

UNIVERSITATEA "POLITEHNICA" DIN TIMIȘOARA
FACULTATEA DE AUTOMATICĂ ȘI CALCULATOARE

617.599
18 p C

Ing. RADU-EMIL PRECUP

**CONTRIBUȚII PRIVIND CONDUCEREA FUZZY A SISTEMELOR CU
FAZĂ NEMINIMĂ CU APLICAȚII LA CONDUCEREA
HIDROGENERATOARELOR**

- TEZĂ DE DOCTORAT -

CONDUCĂTOR ȘTIINȚIFIC: Prof.dr.ing. STEFAN PREITL

BIBLIOTECA CENTRALĂ
UNIVERSITATEA "POLITEHNICA"
TIMIȘOARA

Timișoara, 1996

CUPRINS

| | |
|--|----|
| Introducere. | 5 |
| Indexul principalelor notații și abrevieri utilizate. | 8 |
| Cap. I. Sisteme cu faza neminimă. Proprietăți specifice interpretate din punct de vedere al conducerii hidrogeneratoarelor. | 13 |
| 1.1. Sisteme cu faza neminimă. | 13 |
| 1.2. Structura sistemului de reglare automată a turajului unui hidrogenerator. Modelele matematice aferente procesului condus. | 16 |
| 1.2.1. Structura sistemului de reglare automată a turajului unui hidrogenerator. | 18 |
| 1.2.2. Principiile de modelare matematică detaliată, de liniarizare și de reducere a ordinului. | 20 |
| 1.2.2.1. Modelarea matematică a sistemului hidraulic. | 20 |
| 1.2.2.2. Modelarea matematică a sistemului generator sincron-sarcina. | 24 |
| 1.2.3. Caracterizarea în operațional printr-un model matematic de ordin redus a procesului condus aferent. Încadrarea în bucla de reglare a turajului. | 25 |
| Cap. II. Analiza critică a unor structuri clasice de sisteme de reglare automată a proceselor cu faza neminimă și de proiectare algoritmică a reguletoarelor aferente. | 28 |
| 2.1. Considerații generale. Indicatori de calitate. | 28 |
| 2.2. Structuri clasice de conducere a sistemelor cu faza neminimă și variante de proiectare algoritmică a reguletoarelor aferente. | 34 |
| 2.2.1. Structura de reglare automată convențională cu reglator de tip PI. Varianta de proiectare în domeniul pulsație. | 34 |
| 2.2.2. Structura de reglare automată convențională cu reglator de tip PI. Variante de acordare optimă a parametrilor reguletorului. | 38 |
| 2.2.3. Structura de reglare automată bazată pe urmărirea unui model matematic de referință al procesului condus. | 51 |
| 2.3. Analiza comparativă a metodelor clasice de proiectare algoritmică a reguletoarelor. Concluzii. | 56 |
| Cap. III. Dezvoltarea unor structuri de reguletoare fuzzy destinate conducerii sistemelor cu faza neminimă. | 61 |
| 3.1. Considerații generale. | 61 |
| 3.2. Reguletorul fuzzy de tip cvasi-PI în varianta standard. | 64 |
| 3.3. Reguletorul fuzzy de tip cvasi-PI cu baza de reguli modificată. | 73 |
| 3.4. Reguletorul fuzzy de tip cvasi-PI cu baza de reguli modificată și distribuție modificată a funcțiilor de apartenență aferente termenilor lingvistici ai comenzii. | 76 |
| 3.5. Reguletorul fuzzy de tip cvasi-PI cu structura variabilă. | 81 |
| 3.6. Reguletorul fuzzy de tip cvasi-PI cu integrare pe ieșire cu viteza de integrare variabilă. | 85 |
| 3.7. Concluzii. | 90 |
| Cap. IV. Dezvoltarea unor strategii de acordare fuzzy a parametrilor unor tipuri de reguletoare destinate conducerii sistemelor cu faza neminimă. | 95 |
| 4.1. Considerații generale. | 95 |
| 4.2. Structuri de conducere cu acordare fuzzy a parametrilor reguletoarelor | |

| | |
|--|-----|
| convenționale. | 95 |
| 4.2.1. Structura de regulator cu acordare fuzzy a parametrilor unui algoritm de reglare numerică de tip PI în variația cvasicontinuală incrementală în funcție de valoarea actuală a erorii de reglare și de valoarea actuală a incrementului erorii de reglare. | 96 |
| 4.2.2. Structura de regulator cu acordare fuzzy a parametrilor unui algoritm de reglare numerică de tip PI în varianta cvasicontinuală incrementală în funcție de parametrii primari ai procesului condus. | 100 |
| 4.2.3. Structuri de reglatoare cu acordare fuzzy a parametrilor unui algoritm de reglare numerică în varianta cvasicontinuală bazat pe urmărirea unui model matematic de referință al procesului condus în funcție de valoarea actuală a erorii de reglare și de valoarea actuală a incrementului erorii de reglare. | 105 |
| 4.3. Structuri de conducere cu acordare fuzzy a unor parametri specifici ai regloatoarelor fuzzy de tip cvasi-PI în varianta standard. | 112 |
| 4.3.1. Structura de regulator cu acordare fuzzy a formei funcțiilor de apartenență aferente termenilor lingvistici ai intrărilor și ieșirilor unui regulator fuzzy de tip cvasi-PI în varianta standard în funcție de valoarea actuală a erorii de reglare. | 113 |
| 4.3.2. Structura de regulator cu acordare fuzzy a coeficientului de transfer al unui regulator fuzzy de tip cvasi-PI în varianta standard în funcție de valoarea actuală a erorii de reglare. | 118 |
| 4.4. Concluzii. | 123 |
| Cap. V. Două procedee de verificare a stabilității sistemelor de reglare automată cu reglatoare fuzzy. | 129 |
| 5.1. Considerații generale. | 129 |
| 5.2. Prezentarea a două procedee de verificare a stabilității sistemelor de reglare fuzzy a proceselor cu fază neminimă bazate pe utilizarea teoriei hiperstabilității și a unui model matematic intrare-stare-ieșire cu timp discret aferent procesului condus considerat local liniar. | 130 |
| 5.3. Aplicarea celor două procedee de verificare a stabilității sistemelor de reglare fuzzy a proceselor cu fază neminimă la studiul de caz considerat referitor la reglarea turației unui hidrogenerator al centralei hidroelectrice Porțile de Fier 1. | 141 |
| 5.4. Concluzii. | 156 |
| Cap. VI. Concluzii finale și contribuții. | 158 |
| 6.1. Concluzii finale. | 158 |
| 6.2. Contribuții originale. | 161 |
| Anexa. Rutine și funcții specifice mediului Matlab utilizate în simularea comportării sistemelor de reglare automată cu reglatoare fuzzy. | 164 |
| Bibliografie. | 172 |

"O idee care poate fi folosita o singura data e un truc. Daca poate fi folosita mai mult de o singura data ea devine o metoda".

G. Pólya & G. Szegő

INTRODUCERE

Prezenta teza se axeaza pe studiul, cunoașterea și dezvoltarea unor regulatoare fuzzy care sa asigure performanțe corespunzatoare chiar și pentru procesele considerate "dificile" cum sunt de exemplu cele cu faza neminima sau cele neliniare. În aceste context abordarea conducerii fuzzy a sistemelor cu faza neminima este cel puțin interesanta deoarece deși în ultimii ani literatura de specialitate și firme ofera regulatoare fuzzy sau regulatoare numerice care prevad subprograme fuzzy, totuși, se poate afirma ca până în prezent nu s-a facut un studiu aprofundat asupra conducerii fuzzy a sistemelor cu faza neminima.

Studiul reglării fuzzy a sistemelor cu faza neminima prezinta interes:

- atât din punctul de vedere al regulatorului, în cadrul tezei propunându-se diverse structuri de regulatoare și analizându-se implicațiile lor în conducere,
- cât și din punctul de vedere al sistemului în ansamblu prin analiza efectelor provocate de modificările parametrilor procesului condus asupra performanțelor realizate de sistemele de reglare automata.

Aplicația imediata și de importanța deosebita vizata este un sistem cu faza neminima de ordinul al doilea cu doi poli negativi și un zero pozitiv, care corespunde modelului matematic simplificat aferent procesului condus din cazul reglării turajiei unui hidrogenator. În cadrul tezei nu se rezolva în extensie toate aspectele conducerii hidrogenatoarelor ci doar problemele de baza, principiale legate în primul rând de surprinderea caracterului de sistem cu faza neminima al procesului condus. Aspectele de detaliu legate de conducerea hidrogenatoarelor și de interconectarea hidrogenatoarelor cu sistemul energetic pot fi abordate într-o maniera similara folosind modele matematice detaliate specifice electroenergeticii care sa surprinda mult mai exact fenomenele.

In acest context efectuarea unui studiu privind dezvoltarea unor regulatoare fuzzy destinate conducerii sistemelor cu faza neminima faciliteaza posibilitatea implementarii conștiente a regulatoarelor fuzzy în amenajarile hidroenergetice.

Teza este dezvoltata de-a lungul a șase capitole, după cum urmeaza.

În capitolul I se trateaza proprietățile specifice ale sistemelor cu faza neminima. Procesul condus luat ca exemplu este cu faza neminima, de ordinul al doilea, cu doi poli negativi și un zero pozitiv; specific

domeniului, parametrii procesului pot varia în timp. Pentru procesul considerat se analizează proprietățile de bază precum și implicațiile acestora asupra proiectării structurilor și algoritmilor de reglare. În continuare sunt prezentate sintetic principiile legate de modelarea matematică detaliată și simplificată a procesului condus aferent aplicației.

În capitolul II se fixează modalitățile de analiză a performanțelor realizate de către sistemele de reglare automată conținând regulatoarele dezvoltate pe parcursul întregii teze; conform uzanțelor din literatură, pentru procesul condus s-a adoptat un model matematic simplificat. De asemenea, se prezintă datele numerice pentru studiul de caz luat în considerare referitor la reglarea turajiei unui hidrogenerator al centralei hidroelectrice Porțile de Fier 1 (PDF 1). Se analizează critic structuri clasice de conducere și metode de proiectare algoritmică a regulatoarelor aferente, frecvent utilizate în reglarea proceselor cu fază neminimă și metodele de optimizare a sistemelor cu fază neminimă: structura de reglare automată convențională bazată pe proiectarea algoritmică a regulatorului în domeniul pulsație (frecvență), structura de reglare automată bazată pe urmărirea unui model matematic de referință al procesului condus și optimizarea parametrică a structurii de reglare automată convențională (se apelează 12 indicatori de calitate integrali, parte din ei prezentând specific faptul că urmăresc să asigure o sensibilitate (cât mai) redusă la modificările parametrilor procesului condus, frecvente în exploatare). Întregul studiu este exemplificat pentru aplicația menționată; se prezintă rezultate de simulare numerică a comportării sistemelor de reglare automată și se analizează principalele avantaje și dezavantaje ale fiecărei structuri.

În capitolul III se abordează aspecte specifice ale conducerii fuzzy a sistemelor cu fază neminimă; la baza studiului se află dezvoltarea unui regulator fuzzy de tip cvasi-PI (cu dinamică) cu integrare pe ieșirea sau pe intrarea modulului fuzzy. În continuare, pe această structură se dezvoltă zece variante de regulatoare; din cadrul acestora, șase sunt originale, iar pentru celelalte patru au fost preluate din literatura de specialitate principiile generale de dezvoltare, autorul efectuând adaptarea lor la specificul conducerii sistemelor cu fază neminimă. Dezvoltarea fiecărei variante de regulator este urmată de exemplificarea principiului de proiectare și de implementare la conducerea proceselor cu fază neminimă. Analiza performanțelor sistemelor de reglare automată cu regulatoarele fuzzy dezvoltate se efectuează pe studiul de caz considerat. Capitolul este întregit prin interpretarea rezultatelor de simulare obținute și concluziile aferente.

Capitolul IV este dedicat dezvoltării unor regulatoare destinate conducerii sistemelor cu fază neminimă bazate pe acordarea fuzzy a parametrilor unor regulatoare convenționale și a parametrilor specifici unora din regulatoarele fuzzy dezvoltate în capitolul III. Se prezintă opt variante de structuri de regulatoare cu acordare fuzzy a parametrilor; din cadrul acestora, cinci variante sunt în întregime originale, celelalte trei fiind preluate în parte din literatura de specialitate și adaptate la specificul conducerii proceselor cu fază neminimă. Este de menționat faptul că, ținând seama de comportarea specifică sistemelor cu fază neminimă, adaptările din capitolele III și IV nu sunt însă imediate.

