D sunt prezente.

Răspunsul compensatorului PI la o eroare treaptă unitară este $u=K_c(1+t/T_i)$. Atunci când $t=T_i$ efectul proporțional al algoritmului se *repetă* (dublează). Din această cauză T_i se măsoară în secunde / repetare. O eroare rampă provoacă răspunsul $u=K_c(t+T_d)$ al

compensatorului PD. Dacă $t=T_d$ efectul proporțional al algoritmului se dublează și în felul acesta poate fi determinată constanta de timp derivativ.

Compensatorul PID analogic.

În documentația tehnică sau în manuale algoritmul PID este prezentat, de obicei, într-una din formele ideală, paralelă sau serie. Algoritmul real, folosit de regulator la conducerea procesului, este însă diferit deoarece termenul $T_d s$, corespunzător acțiunii derivate, care apare în funcția de transfer a compensatorului PID nu este realizabil fizic. Regulatele comerciale analogice folosesc, din acest motiv, aproximarea:

$$T_d s \cong \frac{T_d s}{\alpha T_d s + 1}$$

în care α este o caracteristică constructivă a compensatorului, care nu poate fi modificată de către utilizator, cu o valoare fixată undeva între $1/6$ și $1/20$.

Cu această aproximație algoritmi PID pentru compensatoarele analogice sunt prezentați adeseori sub această formă:

$$\begin{aligned} \text{PID ideal analogic : } K(s) &= K_c \left(1 + \frac{1}{T_i s} + \frac{T_d s}{\alpha T_d s + 1} \right) \\ \text{PID serie analogic : } K(s) &= K_c \left(1 + \frac{1}{T_i s} \right) \left(\frac{T_d s + 1}{\alpha T_d s + 1} \right) \end{aligned}$$

Compensatorul PID numeric.

La implementarea numerică a compensatorului PID este foarte frecventă aproximarea acțiunilor integrale și derivate a algoritmului PID prin metoda diferenței inverse sau metoda Euler.

$$\text{Diferența inversă : } s \cong \frac{1 - z^{-1}}{T_e}$$

$$\text{Euler : } s \cong \frac{1 - z^{-1}}{T_e z^{-1}}$$

În aceste relații T_e este perioada de eșantionare a semnalului care intră în compensator și este un parametru care trebuie stabilit de către utilizator alături de constantele K_c , T_i și T_d .

Aceste aproximări pot fi aplicate la oricare din formele algoritmului PID. Cea mai frecventă variantă constă în folosirea metodei diferenței inverse la aproximarea acțiunii derivate și a metodei Euler la aproximarea acțiunii integrale pentru algoritmul PID ideal. Se obține algoritmul PID numeric de poziție. Dacă compensatorul comandă, la fiecare perioadă de eșantionare, numai *schimbarea* necesară față de poziția precedentă se obține algoritmul PID numeric incremental.

$$\begin{aligned}
 \text{PID de pozitie :} \quad & K(z) = \left[1 + \frac{T_e}{T_i} \frac{z^{-1}}{(1-z^{-1})} + \frac{T_d}{T_e} (1-z^{-1}) \right] \\
 \text{PID incremental :} \quad & K_{\Delta}(z) = (1-z^{-1})K(z)
 \end{aligned}$$

Compensatorul PID incremental este compatibil cu elemente de execuție de tip integral, cum ar fi servomotoarele electrice. Acest compensator prezintă avantajul că în caz de avarie elementul de execuție își păstrează ultima poziție. De asemenea trecerea din regim de comandă manuală în regim de comandă automată se face fără șoc.