În capitolul V, pe baza studiului efectuat privind metodele de analiză a stabilității sistemelor de

reglare automata cu regulatoare fuzzy, se prezinta doua procedee originale de verificare a stabilității sistemelor de reglare fuzzy a proceselor (în particular, cu faza neminima) bazate pe utilizarea teoriei hiperstabilității (dupa Popov) și a unui model matematic intrare-stare-ieșire cu timp discret aferent procesului condus, considerat local liniar. Procedeele dezvoltate dau condiții suficiente care garanteaza stabilitatea sistemelor de reglare fuzzy; ambele procedee sunt testate pe variantele de regulatoare fuzzy dezvoltate și furnizeaza informațiile primare necesare alegerii domeniilor valorilor parametrilor liberi ai reguletoarelor fuzzy.

În capitolul VI se prezinta concluziile generale privind studiul întreprins referitor la reguletoarele dezvoltate și la posibilitatea implementării lor în conducerea sistemelor cu faza neminima. În acest context sunt enumerate și sintetizate și principalele contribuții originale aduse de autor.

Autorul tezei mulțumește conducătorului științific, prof.dr.ing. Stefan Preitl, pentru îndrumarea atenta și observațiile facute pe parcursul elaborării tezei și pentru încrederea în reușita lucrării.

Pe aceasta cale autorul adreseaza mulțumiri pentru sollicitudinea și sprijinul acordat prin discuții și prin furnizarea unor lucrări domnilor: prof.dr.ing. Toma-Leonida Dragomir, conf.dr.ing. Stefan Kilyeni, conf.dr.ing. Bucur Luștea de la Universitatea "Politehnica" din Timișoara și tuturor celor cu care prin discuții la diferite manifestări științifice sau prin corespondența purtata au facut posibil schimbul de idei și informații ce a contribuit la finalizarea tezei.

În final, dar nu în ultimul rând, autorul mulțumește soției Adriana pentru înțelegerea acordata și atmosfera deosebit de placuta creata în familie și parinților pentru sprijinul și încurajările permanente acordate de-a lungul atâtor ani.

INDEXUL PRINCIPALELOR NOTAȚII ȘI ABREVIERI UTILIZATE

SFN - sistem cu faza neminimă (în general);
SFN2-IZP - SFN de ordinul al doilea cu doi poli reali negativi și un zero pozitiv;
SRA - sistem de reglare automată (în general);
SRA-V - SRA a vitezei (turației) unui hidrogenerator;
SRA-Ex - SRA a tensiunii (excitației) unui hidrogenerator;
SR-VPA - (sub)sistem de reglarea automată a vitezei și puterii active;
SAT - (sub)sistem aducțiune - turbina sau (sub)sistem hidraulic;
SAA - (sub)sistem de aducțiune a apei;
SGS - (sub)sistem generator sincron - sarcina;
GS - generator sincron;
HG - hidrogenerator;
TH - turbina hidraulică;
EE - element de execuție;
SSHS - servosistem electrohidraulic stabilizat;
PC - proces condus;
t - variabila independentă timp;
s - variabila operațională;
T - constantă de timp (în general);
k, K - coeficient de transfer (în general);
f.d.t. - funcție de transfer;
MM - model matematic (în general);
MM-ISI - MM intrare-stare-ieșire;
MM-II - MM intrare-ieșire;
c.l.p. - caracteristici logaritmice de pulsație;
c.a.p. - caracteristica amplitudine-pulsație;
c.f.p. - caracteristica faza-pulsație;
 T_1, T_2, T_3 - constante de timp care apar în relația (1.1.10);
 k_{pc}, α_3 - parametri care apar în relația (1.1.10);
 ω - viteză unghiulară sau pulsație (după caz);
 P_m - putere mecanică;
 C_m - moment (cuplu) activ/mechanic;
 C_r - moment (cuplu) rezistent;
U - tensiune la bornele GS;
 u_c - tensiune de excitație a GS;
P - putere electrică activă;
Q - putere electrică reactivă;
 ω_0 - referința (prescriere) de viteză;
 y_ω - deschiderea aparatului director;

- ϵ_{ω} - eroare de reglare a vitezei (marime de acționare);
 u_{ω} - comanda elaborata de RG-V;
 v - perturbație;
 h - cadere/inalțime de cadere;
 q - debit de apă turbinat;
 η - randamentul turbinei hidraulice;
 ρ - densitatea apei;
 g - accelerație gravitațională;
 A - aria secțiunii transversale a conductei forțate;
 l - lungimea conductei forțate;
 D - diametrul transversal al conductei forțate;
 v_a - viteza de curgere a apei;
 m - masa apei din conducta forțată;
 a - viteza de curgere turbulentă;
 λ - coeficient de frecare de alunecare la contactul dintre apă și pereții conductei forțate;
 T_w - constanta de timp de curgere a apei;
 T_L - constanta de timp asociată undei de fluid;
 T_R - constanta de timp de reflexie;
 $K_{qh}, K_{nh}, K_{nq}, K_{qh}, K_{nqh}, \alpha_{qy}, \alpha_{q\omega}, \alpha_{n\omega}, \alpha_y$ - parametri caracteristici turbinei hidraulice (parte din ei obținuți din diagramele Muschel);
 $H_{Cm,y}(s)$ - f.d.t. a subsistemului aducțiune-turbina;
 $H_{n,q}(s)$ - f.d.t. a sistemului de aducțiune a apei;
 $H_{PC}(s)$ - f.d.t. a PC;
 g_1 - funcție aferentă c.a.p. a procesului condus;
 g_2 - funcție aferentă c.f.p. a procesului condus;
 $A_{PC}(s)$ - numitorul f.d.t. $H_{PC}(s)$;
 $B_{PC}(s)$ - numărătorul f.d.t. $H_{PC}(s)$;
 $H_0(s)$ - f.d.t. a sistemului deschis;
 g_{01} - funcție aferentă c.a.p. a sistemului deschis;
 g_{02} - funcție aferentă c.f.p. a sistemului deschis;
SE - sistem energetic;
 α_{ω} - coeficient de autoreglare al rețelei;
PdF 1 - grup energetic din cadrul centralei hidroelectrice Porțile de Fier 1;
 T_m - constanta de timp mecanică a rotorului generatorului sincron sau timp mort (după caz);
 $H_R(s)$ - f.d.t. a RG;
 k_R - coeficient de transfer al RG;
 T_i - constanta de timp de integrare a RG;
 w - marime de referință (conducere, prescriere);
 e - eroare de reglare (marime de acționare);
 m - marime de execuție;
 u - comanda (în general);
 y - ieșirea reglată;

e_M - eroare de modelare;
 y_M - ieșirea modelului;
 $H_M(s)$ - f.d.t. a modelului;
 $H_C(s)$ - f.d.t. a blocului de corecție a comportării SRA;
 $H_w(s)$ - f.d.t. a SRA în raport cu referința;
 $A_w(s)$ - numitor al f.d.t. $H_w(s)$;
 $B_w(s)$ - numărător al f.d.t. $H_w(s)$;
 $H_M(s)$ - f.d.t. a unui element de tip PDT1 cu faza minimă;
 $H_N(s)$ - f.d.t. a unui element de tip PDT1 cu faza neminimă;
 $H^{11}(s)$ - f.d.t. a unei aproximații de tip Padé de ordinul (1+1);
 $H^{22}(s)$ - f.d.t. a unei aproximații de tip Padé de ordinul (2+2);
 T_{imp} - constanta de timp impusă la reglarea bazată pe urmărirea unui model matematic de referință al procesului condus;
RG - regulator (în general);
RG-C - regulator convențional;
RG-PI(D) - RG de tip proporțional-integrator(-derivativ);
RG-V - regulator de viteză (turație);
RG-E - regulator de tensiune (excitație);
RG-F - regulator fuzzy;
RG-F-P, -PI, -PD, -PID - RG-F de tip cvasi-P, cvasi-PI, cvasi-PD, cvasi-PID;
ARN(-PI) - algoritm de reglare numerică (de tip proporțional-integrator);
 $\sigma(t)$ - semnal de tip treaptă unitate;
 t_r, t_r^y - timp de reglare;
 σ_1, σ_1^y - suprareglaj;
 σ_{-1} - subreglaj;
 t_{r1} - momentul producerii lui σ_{-1} ;
 t_0 - timp de revenire;
 t_{r1}, t_{r1}^y - timp de prima reglare;
 t_M, t_M^y - timpul primului maxim;
 σ_2, σ_2^y - abaterea primului minim de la valoarea de regim staționar constant a ieșirii reglate;
 t_m, t_m^y - timpul primului minim;
 γ_n - statism (natural);
 Φ_r - rezerva de fază;
 ω_r - pulsație de tăiere;
VRSC - valoare de regim staționar constant;
p.d.f.s.c. - punct de funcționare staționară constantă;
 $a \in \{w, v\}$ - indice superior definind regimul luat în considerare la optimizarea SRA;
 T_s - perioada de eșantionare (pas de discretizare);
 x_0 - valoarea marimii "x" corespunzătoare unui p.d.f.s.c.;
 x_n - valoarea nominală a marimii "x";
 \hat{x} - exprimarea marimii "x" în valori normate ($\hat{x} = (x-x_0)/x_n$);
 x_w - valoarea de regim staționar constant a marimii "x";

- x_k - valoarea marimii "x" la al k-lea pas de discretizare;
- $\Delta x_k = x_k - x_{k-1}$ - incrementul marimii "x";
- J_i^* , $a \in \{w, v\}$, $i = 1 \dots 6$ - indicatori de calitate integrali (funcții obiectiv);
- T_p , m_p , v_p , μ_p , θ_p - coeficienți de ponderare;
- A, B, C, D - tipuri de raspunsuri indiciale în raport cu referința ale SRA;
- a, b - tipuri de raspunsuri indiciale în raport cu perturbația ale SRA;
- PT1(2, 3) - proporțional cu temporizare de ordinul întâi (al doilea, al treilea);
- PDT1 - proporțional-derivativ cu temporizare de ordinul întâi;
- e_j , $j = 1 \dots m$ - variabile de intrare ale unui RG-F;
- RG-F-PI-II - RG-F-PI cu integrare pe intrare;
- RG-F-PI-IE - RG-F-PI cu integrare pe ieșire;
- $H^I(z)$ - f.d.t. în z a blocului de integrare numerica de pe intrarea RG-F;
- $H^E(z)$ - f.d.t. în z a blocului de integrare numerica de pe ieșirea RG-F;
- $H_R(z)$ - f.d.t. în z a RG;
- B_e , $B_{\Delta e}$, $B_{\Delta u}$ - parametri ai RG-F-PI-IE;
- B_e , B_{e1} , B_u - parametri ai RG-F-PI-II;
- K_p , K_i , α , K_p^* , K_i^* , α^* - parametri ai ARN-PI;
- m, n, p, m*, n*, p* - parametri ai RG-F-PI cu baza de reguli modificata și distribuție modificata a funcțiilor de apartenența aferente termenilor lingvistici ai comenzii;
- β_k , β_k^* - componenta a comenzii în cazul RG-F-PI cu structura variabila;
- C_1 , C_2 , C_1^* , C_2^* - parametri ai RG-F-PI cu structura variabila;
- r_k - factor rezidual;
- BA-F, BA-F' - blocuri de acordare fuzzy;
- B_e^P , $B_{\Delta e}^P$, $B_{K_P}^{PS}$, $B_{K_P}^{PM}$, $B_{K_P}^{PB}$, B_e^I , $B_{\Delta e}^I$, $B_{K_I}^{PS}$, $B_{K_I}^{PM}$, $B_{K_I}^{PB}$ - parametri ai RG cu acordare fuzzy a parametrilor unui ARN-PI în varianta cvasicontinuala incrementală în funcție de valoarea actuala a erorii de reglare și de valoarea actuala a incrementului erorii de reglare;
- B_{σ_y} , B_K , B_{σ_w} , $B_{K_P}^{PVS}$, $B_{K_P}^{PS}$, $B_{K_P}^{PM}$, $B_{K_P}^{PB}$, $B_{K_P}^{PVB}$, $B_{K_I}^{PVS}$, $B_{K_I}^{PS}$, $B_{K_I}^{PM}$, $B_{K_I}^{PB}$, $B_{K_I}^{PVB}$ - parametri ai RG cu acordare fuzzy a parametrilor unui ARN-PI în varianta cvasicontinuala incrementală în funcție de parametrii primari ai PC;
- B_e^0 , $B_{\Delta e}^0$, $B_{q_0}^{PS}$, $B_{q_0}^{PM}$, $B_{q_0}^{PB}$, B_e^I , $B_{\Delta e}^I$, $B_{q_1}^{PS}$, $B_{q_1}^{PM}$, $B_{q_1}^{PB}$ - parametri ai RG cu acordare fuzzy a doi parametri ai unui ARN în varianta cvasicontinuala bazat pe urmarirea unui MM de referința al PC în funcție de valoarea actuala a erorii de reglare și de valoarea actuala a incrementului erorii de reglare;
- P_0 , P_1 , P_2 , q_0 , q_1 - parametri ai ARN în varianta cvasicontinuala bazat pe urmarirea unui MM de referința al PC;

$H_R^{II}(s)$, $H_{F-u}^{II}(s)$ - f.d.t. ale părților de regulator propriu-zis și filtru din cadrul f.d.t. a RG bazat pe urmărirea unui MM de referință al PC;

s_1 , t_0 , t_1 - parametri ai ARN corespunzător filtrului cu f.d.t. $H_{F-u}^{II}(s)$;

B_c^{AF} , B_{be}^{PS} , B_{be}^{PM} , B_{be}^{PB} - parametri ai RG cu acordare fuzzy a formelor funcțiilor de apartenență aferente termenilor lingvistici ai intrărilor și ieșirii unui RG-F-PI în funcție de valoarea actuală a erorii de reglare;

B_c^{AF} , B_{kR}^{PS} , B_{kR}^{PM} , B_{kR}^{PB} - parametri ai RG cu acordare fuzzy a coeficientului de transfer al unui RG-F-PI în funcție de valoarea actuală a erorii de reglare;

PC-E - proces condus extins cu partea liniară (de integrare) a unui RG-F-PI;

$f \in \{II, IE\}$ - indice superior definind locul de plasare a integratorului în cazul unui RG-F-PI;

Δ_{PC} , \mathfrak{L}_{PC} , \mathfrak{L}_{PC}^T - matrici ale MM-ISI cu timp continuu aferent PC;

$\underline{\Delta}_d$, \underline{b}_d - matrici ale MM-ISI cu timp discret aferent PC;

$\underline{\Delta}_d^f$, \underline{B}_d^f , \underline{C}_d^f - matrici ale MM-ISI cu timp discret aferent PC-E;

E , F_1 - funcții neliniare reprezentând caracteristici statice ale unui RG-F;

$\underline{H}_d^f(z)$ - matrice de transfer aferentă PC-E;

u_n - comanda fictivă;

Δu_n - increment fictiv al comenzii;

\underline{y}_n^f - vector care apare în schema bloc informațională a unui sistem neliniar;

\underline{y}_n^f - vectorul ieșirii reglate aferent PC-E;

\underline{e}_n^f - vectorul erorii de reglare;

\underline{u}_n^f - vectorul comenzii;

β_0 , β - constante pozitive care apar în cadrul procedeeilor de verificare a stabilității SRA cu RG-F;

\underline{P} , \underline{M} , \underline{V} , \underline{L} - matrici care apar în cadrul procedeeilor de verificare a stabilității SRA cu RG-F;

n - ordinul PC;

n^f - ordinul PC-E;

\underline{p}_n - vectorul parametrilor de acordare ai unui RG-C în cadrul RG cu acordare fuzzy a parametrilor unui RG-C în funcție de parametrii primari ai PC;

\underline{p}_{RG-F} - vectorul parametrilor liberi ai unui RG-F;

\underline{p}_{PC} - vectorul parametrilor primari ai PC.

Cap. I. SISTEME CU FAZĂ NEMINIMĂ, PROPRIETĂȚI SPECIFICE
INTERPRETATE DIN PUNCT DE VEDERE AL
CONDUCERII HIDROGĂNERATOARELOR

1.1. Sisteme cu faza neminima

Se cunoaște (Woschni, 1973), (Ionescu, 1985) ca un sistem având funcția de transfer (f.d.t.) ireductibila proprie (1.1.1):

$$H(s) = \frac{k \quad B(s)}{s^q \quad A(s)}, \quad (1.1.1)$$

cu: $q \in \mathbb{Z}$, $k \in \mathbb{R}$,

$$B(0) = A(0) = 1, \quad (1.1.2)$$

este cu faza minima daca satisface urmatoarele doua conditii:

- a) $k > 0$,
- b) polinoamele $A(s)$ și $B(s)$ nu au radacini în semiplanul $\text{Re } s > 0$
(semiplanul drept al planului complex al radacinilor).

Sistemele care nu satisfac cele doua cerințe sunt denumite cu faza neminima.

În categoria sistemelor cu faza neminima (SFN) se încadrează cele caracterizate prin existența unor poli sau zerouri în semiplanul $\text{Re } s > 0$, sau/și cu timp mort.

Chiar la sistemele cu timp mort având f.d.t. (1.1.3):

$$H(s) = e^{-T_m s}, \quad (1.1.3)$$

cu T_m - timpul mort (de propagare), se pune problema realizării printr-un sistem finit dimensional; utilizarea în acest scop a aproximațiilor de tip Padé ale f.d.t. (1.1.3) poate conduce la zerouri cu partea reala strict pozitiva; acest lucru se observa imediat pentru aproximațiile de tip Padé de ordinul (1+1) și (2+2) notate cu $H^{11}(s)$, respectiv $H^{22}(s)$:

$$H^{11}(s) = \frac{1 - s T_m/2}{1 + s T_m/2}, \quad (1.1.4)$$

$$H^{22}(s) = \frac{1 - s T_m/2 + s^2 T_m^2/12}{1 + s T_m/2 + s^2 T_m^2/12}, \quad (1.1.5)$$

Este ușor de constatat ca un SFN nu îndeplinește condițiile uzuale de trasare a caracteristicilor logaritmice de pulsație (c.l.p.) (Ionescu, 1985).

Studiul proprietăților sistemelor cu faza neminima (Plessmann, 1967), (Ionescu, 1985) reprezentate

pentru exemplificare de un element de transfer de tip PDT1 cu f.d.t.:

$$H_M(s) = \frac{1 - T_1 s}{1 + T_2 s}, \quad (1.1.6)$$

cu $T_1 > 0, T_2 > 0$, evidențiază faptul că faza $\angle H_M(j\omega)$ scade pe măsura ce pulsația ω crește:

$$\angle H_M(j\omega) = - \arctg(\omega T_1) - \arctg(\omega T_2). \quad (1.1.7)$$

Situația este cu totul alta pentru sistemul reprezentat de elementul de tip PDT1 cu faza minimă:

$$H_M(s) = \frac{1 + T_1 s}{1 + T_2 s}, \quad (1.1.8)$$

cu $T_1 > 0, T_2 > 0$, la care faza are expresia:

$$\angle H_M(j\omega) = \arctg(\omega T_1) - \arctg(\omega T_2). \quad (1.1.9)$$

Datorită scaderii accentuate a fazei, la încadrarea într-o structură de conducere automată a SFN rezultă scderea accentuată a fazei sistemului (caracteristicii faza-pulsație (c.f.p.) a sistemului), ceea ce are ca efect o puternică scdere a rezervei de faza a sistemului de reglare automată (SRA) și, în final, conduce la probleme de stabilitate a SRA.

Exemplul de SFN luat în considerare în cadrul tezei ca proces condus (PC) este un sistem cu faza neminimă de ordinul al doilea cu doi poli reali negativi și un zero pozitiv (SFN2-1ZP) cu următoarea f.d.t.:

$$H_{PC}(s) = k_{PC} \frac{1 - T_1 s}{(1 + T_2 s)(\alpha_3 + T_3 s)}, \quad (1.1.10)$$

în care: T_1, T_2 și T_3 sunt constante de timp (strict pozitive), dintre care T_1 și T_2 sunt variabile iar T_3 este constantă; $k_{PC} > 0$ și $\alpha_3 \geq 0$ sunt parametri variabili (dependenți de condiții reale posibile pentru cazul procesului real).

SFN2-1ZP cu f.d.t. din relația (1.1.10) modelează acceptabil aplicația avută în vedere referitoare la conducerea unui hidrogenerator (HG).

Observație: SFN2-1ZP se întâlnesc în diverse aplicații de conducere automată, unde o f.d.t. de forma (1.1.10) apare fie datorită modelării matematice "naturale" a PC, fie datorită aproximării finit dimensionale a unor elemente cu timp mort. Din cadrul acestor aplicații merita amintite:

- 1) reglarea turației și/sau poziției motoarelor de curent continuu prin slăbire de câmp (a se vedea (Dragomir și Preitl, 1978) și aplicația din (Hsu și Chan, 1984));
- 2) reglarea nivelului în cazanele cu tambur (Klefenz, 1973);
- 3) reglarea puterii neutronice în unele reactoare nucleare (Bernard, 1991);
- 4) reglarea turației hidrogeneratoarelor (Pivovarov, 1973), (Hutarew, 1979), (Müller, 1984).

Pentru aplicația de reglare a turației unui HG se cunosc valori numerice concrete ale parametrilor PC

corespunzatoare reglării turației unui HG al centralei hidroelectrice Porțile de Fier 1 (PdF 1); pentru cazul considerat valorile parametrilor sunt (Precup, 1994):

$$k_{PC} = 1, T_1 = 2.2 \text{ sec}, T_2 = 1.1 \text{ sec}, T_3 = 6.8 \text{ sec}. \quad (1.1.11)$$

Relativ la valorile parametrului α_3 se analizează patru cazuri prezentate în ordinea descrescătoare a valorilor lui α_3 și numerotate astfel: (1) $\alpha_3 = 1.5$, (2) $\alpha_3 = 1$, (3) $\alpha_3 = 0.5$, (4) $\alpha_3 = 0$.

Este evident că se pot obține concluzii (asemănătoare) și pentru valori numerice ale parametrilor PC diferite de cele din relația (1.1.11).

Analiza proprietăților PC (SFN) considerat izolat (nu în bucla de reglare) se referă la următoarele două aspecte:

- a) analiza în domeniul timp prin alura răspunsului indicial;
- b) analiza în domeniul frecvență (pulsajie) prin alurile c.l.p.:

$$|H_{PC}(j\omega)|_{dB} = g_1(\lg \omega) \text{ și } \angle H_{PC}(j\omega) = g_2(\lg \omega).$$

a) **Analiza în domeniul timp.** Comportarea PC se studiază simulând pe calculator numeric răspunsul indicial; aceasta modalitate permite și analiza clasică a performanțelor SRA prin definirea comoda a indicatorilor de calitate empirici aferenți (Dumitrache ș.a., 1982).

Răspunsurile indiciale aferente PC cu f.d.t. $H_{PC}(s)$ în cazurile (1) ... (4) sunt prezentate în fig.1.1.1.

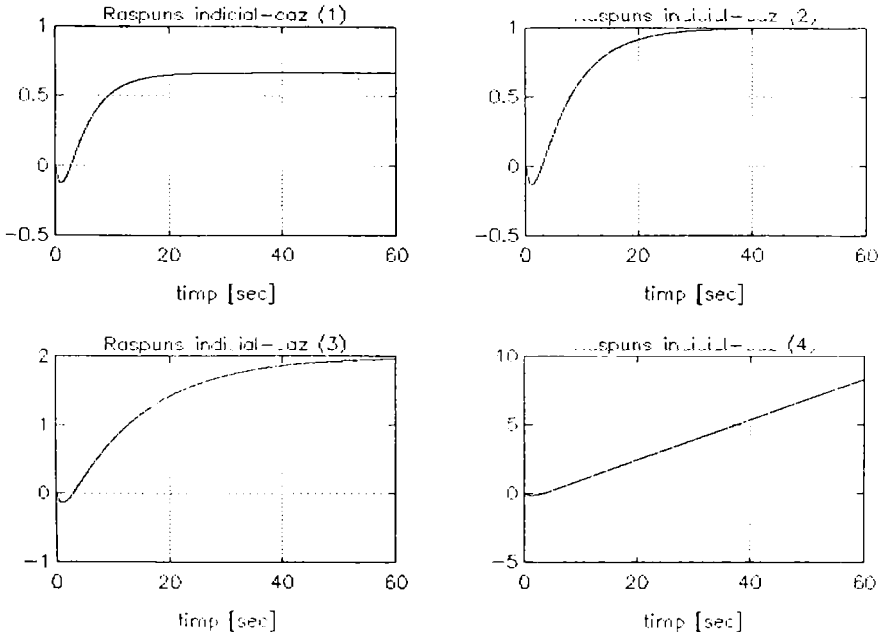


Fig.1.1.1. Raspunsuri indiciale aferente PC caracterizat prin f.d.t. (1.1.10).