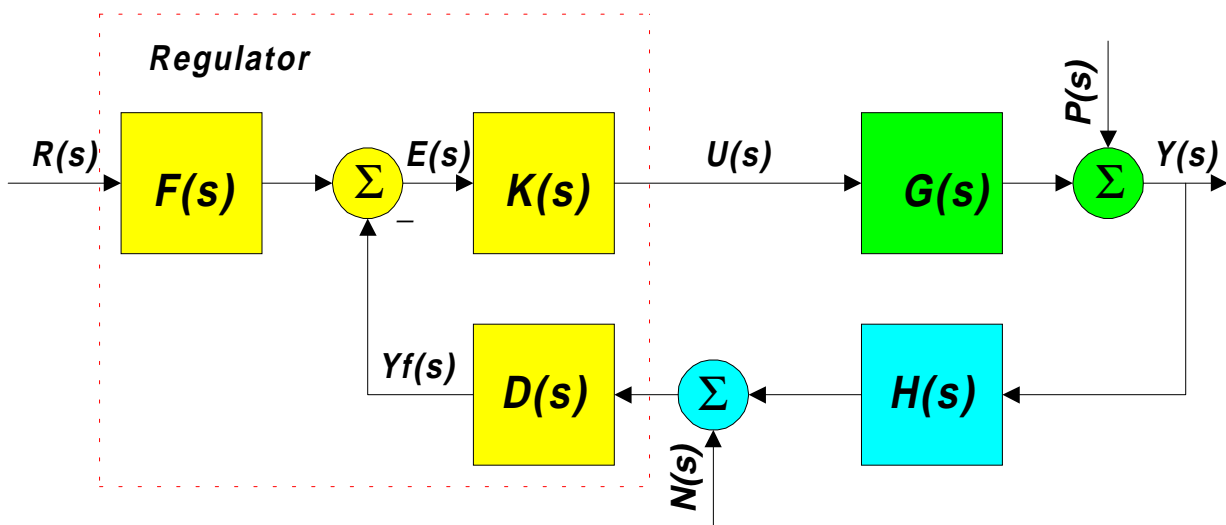


Fig. 2

Algoritmul PID numeric posedă de cele mai multe ori un mecanism de evitare al efectului de saturare prin acțiunea integrală.

Regulatorul PID cu două grade de libertate.

Regulatorii moderne, în special cele numerice, au schema bloc prezentată în Fig. 2. Față de schema clasică din Fig. 1 regulatorul are două blocuri noi: prefiltrul F și blocul D care include acțiunea derivativă și filtrul zgomotului N.

Funcția de transfer a prefiltrului este, de regulă, de forma

$$F(s) = \frac{\beta T_i s + 1}{T_i s + 1}$$

sau echivalentul său numeric obținut prin aproximarea lui s . T_i este constanta de timp integral iar constanta β , cu valori între 0 și 1, se determină astfel încât răspunsul indicial al sistemului automat în regim de urmărire să aibă suprareglări mici, $\sigma \leq 7\%$. Existența prefiltrului permite acordarea compensatorului PID numai pentru funcționarea în regim de reglare (stabilizare).

Zgomotul N , atunci când depășește 3% din domeniul de lucru, poate fi filtrat de blocul D cu funcția de transfer, având de regulă, forma

$$D(s) = \frac{T_d s + 1}{\alpha T_e s + 1}$$

sau cu echivalentul său numeric obținut prin aproximarea lui s . În expresia funcției de transfer T_d este constanta de timp derivativ, T_e este perioada de eșantionare și α determinat astfel încât să filtreze zgomotul fără a reduce performanțele sistemului automat. O valoare aproximativă pentru α , atunci când T_e este aleasă în mod corect, este mai mare decât unu.

Regulatorul PID cu două grade de libertate din Fig. 2 are compensatorul K de tipul proporțional integral. Acțiunea derivativă, atunci când există, este realizată de blocul D care face în același timp și o operație de filtrare a zgomotului N .