Se observa ca, indiferent de caz, în prima parte a răspunsului sistemului - cu faza neminima - exista tendința de variație în sens opus fața de sensul în care variaza intrarea (comanda), care conduce la apariția subreglajului. Faptul ca la o comanda data ieșirea sistemului evolueaza în prima porțiune în sens opus sensului de variație poate produce incidente serioase în exploatarea SRA din care face parte PC cu faza neminima. De aceea, elaborarea strategiilor de conducere destinate sistemelor cu faza neminima trebuie privita cu o atenție deosebita în sensul reducerii cât mai accentuate a subreglajului.

Alurile răspunsurilor indiciale din fig.1.1.1 vor permite ulterior extragerea unor concluzii utile la formularea bazelor de reguli aferente reguletoarelor fuzzy destinate conducerii SFN.

b) Analiza în domeniul frecvența (pulsajie): analiza se dezvoltă pe baza c.l.p. aferente procesului condus caracterizat prin f.d.t. $H_{PC}(s)$:

- caracteristica amplitudine-pulsajie (c.a.p.):

$$|H_{PC}(j\omega)|_{dB} = g_1(\lg \omega), \quad (1.1.12)$$

- caracteristica faza-pulsajie (c.f.p.):

$$\angle H_{PC}(j\omega) = g_2(\lg \omega). \quad (1.1.13)$$

Alurile c.l.p. calculate conform relațiilor (1.1.12) și (1.1.13) pentru cele patru situații analizate sunt prezentate în fig.1.1.2.

În alura c.f.p. din fig.1.1.2 se recunoaște scaderia accentuata a fazei având drept efect tendința spre instabilitate a SRA ce include SFN. Acest efect se intensifica pe masura scaderii parametrului α_3 , devenind cel mai periculos în cazul SFN2-IZP cu caracter integrator (este vorba despre cazul (4), caracterizat prin $\alpha_3 = 0$).

1.2. Structura sistemului de reglare automata a turajiei unui hidrogenerator.

Modelele matematice aferente procesului condus

Aplicația de conducere fuzzy abordata în teza se refera la reglarea turajiei unui HG. Alegerea acestui domeniu de cercetare de către autor s-a făcut din urmatoarele considerente:

- a) procesul condus are model matematic și comportare specifice SFN;
- b) exista firme care propun implementarea reguletoarelor fuzzy în conducerea hidrogeneratoarelor, dar fara a prezenta nici-un fel de suport teoretic (de exemplu, (GEC Alsthom, 1992) în ultimele variante);
- c) după cunoștințele autorului, în literatura nu sunt prezentate studii privind conducerea fuzzy a SFN, care sa analizeze modul în care trebuie modificali parametrii reguletoarelor fuzzy, în vederea îmbunatașirii performanțelor SRA în care este încadrat SFN;
- d) existența, în cadrul colectivului din care face parte autorul, a unei experiențe de peste zece ani privind conducerea hidrogeneratoarelor.

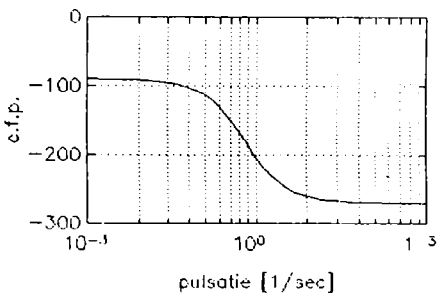
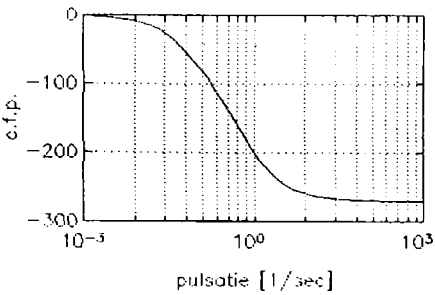
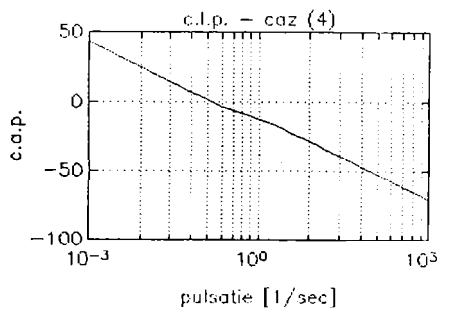
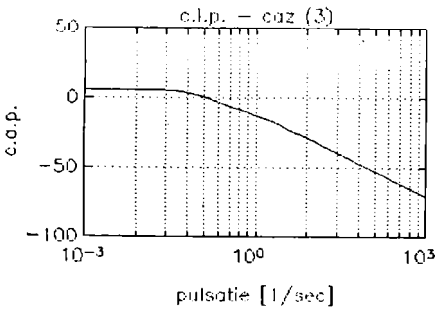
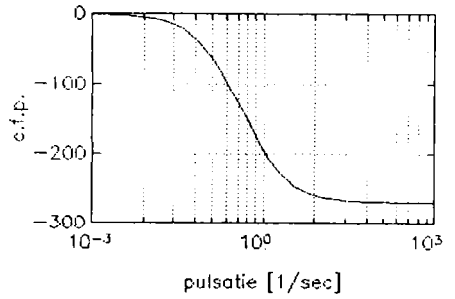
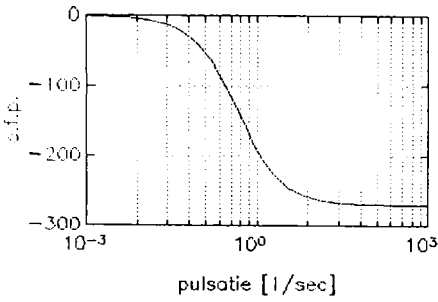
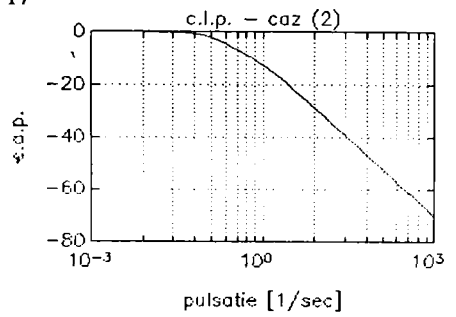
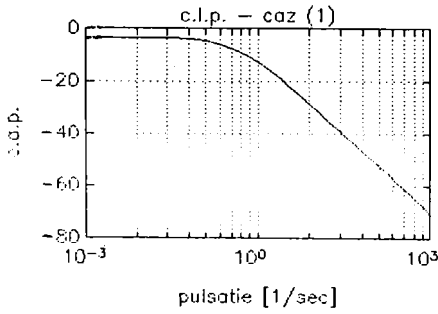


Fig.1.1.2. C.I.p. aferente PC caracterizat prin f.d.t. (1.1.10).

1.2.1. Structura sistemului de reglare automata a turajiei unui hidrogenerator

Schema de principiu pentru o amenajare hidroenergetica este redată in fig.1.2.1.1, in care sunt evidențiate (stilizat) elementele constitutive componente:

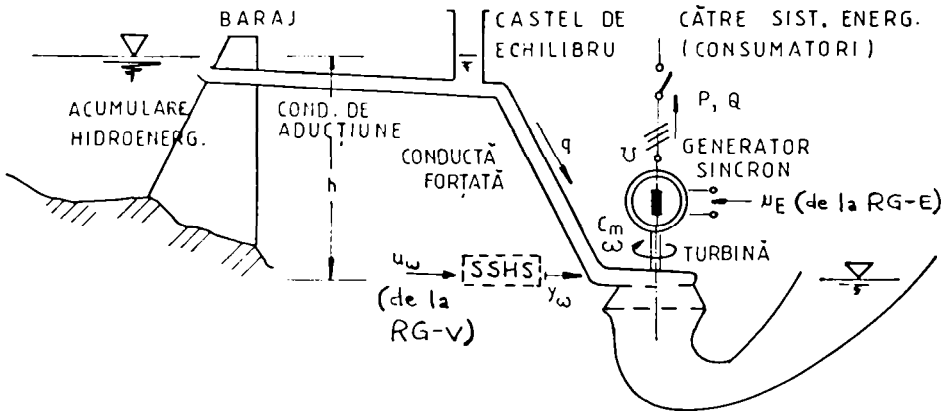


Fig.1.2.1.1. Schema de principiu a unei amenajari hidroenergetice.

acumularea hidroenergetica, barajul, castelul de echilibru, conducta de aducțiune, conducta forțată, turbina hidraulica (TH), generatorul sincron (GS). Alte notații care apar în fig.1.2.1.1 sunt: h - căderea/înălțimea de cadere; q - debitul de apa turbinat, ω - viteza unghiulara; C_m - momentul (cuplul) mecanic dezvoltat de TH; U - tensiunea la bornele GS; u_e - tensiunea de excitație a GS; P - puterea activa și Q - puterea reactiva debitate de GS.

Observație: Ținând seama de proporționalitatea dintre viteza unghiulara și turajie, în literatura termenul de reglare a turajiei este adeseori înlocuit prin termenul de reglare a vitezei; în cadrul tezei s-a acceptat aceasta dualitate de terminologie și, după caz, s-a și utilizat.

Schema bloc detaliata aferenta sistemului de reglare automata a vitezei unui hidrogenerator (SRA-V) se prezinta in fig.1.2.1.2. În schema se disting urmatoarele subsisteme care, în anumite condiții simplificatoare (Muller, 1984), sunt separabile:

a) SR-VPA - subsistemul de reglare automata a vitezei si puterii active - care conține ca parte componenta regulatorul de viteza propriu-zis RG-V cu sarcina elaborarii comenzii u_ω în funcție de viteza prescrisa ω_0 și de viteza masurata ω ; $\epsilon_\omega = \omega_0 - \omega$ reprezinta eroarea de reglare a vitezei. SR-VPA are sarcina și de a realiza statismul după puterea activa P (eventual deschiderea aparatului director y_ω) pe baza prescrierii puterii active P_0 ;

b) EE - elementul de execuție - constituit din servosistemul electrohidraulic stabilizat (SSHS), cu rol

de a transforma comanda u_{ω} (marime electrica) în deschiderea aparaturii (directori) y_{ω} (deplasare mecanica) marime de execuție;

c) SAT - subsistemul aducțiune-turbina, denumit și subsistemul hidraulic - alcătuit din conductivitatea de aducțiune a apei, conducta forțată, lacul de acumulare și turbina hidraulică - dezvoltă cuplul mecanic C_m al turbinei care este apoi preluat de GS cuplat pe același arbore cu turbina;

d) SGS - subsistemul generator sincron-sarcina - care acceptă ca intrare cuplul mecanic C_m dezvoltat de SAT; sarcina (în acest caz, sistemul energetic cu putere limitată sau consumatorii (duci)) dezvoltă cuplul rezistent C_r . Din acest punct de vedere GS va accepta ca intrare (pentru canalul de viteză) diferența de cupluri $\Delta C = C_m - C_r$, ieșirea semnificativă pentru SRA-V fiind ca. ieșirea U , tensiunea a bornei SS, este controlată de regulatorul de tensiune (RG-E)/sistemul de reglare a excitației/tensiunii la bornele SS (SRA-E) și care nu apare explicit pe schema nefiind legat nemijlocit de subiectul tezei.

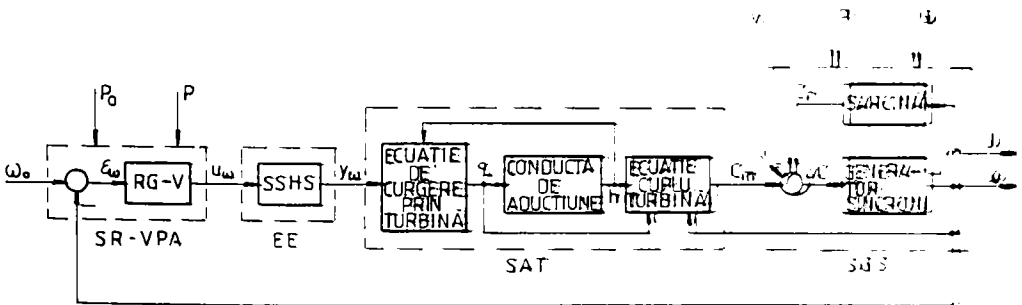


Fig. 1.2.1.2. Schema bloc detaliată aferentă SRA-V.

De asemenea, schema bloc din fig. 1.2.1.2 nu conține elementele de măsurare a vitezei și, eventual, putere activă deoarece elementele de măsură au comportare de tip PT1 cu constante de timp mica, deci pot fi aproximare foarte bine ca elemente de tip proporțional; dacă marimile sunt exprimate în valori normale/normalizate, coeficienții de transfer ai elementelor de măsură sunt unitari.

Tot acesta este motivul pentru care aici modelarea matematică a EE nu va fi detaliată (ca de exemplu, în (Preitl ș.a., 1983), (Beaer, 1987), (Dietz, 1988), (Köchelmann ș.a., 1991), (Preitl ș.a., 1993), (Preitl ș.a., 1993b)), servosistemul electrohidraulic stabilizat având ca o bună aproximare comportarea unui element de transfer de tip PT2 cu constanta de timp relativ mica și comportare aperiotică (coeficient de amortizare supraunitar). Dacă în continuare constantele de timp din "aval" (aducțiune + turbina) sunt sensibile mai mari, atunci EE poate fi foarte bine aproximată ca element de transfer de tip proporțional cu coeficienți de transfer unitari (pentru marimi exprimate în valori normale). În unele situații, din considerații constructive-funcționale legate atât de elementul de execuție cât și de dispozitivul de automatizare, EE va fi modelat din

punct de vedere informațional ca element neliniar de tip saturație; prin aceasta se surprind limitările la nivelul EE și al SR-VPA.

În schema bloc din fig.1.2.1.2 ca marime de ieșire apare viteza unghiulară ω cu rol de marime reglata pentru SRA-V; ipoteza este valabilă în condițiile unui GS de putere mare care este conectat la un SE slab sau unui GS care are cuplate la bare sarcini locale (regimul insularizat de funcționare a GS). În aceste condiții puterea activă consumată P are rol de intrare perturbatoare pentru SRA-V, ea fiind stabilită de circulația de puteri din sistem/consumatorii locali și influențând încărcarea GS. Realizarea încărcării dorite (a statismului artificial dorit) este o sarcină a SR-VPA. Efectul perturbațiilor asupra SRA-V poate fi surprins prin introducerea perturbației echivalente v ca marime de intrare pe schema bloc din fig.1.2.1.2; se poate considera că v este o măsură a puterii electrice active consumate/debitate P. Pentru partea de reglare a tensiunii rolul perturbației v este jucat de puterea reactivă Q.

Ținând seama de faptul că din punct de vedere al verificării primare a calității conducerii literatura evidențiază că în anumite limite modelele simplificate pentru PC asigură concluzii acoperitoare (Müller, 1984), (Pohl, 1988), în continuare în cadrul tezei se vor prezenta sintetic:

- principii de modelare matematică detaliată a subsistemelor menționate (o analiză detaliată a fost efectuată de autor în (Precup, 1994) urmărind o metodă clasică frecvent utilizată în literatura și prezentată, de exemplu, în (Hoppe, 1981), (Müller, 1984) ș.a.);
- modele matematice (MM) de ordin redus care sunt utile și frecvent apelate în proiectarea structurilor de conducere și într-o primă fază de testare a lor.

Se menționează faptul că acest procedeu este recomandat și în literatura de specialitate cu rezultate menționate ca și corespunzătoare (a se vedea (Pivovarov, 1973) precum și lucrările școlii de la Ruhr-Universität Bochum conduse de profesorul K.-H. Fasol: (Hoppe, 1981), (Müller, 1982), (Hoppe și Tešnjak, 1983), (Müller, 1984), (Pohl, 1988) ș.a.).

Observație: În conformitate cu notațiile utilizate și în (Precup, 1994), în cadrul tezei se va utiliza scrierea " x_0 " pentru valoarea marimii "x" corespunzătoare unui punct de funcționare staționară constantă (p.d.f.s.c.), " x_n " pentru valoarea nominală a marimii "x" și " \hat{x} " pentru creșterea normată (față de p.d.f.s.c.) a marimii "x":

$$\hat{x} = (x - x_0)/x_n. \quad (1.2.1.1)$$

1.2.2. Principiile de modelare matematică detaliată, de liniarizare și de reducere a ordinului

1.2.2.1. Modelarea matematică a sistemului hidraulic

(Sub)Sistemul hidraulic - cunoscut și sub denumirea de (sub)sistem aducțiune-turbina, SAT - transformă energia potențială a conținutului unei acumulări hidroenergetice în energie mecanică necesară acționării GS.

SAT admite ca marime de intrare deschiderea aparatului director y_w și ca marime de ieșire cuplul

mecanic C_m . Marimile interne esențiale ale SAT sunt caderea h și debitul de apă turbinat q ; ambele sunt dependente de deschiderea aparatului director y_w și determina puterea mecanică P_m /cuplul mecanic C_m furnizată/furnizat de turbina hidraulică (TH). Legăturile dintre marimi pot fi evidențiate conform schemei bloc din fig. 1.2.1.1. Din schema rezulta și împărțirea SAT în două blocuri informaționale: conducta de aducțiune sau sistemul de aducțiune a apei (SAA) și TH. La rândul său, TH poate fi descompusă în alte două blocuri aferente ecuațiilor de curgere prin turbina, respectiv de cuplu pentru turbina.

I. Modelarea matematică a sistemului de aducțiune a apei. A. Pentru aducțiuni cu conducte relativ scurte (cazul turbinelor axiale), pe baza următoarelor ipoteze simplificatoare:

- fluidul (apa) este incompresibil(a),
- peretele conductei este rigid,
- viteza de variație a debitului (derivata) \dot{q} este constantă pe o porțiune de conductă (scurtă) de lungime l ,

se poate stabili f.d.t. aferenta SAA (Hoppe și Tešnjak, 1983):

$$H_{h,q}(s) = \frac{\hat{h}(s)}{\hat{q}(s)} = -T_w s, \quad (1.2.1.1)$$

unde T_w se numește constanta de timp de curgere a apei (de exemplu, (Working Group, 1992)) și are expresia:

$$T_w = \frac{l q_n}{A g h_n}, \quad (1.2.1.2)$$

în care: q_n - debit nominal; h_n - caderea nominală; A - aria secțiunii transversale a conductei; g - accelerația gravitațională; l - lungimea conductei.

B. Pentru aducțiuni cu conducte mai lungi (cazul turbinelor Kaplan, Francis și Pelton), luarea în considerare a următoarele ipoteze simplificatoare:

- fluidul este compresibil,
- peretele conductei este elastic,

conduce la următoarea f.d.t. aferenta SAA (Hoppe și Tešnjak, 1983):

$$H_{h,q}(s) = \frac{\hat{h}(s)}{\hat{q}(s)} = - \frac{T_w}{T_L} \text{th}(T_L s), \quad (1.2.2.1)$$

unde T_L este constanta de timp asociată undeii de fluid cu expresia:

$$T_L = \frac{l}{a}, \quad (1.2.2.2)$$

iar a este viteza de curgere turbulenta.

Pe baza explicitarii tangentei hiperbolice și a definiții constantei de timp de reflexie T_R :

$$T_R = 2 T_L, \quad (1.2.2.1.5)$$

se obține o forma echivalenta pentru f.d.t. din relația (1.2.2.1.3):

$$H_{h,q}(s) = \frac{2 T_w \quad 1 - e^{-T_R s}}{T_R \quad 1 + e^{-T_R s}}, \quad (1.2.2.1.6)$$

Pentru realizabilitatea sistemului (1.2.2.1.6) printr-un sistem finit dimensional se utilizeaza aproximațiile de tip Padé ale funcției $e^{-T_R s}$ (Sydow, 1974), (Ionescu, 1985).

Substituirea în (1.2.2.1.6) a aproximației de tip Padé de ordinul (1+1) conform relației (1.1.4) (cu $T_m = T_R$) conduce la f.d.t. (1.2.2.1.1) aferenta SAA.

Substituirea în (1.2.2.1.6) a aproximației de tip Padé de ordinul (2+2) conform relației (1.1.5) (cu $T_m = T_R$) urmata de luarea în seama a unor considerente fizice (Hoppe și Tešnjak, 1983) ce impun inlocuirea factorului $(T_R^2/12)$ cu $(T_R/\pi)^2$ conduce la urmatoarea expresie a f.d.t. aferente SAA:

$$H_{h,q}(s) = \frac{\hat{h}(s)}{\hat{q}(s)} = \frac{T_w s}{1 + (T_R/\pi)^2 s^2}, \quad (1.2.2.1.7)$$

De observat ca utilizarea aproximației de tip Padé de ordinul (1+1) - poate cea mai frecvent utilizata - conduce la aceeași forma a f.d.t. aferente SAA indiferent de considerarea sau nu a ipotezelor compresibilitații fluidului (apei) și elasticitații peretelui conductei.

II. Modelarea matematica a turbinei hidraulice.

a) Ecuatia de curgere prin turbina. Ecuatia primara de curgere prin turbina are expresia (1.2.2.1.8):

$$q = f(y_\omega, \omega) \sqrt{2 g h}. \quad (1.2.2.1.8)$$

Prin liniarizare în jurul unui p.d.f.s.c. (marimile au indice inferior 0) și normare rezulta urmatoarea forma a ecuatiei de curgere prin TH:

$$\hat{q} = \alpha_{qy} \hat{y}_\omega + \alpha_{q\omega} \hat{\omega} + 0.5 K_{qh} \hat{h}, \quad (1.2.2.1.9)$$

unde parametrii α_{qy} și $\alpha_{q\omega}$ se deduc din diagramele Muschel (Hoppe și Tešnjak, 1983), iar parametrul K_{qh} are expresia (Müller, 1984):

$$K_{qh} = \frac{q_0 h_n}{q_n h_0}, \quad (1.2.2.1.10)$$

și caracterizeaza modificarea punctului de funcționare staționara constanta a amenajării.

b) Ecuatia momentului de rotație dezvoltat de TH. Forma primara a acestei ecuatiei este:

$$C_m = \eta q \rho g h / \omega, \quad (1.2.2.1.11)$$

în care: η - randamentul TH; ρ - densitatea fluidului (celelalte marimi au fost deja introduse).

Prin liniarizare în jurul unui p.d.f.s.c. și normare se obține următoarea formă a ecuației cuplului de rotație dezvoltat de TH:

$$\hat{C}_m = K_{\eta h} \hat{q} + K_{\eta q} \hat{h} + (K_{qh} \alpha_{\eta \omega} - K_{\eta qh}) \hat{\omega} + K_{qh} \alpha_{\eta y} \hat{y}_\omega, \quad (1.2.2.1.12)$$

unde parametrii $\alpha_{\eta \omega}$ și $\alpha_{\eta y}$ se deduc din diagramele Muschel, iar ceilalți parametri ce caracterizează modificările punctului de funcționare staționară constantă a turbinei au următoarele expresii:

$$K_{\eta h} = \frac{\eta_0 h_0}{\eta_n h_n}, \quad (1.2.2.1.13)$$

$$K_{\eta q} = \frac{\eta_0 q_0}{\eta_n q_n}, \quad (1.2.2.1.14)$$

$$K_{qh} = \frac{q_0 h_0}{q_n h_n}, \quad (1.2.2.1.15)$$

$$K_{\eta qh} = \frac{\eta_0 q_0 h_0}{\eta_n q_n h_n}. \quad (1.2.2.1.16)$$

Determinarea f.d.t. aferente SAT presupune, în continuare, efectuarea următoarelor operații:

- înlocuirea expresiei:

$$\hat{h}(s) = H_{h,q}(s) \hat{q}(s) \quad (1.2.2.1.17)$$

în (1.2.2.1.9), având drept rezultat dependența:

$$\hat{q}(s) = \frac{\alpha_{qy} \hat{y}_\omega(s) + \alpha_{q\omega} \hat{\omega}(s)}{1 - 0.5 K_{qh}^* H_{h,q}(s)}; \quad (1.2.2.1.18)$$

- înlocuirea expresiei (1.2.2.1.18) (cu $H_{h,q}(s)$ conform relației (1.2.2.1.1) sau (1.2.2.1.7)) în (1.2.2.1.12)

și introducerea notațiilor:

$$K_{\eta q} = K_{qh}^* K_{\eta h}, \quad (1.2.2.1.19)$$

$$\alpha_y = \alpha_{qy} K_{\eta h} + \alpha_{\eta y} K_{qh} \approx \alpha_{qy} K_{\eta h}; \quad (1.2.2.1.20)$$

- în final, f.d.t. aferente SAT obține expresiile (Müller, 1984):

$$H_{C_m, y_\omega}(s) = \frac{\hat{C}_m(s)}{\hat{y}_\omega(s)} \Bigg|_{\hat{\omega}=0} = \alpha_y \frac{1 - K_{qh}^* T_w s}{1 + 0.5 K_{qh}^* T_w s}, \quad (1.2.2.1.21)$$

valabile în condițiile incompresibilității fluidului și rigidității peretelui conductei, respectiv:

$$H_{C_m, \gamma_\omega}(s) = \frac{\hat{C}_m(s)}{\hat{y}_\omega(s)} \bigg|_{\hat{\omega}=0} = \alpha_\gamma \frac{1 - K_{qh} \cdot T_w s + (T_R/\pi)^2 s^2}{1 + 0.5 K_{qh} \cdot T_w s + (T_R/\pi)^2 s^2}, \quad (1.2.2.1.22)$$

valabila în condițiile compresibilității fluidului și elasticității peretelui conductei.