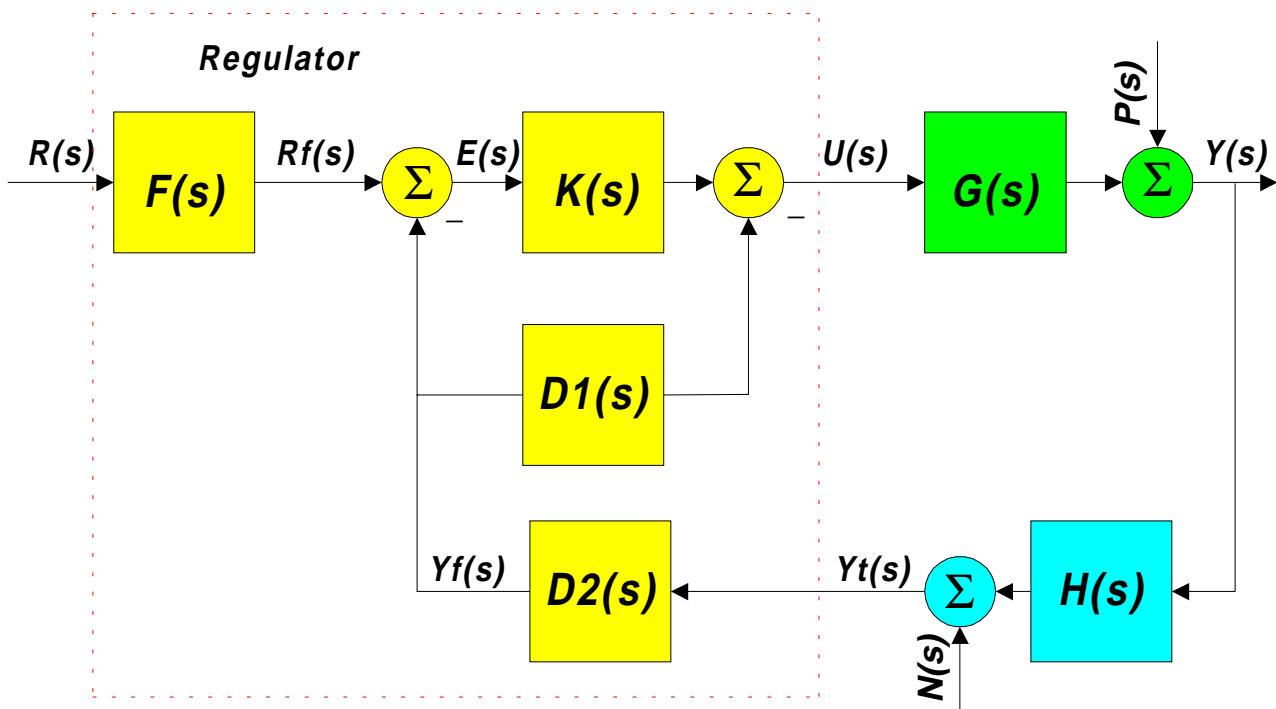


Fig. 3

O altă variantă de regulator PID cu două grade de libertate este prezentată în Fig. 3. În acest caz acțiunea derivativă este dată de funcția de transfer $D1 = T_d s$ iar filtrarea zgomotului este realizată de funcția de transfer $D2(s) = 1/(\alpha T_e s + 1)$. Variantele numerice se obțin prin aproximarea lui s .

Acordarea regulatorului PID cu două grade de libertate se face prin stabilirea constantelor K_c , T_i , T_d , α și β . Dacă $\alpha=0$ și $\beta=1$ se obține un regulator cu un singur grad de libertate, cu algoritmul PID ideal și cu acțiunea derivativă scoasă de pe calea directă.

Instrumentul virtual PID.

Unele regulatoare PID numerice, de exemplu cele realizate pe calculatoare PC sub forma unor instrumente virtuale, au algoritmul PID neliniar. Un exemplu de instrument virtual PID, produs de National Instruments, are structura regulatorului ca în Fig. 3. Referința $r(t)$ și variabila de proces $y_t(t)$ la ieșirea traductorului sunt eșantionate cu perioada T_e și prelucrate de calculator. Eșantionul cu numărul k al semnalului de comandă $u(k)$ al regulatorului este calculat conform variantei de algoritm PID neliniar:

Acțiunea tip P depinde de valoarea constantei L care trebuie să fie aleasă de către utilizator. Comanda $u(k)$ este proporțională cu eroarea $e(k)$ dacă $L=1$ sau cu pătratul erorii $e^2(k)$ dacă $L=0$.

Acțiunea tip I realizează integrarea explicită prin metoda trapezului. Și această acțiune este neliniară. Cu cât eroarea $e(i)$ este mai mare cu atât este mai mică acțiunea integrală.