Observații: 1. F.d.t. din relațiile (1.2.2.1.21) și (1.2.2.1.22) corespund unor sisteme cu fază neminiună și fac ca PC aferent reglării turației unui hidrogenerator poate fi aproximat printr-un SFN.

2. În cele ce urmează, pentru exprimarea f.d.t. aferente SAT va fi utilizată doar relația (1.2.2.1.21), care asigură ca PC în ansamblu să poată fi modelat, cu bună aproximație, printr-un SFN2-IZP.

În cadrul studiului de caz reprezentat de reglarea turației unui HG al centralei hidroelectrice PdF 1 valorile constantelor de timp calculate în (Precup, 1994) pe baza datelor nominale ale amenajării conform (Nourescu și Vasiliu, 1974) sunt:

$$T_w = 2.2 \text{ sec}, T_L = 1.4 \text{ sec}, T_R = 2.8 \text{ sec}. \quad (1.2.2.1.23)$$

Pentru ceilalți doi parametri literatura recomandă următoarele valori uzuale (Hoppe și Tešnjak, 1983), (Preitl, 1988), (Working Group, 1992):

$$\alpha_\gamma \in [0.3; 1.3], K_{qh} \in [0.3; 1.3], \quad (1.2.2.1.24)$$

dependente de p.d.f.s.c. și de caracteristicile TH.

1.2.2.2. Modelarea matematică a sistemului generator sincron-sarcina

Pentru modelarea matematică pe cale analitică a SGS se pornește de la ecuațiile de funcționare ale mașinii sincrone sub forma introdusă de Park. La o astfel de modelare matematică SGS este prezentat de regula prin modelul matematic (MM) detaliat (de exemplu, (Anderson și Fouad, 1993) ș.a.).

Dependent de scopul urmărit, MM detaliat poate fi înlocuit prin modele matematice de ordin redus; prin luarea în considerare a unor ipoteze simplificatoare, efectuarea liniarizării în jurul unui p.d.f.s.c. și aplicarea reducerilor de ordin rezulta modele matematice cu diferite grade de simplificare. În vederea abordării diferitelor studii de caz, un astfel de calcul a fost parcurs și de autor în (Precup, 1994).

Pentru studiul SRA-V un MM liniarizat de ordinul întâi exprimat sub următoarea formă intrare-ieșire în domeniul timp (Müller, 1984):

$$\frac{d\hat{\omega}}{dt} + \alpha_\omega \hat{\omega} = \frac{1}{T_m} (\hat{C}_m - \hat{V}), \quad (1.2.2.2.1)$$

poate da rezultate bune; în relația (1.2.2.2.1) T_m este constanta de timp mecanică a rotorului GS; pentru hidrogeneratorul luat în considerare în cadrul studiului de caz acceptat T_m are valoarea:

$$T_m = 6.8 \text{ sec}. \quad (1.2.2.2.2)$$

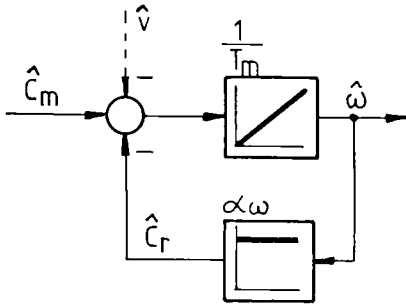
Parametrul α_ω , numit coeficient de autoreglare al rețelei, depinde de coordonatele p.d.f.s.c. în jurul cărora s-a efectuat liniarizarea și, în același timp, reprezintă o măsură a gradului de cuplare a GS la sistem

energetic (SE)/sarcina. α_ω poate lua urmatoarele valori dependent de regimul de funcționare al GS (a se vedea (Pivovarov, 1973) ș.a.):

a) $\alpha_\omega = 0$, pentru GS în gol (presincronizare); (1.2.2.2.3)

b) $\alpha_\omega \in (0; 1]$, pentru GS cuplat la SE. (1.2.2.2.4)

Valorile foarte mici ale lui α_ω corespund unui GS funcționând izolat pe o sarcina locala; valoarea lui α_ω crește pe masura ce crește gradul de cuplare a GS la SE.



Schema bloc informațională aferentă relației (1.2.2.2.1) este prezentată în fig.

1.2.2.2.1 (cu C_r - cuplul/momentul rezistent) și corespunde unui element de transfer de tip PT1 (pentru $\alpha_\omega > 0$) sau I (pentru $\alpha_\omega = 0$).

Pe baza modelului matematic intrare-ieșire (MM-II) în domeniul timp (1.2.2.2.1) se poate scrie imediat și expresia f.d.t. aferentă SGS:

Fig.1.2.2.2.1. Schema bloc informațională simplificată a canalului de viteză aferent SGS.

$$H_{\omega, C_m}(s) = \frac{\hat{\omega}(s)}{\hat{C}_m(s) \Big|_{\hat{v}=0}} = \frac{1}{\alpha_\omega + s T_m} \quad (1.2.2.2.5)$$

Observație: Pentru canalul de tensiune aferent SGS se poate găsi, de asemenea, un MM liniarizat de ordin redus, MM ce poate fi utilizat cu succes în studiile legate de SRA a tensiunii/excitației unui HG (SRA-Ex); un astfel de studiu vizând reglarea atât convențională cât și fuzzy a vitezei și tensiunii unui HG a fost întreprins de autor în (Precup, 1994) și reluat în alte lucrări legate direct sau indirect de SRA-Ex (Precup și Preitl, 1994a), (Precup și Preitl, 1995a).

1.2.3. Caracterizarea în operațional printr-un model matematic de ordin redus a procesului condus, încadrarea în bucla de reglare a turajiei

PC aferent SRA-V se compune din cele trei subsisteme ilustrate în fig. 1.2.1.2: elementul de execuție (EE), (sub)sistemul aducțiune-turbina (SAT) și (sub)sistemul generator sincron-sarcina (SGS).

În situația în care EE este stabilizat și corectat dinamic prin reacții locale, el devine parte componentă a RG-V de tip PDT3 (Preitl ș.a., 1983) cu doua constante de timp relativ mici, motiv pentru care poate fi aproximat printr-un element de transfer de tip PDT1 cu întârziere-anticipare numit adeseori (impropriu) RG-V de tip PI real.

În situația în care EE este "izolat" de RG-V propriu-zis (convențional sau nu), EE stabilizat are comportare globală de tip PT2 cu constantă de timp neglijabilă față de constantele de timp mari ale SAT sau SGS (Precup și Preitl, 1993); constanta de timp aferentă EE poate fi cuplata cu una din constantele de timp mari din "aval" (aferente SAT sau SGS), ceea ce determină ca EE să fie caracterizat în mărimi normate printr-o f.d.t. corespunzătoare unui element de transfer de tip proporțional cu coeficient de transfer unitar. În vederea surprinderii limitărilor fizice la nivelul RG-V și EE, EE va putea fi înlocuit din punct de vedere informațional cu un element neliniar de tip saturație (a se vedea și paragraful 1.2.1).

În consecință, schema bloc informațională simplificată aferentă SRA-V este prezentată în fig. 1.2.3.1 (v - perturbația echivalentă modificării puterii active). Mărimile marcate în figura sunt exprimate în creșteri normate; mărimile nemarcate introduse au menirea de a face legătura cu notațiile consacrate din cadrul unui SRA (Calin și Dumitrache, 1985), (Dragomir, 1986).

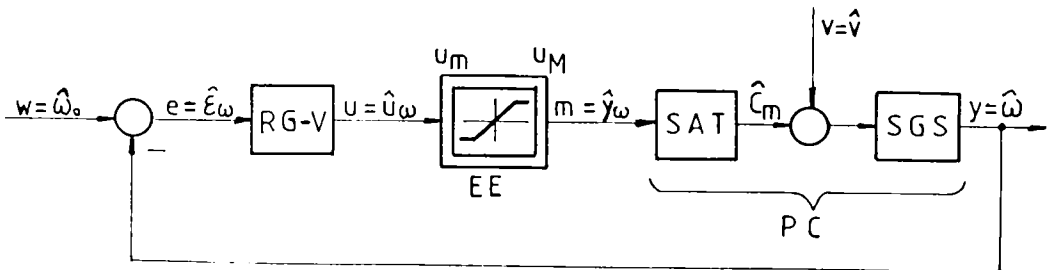


Fig. 1.2.3.1. Schema bloc informațională simplificată aferentă unui SRA-V.

Fig. 1.2.3.1 pune în evidență elementul neliniar de tip saturație legat de EE cu limitele $\{u_m, u_M\}$ și având următorul MM:

$$m = \begin{cases} u_m & \text{pentru } u \leq u_m, \\ u & \text{pentru } u_m < u < u_M, \\ u_M & \text{pentru } u \geq u_M. \end{cases} \quad (1.2.3.1)$$

Limitarea definită prin relația (1.2.3.1) corespunde regimului de mari perturbații. La mici perturbații PC poate fi considerat cu o bună aproximație liniară și limitarea va fi omisă. Studiul dezvoltat în continuare se referă la cazul liniar, fără limitări.

Reunind MM liniarizate în condițiile evidențiate la paragrafele 1.2.2.1 și 1.2.2.2 se obține următoarea expresie de aproximare pentru f.d.t. aferentă PC:

$$H_{PC}(s) = \alpha_v \frac{1 - K_{gh}^* T_w s}{1 + 0.5 K_{gh}^* T_w s} \frac{1}{\alpha_\omega + T_m s} \quad (1.2.3.2)$$

Observație: PC cu f.d.t. conform relației (1.2.3.2) reprezintă un SFN2-1ZP de forma generală (1.1.10), cu următoarea corespondența a parametrilor:

$$k_{PC} = \alpha_y, \alpha_3 = \alpha_\omega, T_1 = K_{qh}^* T_w, T_2 = 0.5 K_{qh}' T_w, T_3 = T_m. \quad (1.2.3.3)$$

După cum s-a menționat, structura de SRA-V prezentată în fig.1.2.3.1 cu f.d.t. a PC din relația (1.2.3.2) este frecvent acceptată în stadiul de dezvoltare a RG-V și în stadiul de testare a performanțelor de regim dinamic și staționar realizabile de SRA-V prin simulare pe calculator numeric (de exemplu, (Pivovarov, 1973), (Hoppe, 1981), (Müller, 1984), (Pohl, 1988), (Guzun ș.a., 1995) ș.a.); se menționează ca parametrii $\{\alpha_y, K_{qh}^*, \alpha_\omega\}$ depind continuu de coordonatele p.d.f.s.c. în jurul cărora s-a efectuat liniarizarea (a se vedea paragrafele 1.2.2.1 și 1.2.2.2).

Structura simplă evidențiată în fig.1.2.3.1 și utilizată în continuare în dezvoltarea reguletoarelor fuzzy nu surprinde deliberat MM aferente canalelor suplimentare ale RG-V utilizate în crearea statismului sau a altor funcții suplimentare ale RG-V. Acest lucru nu reduce însă câtuși de puțin valabilitatea concluziilor ce se pot obține.

Cap. II. ANALIZA CRITICĂ A UNOR STRUCTURI CLASICE DE SISTEME DE REGLARE AUTOMATĂ A PROCESELOR CU FAZĂ NEMINIMĂ ȘI DE PROIECTARE ALGORITMICĂ A REGULATOARELOR AFERENTE

2.1. Considerații generale. Indicatori de calitate

În baza celor prezentate în capitolul I, structura informațională luată în considerare la proiectarea algoritmică a regulatorului (RG) destinat conducerii unui SFN2-1ZP va fi cea prezentată în fig.2.1.1.