Acțiunea tip D, realizată de blocul D1, folosește metoda diferenței inverse pentru aproximarea derivatei și se aplică numai variabilei de proces filtrate $y_f(k)$.

$$\begin{aligned} \text{PID neliniar : } \quad u(k) &= u_p(k) + u_I(k) + u_D(k) \\ u_p(k) &= K_c e(k) \left[L + (1-L) \frac{|e(k)|}{\text{dom } r} \right] \\ u_I(k) &= K_c \frac{T_e}{T_i} \sum_{i=1}^k \frac{e(i) + e(i-1)}{2} \cdot \frac{1}{1 + 10 \left[\frac{e(i)}{\text{dom } r} \right]^2} \\ u_D(k) &= K_c \frac{T_d}{T_e} [y_f(k) - y_f(k-1)] \\ y_f(k) &= 0,5y_t(k) + 0,25y_t(k-1) + 0,175y_t(k-2) + 0,075y_t(k-3) \end{aligned}$$

Filtrarea zgomotului N se face de către blocul D2 iar filtrarea referinței de către blocul F cu ajutorul funcțiilor de transfer din paragraful precedent, în varianta numerică.

Regulatorul PID fuzzy.

Algoritmii de conducere bazați pe logica vagă (fuzzy) își dovedesc utilitatea ori de câte ori este necesar să se folosească în conducere expertiza umană exprimată în termeni lingvistici vagi cum ar fi, de exemplu, regula:

Dacă presiunea este potrivită atunci robinetul se închide puțin.

Un sistem automat cu compensator fuzzy al erorii este prezentat în Fig. 4. La intrarea compensatorului exista un dispozitiv care vaguizează (fuzzifică) eroarea eșantionată $e(k)$ și variațiile ei $\Delta e(k)$ și $\Delta^2 e(k)$. Aceasta înseamnă că se definesc funcții de apartenență ale eșantioanelor $e(k)$ și $\Delta e(k)$ la termenii lingvistici vagi E și DE. Aceștia pot lua, de exemplu,

valorile: NL – negativ mare, NS – negativ mic, ZE – zero, PS – pozitiv mic, PL – pozitiv mare. La ieșirea compensatorului este un dispozitiv care face operația inversă, adică devaguizează (defuzzifică) valorile vagi obținute pentru comanda $u(k)$ sau variația sa $\Delta u(k)$. Legătura dintre intrările vagi ale compensatorului și ieșirile sale vagi este dat de un grup de reguli. Pentru un compensator PI fuzzy regulile sunt de forma:

PI fuzzy : Dacă $e(k)$ este E și $\Delta e(k)$ este DE atunci $\Delta u(k)$ este DU
PI echivalent de tip paralel, neliniar, numeric, incremental :
 $\Delta u(k) = K_p(k)[e(k) - e(k-1)] + K_i(k)e(k) = K_p(k)\Delta e(k) + K_i(k)e(k)$

Compensatorul clasic echivalent compensatorului fuzzy este de tip paralel, adică acțiunea proporțională este caracterizată de constanta K_p iar acțiunea integrală este caracterizată de constanta K_i . De data aceasta însă valorile $K_p(k)$ și $K_i(k)$ depind de numărul eșantionului k , adică compensatorul fuzzy PI este neliniar.

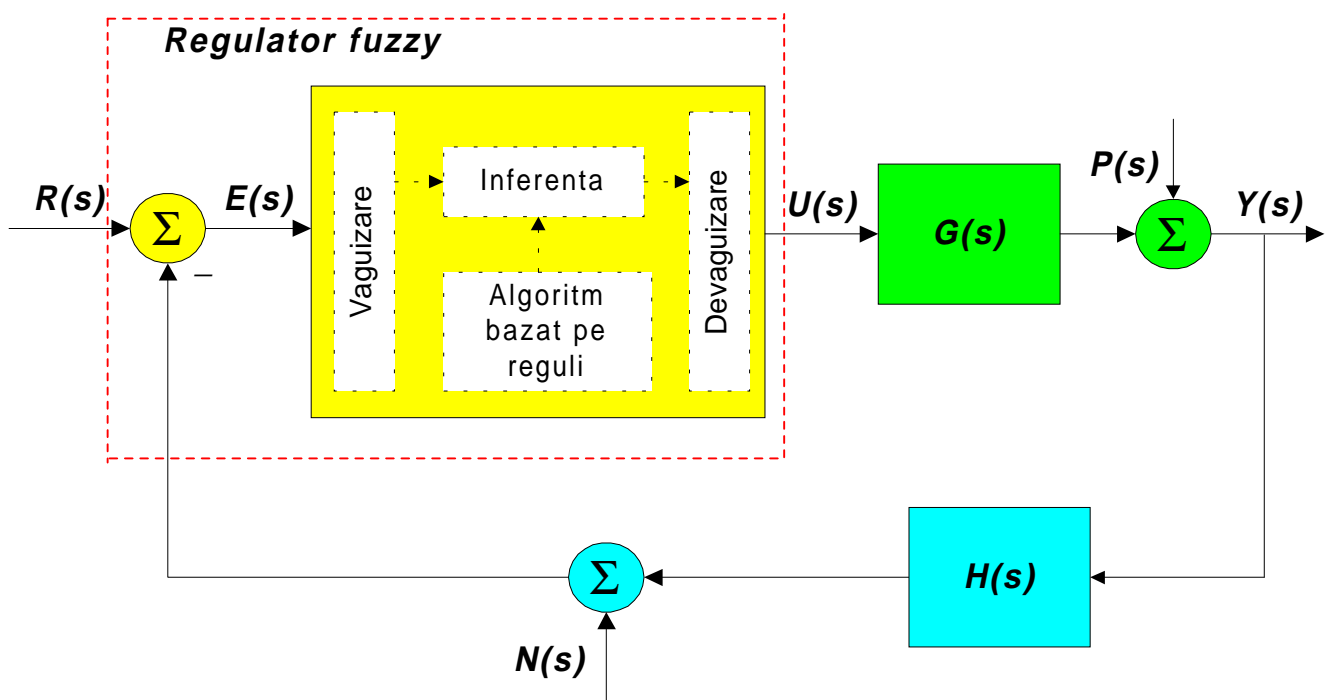


Fig. 4

Se poate defini și un compensator PID bazat pe logica vagă. Utilitatea sa practică este îndoielnică. Mai interesant este regulatorul integrat în automatul programabil al firmei Omron care are două compensatoare, unul PID linear numeric și unul PI fuzzy. Ieșirile acestor compensatoare se adună formând mărimea de comandă. Compensatorul fuzzy funcționează numai pentru erori mari și realizează o corecție neliniară asemănătoare cu cea de la instrumentul PID virtual. De data aceasta forma neliniarității este definită de utilizator.

Regulatorul PI cu impulsuri modulate în durată - IMD.

Aproape toate reglatoarele moderne PID au și o variantă de algoritm PID cu impulsuri modulate în durată. Cel mai frecvent este folosit regulatorul PI cu impulsuri modulate în durată prezentat în Fig. 5. Compensatorul acestui regulator este de tip PD și are la ieșire un tren de impulsuri cu durată variabilă. Dacă aceste impulsuri sunt integrate de un servomotor se obține un efect aproximativ de tip proporțional integral PI.