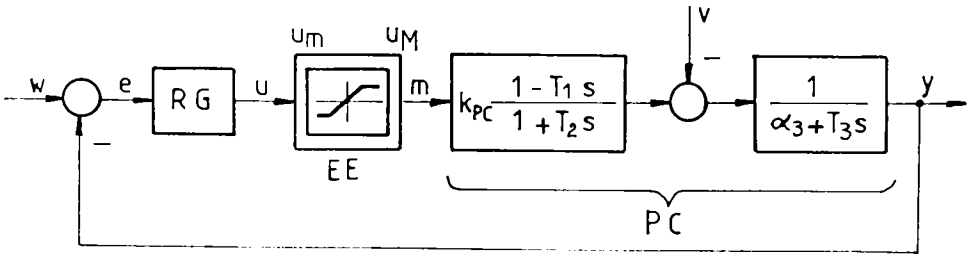


Fig.2.1.1. Schema bloc informațională aferentă SRA (în particular, SRA-V).

Marimile din fig.2.1.1 au semnificațiile cunoscute, f.d.t. aferentă PC este cea din relația (1.1.10), reluată sub forma:

$$H_{PC}(s) = \left. \frac{y(s)}{m(s)} \right|_{v=0} = k_{PC} \frac{1 - T_1 s}{(1 + T_2 s)(\alpha_3 + T_3 s)}, \quad (2.1.1)$$

iar despre parametri se fac referiri în paragraful 1.1.

În cadrul acestui capitol se analizează comportarea SRA ce are la baza schema din fig.2.1.1 și utilizează diferiți algoritmi de reglare (diferite regulatoare) și diferite metode clasice de acordare. Studiul întreprins are un dublu scop:

- efectuează o analiză critică asupra unor metode clasice de proiectare algoritmică (inclusiv proiectare optimă) a RG (în particular, un RG-V) în condițiile unui PC cu fază neminimă;
- constituie suport de comparație a soluțiilor de SRA cu variante clasice de regulatoare cu soluțiile de SRA cu regulatoare fuzzy, prin care să se valideze oportunitatea reglajului fuzzy în conducerea SFN.

Rezultatele proiectării algoritmice se verifică prin simulare pe calculator numeric (Matlab, 1987).

Criteriul de comparație (a diverselor soluții de SRA) luat în considerare este bazat pe aplicarea unui semnal de tip treaptă unitate $\sigma(t)$ pe intrarea de referință a SRA:

$$w(t) = \sigma(t), v(t) = 0, \quad (2.1.2)$$

sau pe intrarea de perturbație a SRA:

$$v(t) = \sigma(t), w(t) = 0, \quad (2.1.3)$$

și aprecierea indicatorilor de calitate empirici definiți în aceste răspunsuri.

Întrucât rezultatele se refera la regimul de mici perturbații în jurul unui p.d.f.s.c., semnalele din relațiile (2.1.2) și (2.1.3) sunt considerate în valori normate. În aceste condiții se poate suspenda efectul de limitare la nivelul EE, care poate fi considerat ca element de transfer de tip proporțional având coeficient de transfer unitar.

Influența modificării parametrilor PC ca sistem cu faza neminimă asupra comportării SRA se va urmări prin alurile răspunsurilor indiciale în raport cu referința w în următoarele condiții:

a) modificări ale parametrului k_{PC} :

$$k_{PC} = 1.25, \quad (2.1.4)$$

$$k_{PC} = 0.75, \quad (2.1.5)$$

valoarea "nominală" a lui k_{PC} fiind:

$$k_{PC} = 1; \quad (2.1.6)$$

b) modificări ale constantelor de timp T_1 și T_2 :

$$T_1 = 1.25 T_{1n}, T_2 = 1.25 T_{2n}, \quad (2.1.7)$$

$$T_1 = 0.75 T_{1n}, T_2 = 0.75 T_{2n}, \quad (2.1.8)$$

în condițiile următoarei relații între valorile "nominale" ale celor două constante de timp (a se vedea și relația (1.1.11)):

$$T_{2n} = 0.5 T_{1n}; \quad (2.1.9)$$

c) modificări ale parametrului α_3 :

$$\alpha_3 = 0.5, \quad (2.1.10)$$

$$\alpha_3 = 0, \quad (2.1.11)$$

fața de valoarea "nominală" a parametrului α_3 :

$$\alpha_3 = 1. \quad (2.1.12)$$

Studiul dezvoltat relativ la structura de SRA-V s-a referit la trei variante de proiectare algoritmică a RG-V. Pentru diferite valori ale parametrilor PC și diferite tipuri de regulatoare simulările efectuate au condus la patru aluri tipice ale răspunsurilor indiciale în raport cu w prezentate în fig.2.1.2 și notate cu A, B, C și D. Aceste aluri de răspunsuri se deosebesc prin:

- A - prezența unui maxim ca prim extrem, cu abaterea σ_1 de la valoarea de regim staționar (VRSC) a ieșirii reglate y ;
- B - prezența unui maxim și a unui minim (cu abaterea σ_2 (în valoare absolută) de la VRSC a lui y) ca prime extreme, cu $\sigma_1 > \sigma_2$;
- C - aperiodic;
- D - prezența unui minim ca prim extrem, cu abaterea σ_2 (în valoare absolută) de la VRSC a lui y .

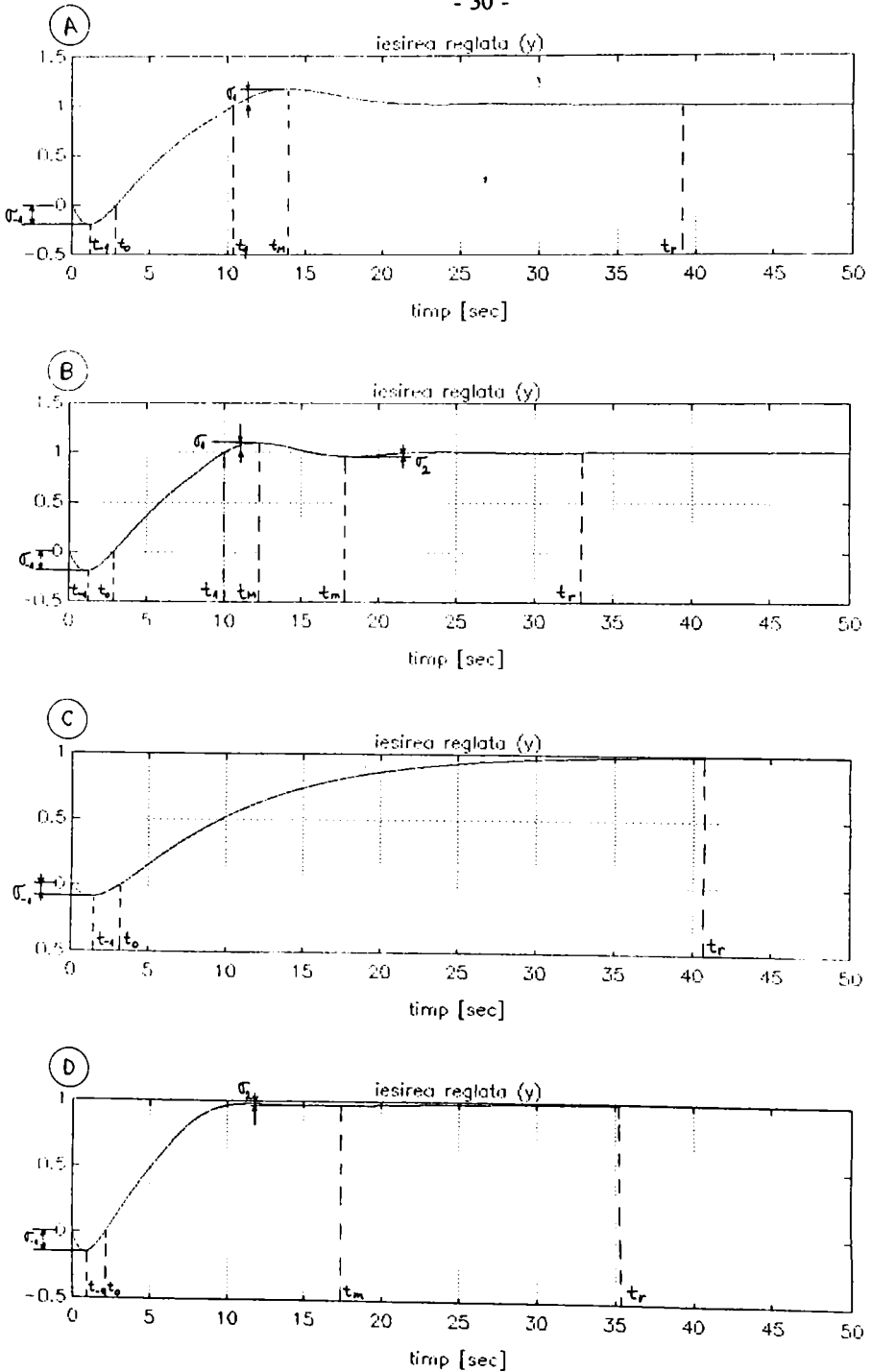


Fig.2.1.2. Raspunsuri indiciuale aferente SRA in raport cu w de tip: A, B, C, D.

În același context, se manifesta și doua aluri tipice ale răspunsului indicial aferente SRA în raport cu perturbația v prezentate în fig.2.1.3 și notate cu a și b; între cele doua aluri tipice se manifesta urmatoarele deosebiri:

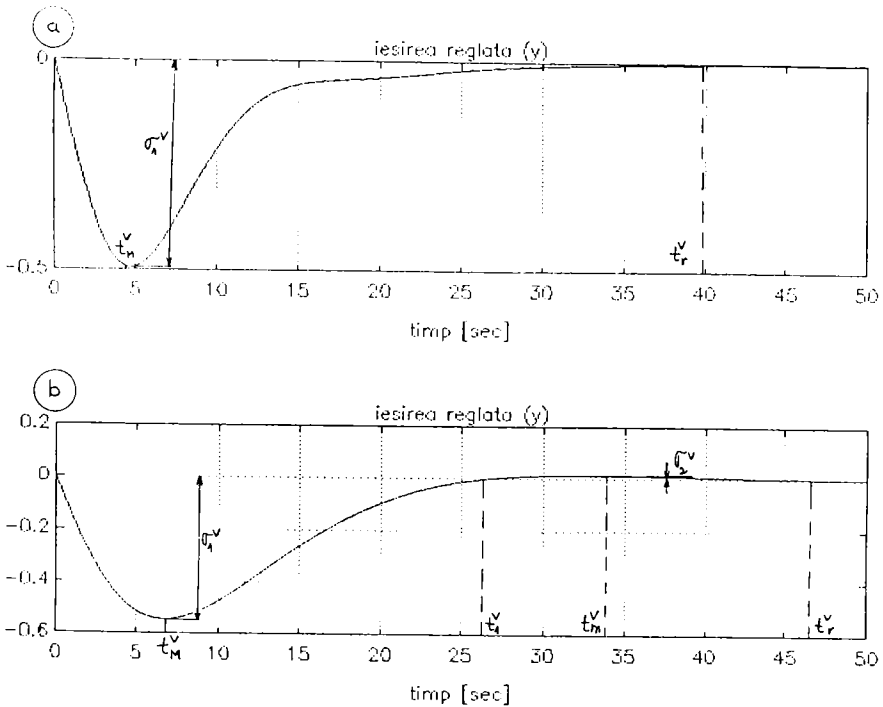


Fig.2.1.3. Raspunsuri indiciale aferente SRA în raport cu v de tip a și b.

- a - prezența unui minim ca prim extrem, cu abaterea σ_1^v (în valoare absoluta) de la VRSC a lui y ;
- b - prezența unui minim și a unui maxim (cu abaterea σ_2^v de la VRSC a lui y) ca prime extreme, cu $\sigma_1^v > \sigma_2^v$.

Raspunsurile prezentate în fig.2.1.2 și 2.1.3 au fost simulate pe un interval de timp de 50 sec care s-a dovedit acoperitor pentru punerea în evidența a performanțelor realizate de SRA.