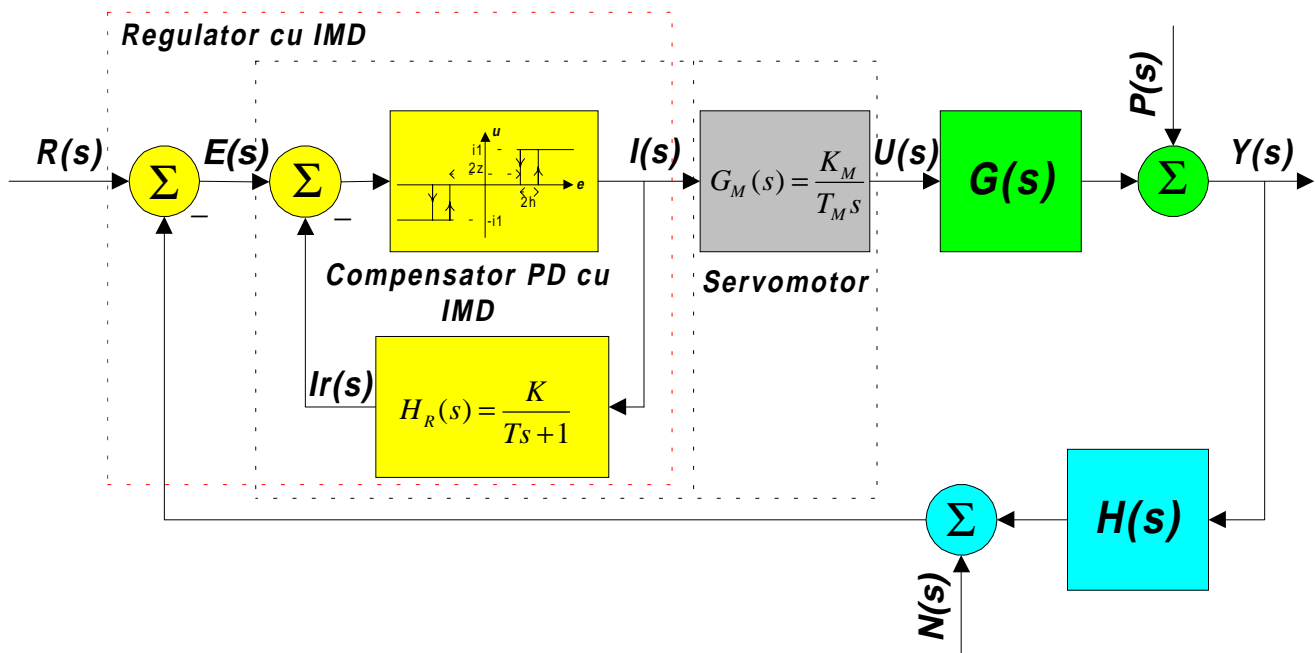


Fig. 5

Compensatorul PD cu IMD este format dintr-un sistem cu reacție negativă care are pe cale directă un bloc trip pozițional iar pe calea inversă un bloc cu o funcție de transfer de ordinul unu. Impulsurile care apar la ieșirea acestui compensator au amplitudinea de plus i_1 sau minus i_1 . Dacă eroarea nu este prea mică sau prea mare impulsurile au o lățime proporțională cu eroarea și o perioadă de apariție constantă. Pentru acest domeniu al erorilor compensatorul PD împreună cu servomotorul realizează un algoritm aproximativ PI cu IMP.

PI cu IMD: dacă $\frac{\Delta e}{i_r} = 0,3 \dots 0,7$ atunci:

$$K(s) = \frac{U(s)}{E(s)} \cong \frac{u_M}{i_r} \frac{T}{T_M} \left(1 + \frac{1}{T_s}\right) \frac{1}{T_1 s + 1}$$

in care:

$$i_r = K i_1 \quad , \quad T_1 = T \frac{\Delta e}{i_r} \quad , \quad \Delta e = e - z$$

Se observă că parametrii regulatorului PI cu IMD depind de parametrii servomotorului, de parametrii blocului de reacție și de mărimea erorii.

Pentru erori mici regulatorul PI cu IMD funcționează aproximativ la fel cu un regulator tripozițional. Parametrii acestuia, zona de insensibilitate $2z$ și lățimea ciclului histerezis $2h$, trebuiesc luați în considerare de utilizator.

Regulatele PI cu IMD sunt preferate adeseori deoarece folosesc motoare asincrone cu rotorul în scurtcircuit comandate de impulsurile de la ieșirea regulatorului prin intermediul unor contactoare.

Numărul mare de variante de algoritmi PID al regulatelelor moderne provoacă dificultăți nu numai la înțelegerea modului de funcționare și definirea parametrilor caracteristici ci și la acordarea lor folosind criteriile empirice existente.