Performanțele diferitelor variante de SRA au fost analizate pe baza indicatorilor de calitate empirici definiți în raspunsurile aferente, specifici SRA cu faza neminima (Preitl ș.a., 1996):

- σ_1 - subreglajul;
- t_1 - momentul producerii lui σ_1 ;
- t_0 - timpul de revenire;

t_1, t_1^v - timpul de prima reglare;

σ_1, σ_1^v - suprareglajul;

t_M, t_M^v - timpul primului maxim;

σ_2, σ_2^v - abaterea primului minim de la VRSC a lui y (în valoare absoluta);

t_m, t_m^v - timpul primului minim;

t_r, t_r^v - timpul de reglare definit pentru o zonă de liniștire de $\pm 2\%$ față de VRSC a lui y .

Este important de menționat faptul ca indicatorii de calitate empirici sunt utilizați frecvent în studiul comportării SRA cu RG-F (a se vedea în acest sens lucrările (Berenji ș.a., 1991), (De Silva, 1991), (Boverie ș.a., 1991), (Boverie ș.a., 1992), (De Geest ș.a., 1993), (Kortmann, 1995)); în cazul de față, ținând seama de caracterul de sistem cu faza neminimă al PC, setul de indicatori este însă mai complet.

Cu referire la reglarea turației unui HG, prin prisma relațiilor de legătură (1.2.3.3) se constată ca modificările parametrilor PC $\{k_{PC}, T_2, \alpha_3\}$ corespund la:

a) modificări ale parametrului α_y :

$$\alpha_y = 1.25, \quad (2.1.15)$$

$$\alpha_y = 0.75, \quad (2.1.16)$$

față de valoarea "nominală" a lui α_y :

$$\alpha_y = 1, \quad (2.1.17)$$

care pot fi cauzate de mai mulți factori:

- creșterea, respectiv scăderea cu circa 25 % a caderii,
- creșterea, respectiv scăderea cu circa 25 % a randamentului TH;

b) modificări ale parametrului K_{qh}^* :

$$K_{qh}^* = 1.25, \quad (2.1.18)$$

$$K_{qh}^* = 0.75, \quad (2.1.19)$$

valoarea "nominală" a lui K_{qh}^* fiind:

$$K_{qh}^* = 1, \quad (2.1.20)$$

care se pot datora:

- creșterii, respectiv scăderii cu circa 25 % a caderii,
- creșterii, respectiv scăderii cu circa 25 % a debitului turbinat;

c) modificări ale parametrului α_ω :

$$\alpha_\omega = 0.5; \quad (2.1.21)$$

$$\alpha_\omega = 0, \quad (2.1.22)$$

pentru următoarea valoare "nominală" a lui α_ω :

$$\alpha_\omega = 1, \quad (2.1.23)$$

care sunt cauzate de reducerea sensibilă a gradului de cuplare a HG la SE, respectiv unui HG funcționând în gol (presincronizare).

Valorile "nominale" ale constantelor de timp aferente PC luate în considerare în cadrul tezei pentru studiul de caz al reglării turației unui HG de la PdF 1 sunt (a se vedea relațiile (1.2.2.1.23) și (1.2.2.2.2)):

$$T_w = 2.2 \text{ sec}, T_m = 6.8 \text{ sec}. \quad (2.1.24)$$

În cazul metodelor clasice de proiectare, RG-V se proiectează algoritmic pentru un regim "nominal" sau foarte apropiat de acesta pentru care valorile parametrilor sunt ((Pivovarov, 1973), (Hutarew, 1979), (Müller, 1984) ș.a.):

$$\alpha_y = K_{qh}^* = \alpha_\omega = 1. \quad (2.1.25)$$

Regimul descris de relația (2.1.25) poate avea următoarea interpretare fizică (prezentată detaliat în referatele (Precup, 1994) și (Precup, 1995a)):

- debitul turbinat este egal cu valoarea nominală a debitului;
- caderea este egală cu valoarea nominală a caderii;
- valoarea randamentului este egală cu cea nominală;
- HG este cuplat la un sistem energetic de putere foarte mare, când pentru α_ω se poate considera valoarea $\alpha_\omega = 1$.

Soluțiile clasice de conducere a PC cu faza neminimă conform fig.2.1.1 supuse analizei au fost următoarele:

- structura de SRA convențională cu regulator tipizat de tip PI (RG-PI) proiectat:
 - în domeniul pulsație (în paragraful 2.2.1),
 - cu utilizarea unor criterii de optimizare (în paragraful 2.2.2);
- structura de SRA bazat pe urmărirea unui model matematic de referință al PC (în paragraful 2.2.3).

Pentru studiul de caz acceptat reglatoarele se proiectează algoritmic considerând regimul "nominal" caracterizat de valorile parametrilor PC conform relației (2.1.25).

Performanțele realizate de SRA se verifică în următoarele condiții:

- se aplică semnal de tip treapta unitate (2.1.2) pe intrarea de referință a SRA în regimurile caracterizate de următoarele valori ale parametrilor PC:

1. $\alpha_y = K_{qh}^* = \alpha_\omega = 1$ (regimul "nominal");
2. $\alpha_y = 1.25$, $K_{qh}^* = \alpha_\omega = 1$;
3. $\alpha_y = 0.75$, $K_{qh}^* = \alpha_\omega = 1$;
4. $K_{qh}^* = 1.25$, $\alpha_y = \alpha_\omega = 1$;
5. $K_{qh}^* = 0.75$, $\alpha_y = \alpha_\omega = 1$;
6. $\alpha_\omega = 0.5$, $\alpha_y = K_{qh}^* = 1$;
7. $\alpha_\omega = 0$, $\alpha_y = K_{qh}^* = 1$;

- se aplică semnal de tip treapta unitate (2.1.3) pe intrarea de perturbație a SRA în regimul "nominal".

Criteriul de comparare și evidențiere a "celui mai bun" comportament realizat de SRA - aplicat pe

întreg parcursul tezei - are la baza următoarele principii (general acceptate):

- comportamentul în raport cu modificarea referinței este cu atât mai bun cu cât sunt mai scăzute valorile indicatorilor de calitate σ_{t_1} , t_{t_1} , t_0 , σ_t și t_r ($\sigma_t = 0$ pentru raspunsuri aperiodice);
- comportamentul în raport cu modificarea perturbației este cu atât mai bun cu cât sunt mai scăzute valorile indicatorilor de calitate σ_t^* , t_M^* , și t_r^* ;
- comportamentul în raport cu modificările parametrilor PC este cu atât mai bun cu cât:
 - a) în cazul utilizării unui regulator convențional (liniar): rezerva de fază φ_r are variații mai scăzute de la un regim la altul (este vorba despre regimurile 1 ... 7 prezentate anterior),
 - b) în cazul unui regulator fuzzy (neliniar): se realizează cel mai bun comportament în raport cu w în regimurile 2 ... 7.

2.2. Structuri clasice de conducere a sistemelor cu fază neminimă și variante de proiectare algoritmică a reguletoarelor aferente

2.2.1. Structura de reglare automată convențională cu regulator de tip PI. Varianta de proiectare în domeniul pulsație

La proiectarea reguletoarelor pentru SRA cu fază neminimă apar dificultăți - legate de valoarea scăzută a rezervei de fază și de variația parametrilor PC (a se vedea paragraful 1.1) - a caror soluționare prin metode clasice este doar parțială. Totuși, determinarea parametrilor RG prin proiectare în domeniul pulsație (frecvență) cu utilizarea caracteristicilor logaritmice de pulsație (c.l.p.) este frecvent aplicată în literatura ((Pivovarov, 1973), (Müller, 1984) ș.a.) deoarece:

- poate utiliza chiar și c.l.p. obținute experimental,
- asigură o rezerva de fază φ , corespunzătoare, care poate garanta stabilitatea SRA la modificări ale parametrilor PC.

După cum se cunoaște, la proiectarea în domeniul frecvență cu utilizarea c.l.p. se pleacă de la funcția de răspuns la pulsație aferentă sistemului deschis $H_0(j\omega)$, obținută pe baza relației:

$$H_0(j\omega) = H_0(s) \Big|_{s=j\omega}, \quad \omega \in [0, \infty), \quad (2.2.1.1)$$

în care $H_0(s)$ este f.d.t. aferentă sistemului deschis definită astfel:

$$H_0(s) = H_R(s) H_{PC}(s). \quad (2.2.1.2)$$

În relația (2.2.1.2) s-au folosit notațiile: $H_R(s)$ - f.d.t. aferentă RG; $H_{PC}(s)$ - f.d.t. aferentă procesului condus cu expresia prezentată în relația (2.1.1).

Cele două c.l.p. aferente sistemului deschis implicate în proiectare sunt:

- caracteristica amplitudine-pulsație (c.a.p.):

$$|H_0(j\omega)|_{dB} = 20 \lg |H_0(j\omega)| = g_{01}(\lg \omega), \quad (2.2.1.3)$$

- caracteristica faza-pulsație (c.f.p.):

$$\angle H_0(j\omega) = \arg H_0(j\omega) = g_{02}(\lg \omega). \quad (2.2.1.4)$$

În mod uzual, performanțele impuse se dau sub forma:

- condiția de rezerva de faza: $\varphi_r \approx 55^\circ$ ($50^\circ \dots 65^\circ$); mai general, pentru SFN în (Pivovarov, 1973) se accepta și $\varphi_r = 30^\circ \dots 45^\circ$;
- condiția referitoare la c.a.p.: aceasta sa taie (daca e posibil) axa $\lg \omega$ o singura data pentru pulsația de taiere ω_i , iar în dreptul lui ω_i pe un domeniu de ± 12 dB în jurul lui $|H_0(j\omega_i)|_{dB}$ panta c.a.p. sa fie de -20 dB/dec;
- condiția de rapiditate a SRA: $\omega_i > \omega_{min}$, care este uneori impusa și alteori verificata.

Proiectarea cu utilizarea c.l.p. parcurge etapele clasice cunoscute legate de:

- trasarea c.l.p. aferente PC;
- alegerea unui regulator tipizat și, eventual, filtru care poate (pot) sa asigure performanțele dorite/impuse;
- reprezentarea grafica a c.l.p. și alegerea adecvata a parametrilor RG și, eventual, filtrului astfel încât sa fie asigurate performanțele impuse.

Observație: Este de remarcat faptul ca principiul compensarii constantelor de timp mari ale procesului condus prin constantele de timp de la numarul f.d.t. a regulatorului - utilizat pe larg la SRA cu faza minima - da și în acest caz o buna satisfacție. Dar, nu este de neglijat nici ideea supracompensarii, care în acest caz poate conduce la performanțe îmbunatațite.

Concretizând pentru PC de tip SFN2-1ZP cu f.d.t. din relația (2.1.1), la proiectarea în domeniul pulsație a RG performanțele impuse SRA se dau sub forma: $\gamma_n = 0$ (statismul natural al SRA sa fie nul urmând ca statismul solicitat de funcționarea generatorului cuplat la SE sa fie asigurat printr-o legatura de compensare după puterea activa P sau după deschiderea aparatului director y_ω); $\varphi_r = 50^\circ \dots 60^\circ$ (rezerva de faza sa fie suficient de buna).

Pe baza c.l.p. ale PC având alurile de forma celor prezentate în fig.1.1.2 se constata ca un RG de tip PI cu f.d.t.:

$$H_R(s) = k_R \left(1 + \frac{1}{s T_1} \right) \quad (2.2.1.5)$$

poate asigura sistemului de reglare automata performanțele impuse.

Constanta de timp de integrare T_1 se impune pe baza principiului compensarii constantelor de timp mari ale PC de catre regulator. Presupunând:

$$\alpha_3 \neq 0, T_2 \leq T_3/\alpha_3, \quad (2.2.1.6)$$

rezulta:

$$T_1 = T_3/\alpha_3. \quad (2.2.1.7)$$

Coefficientul de transfer k_R se determina din condiția de rezerva de faza de valoare dorita.

Pentru studiul de caz constituit de reglarea turației unui HG de la PdF I valorile parametrilor PC sunt conform relațiilor (2.1.24) și (2.1.25). Aplicarea principiului compensării fixeaza valoarea lui T_i :

$$T_i = T_m = 6.8 \text{ sec.} \quad (2.2.1.8)$$

În condițiile compensării "perfecte", f.d.t. a sistemului deschis va avea expresia:

$$H_0(s) = k_R \frac{1 - 2.2 s}{6.8 s (1 + 1.1 s)} \quad (2.2.1.9)$$

Din condiția de rezerva de faza de valoare dorita rezulta apoi:

$$k_R = 1.1. \quad (2.2.1.10)$$

C.i.p. aferente sistemului deschis caracterizat prin f.d.t. $H_0(s)$ din relația (2.2.1.9), cu k_R conform relației (2.2.1.10), sunt prezentate în fig.2.2.1.1.

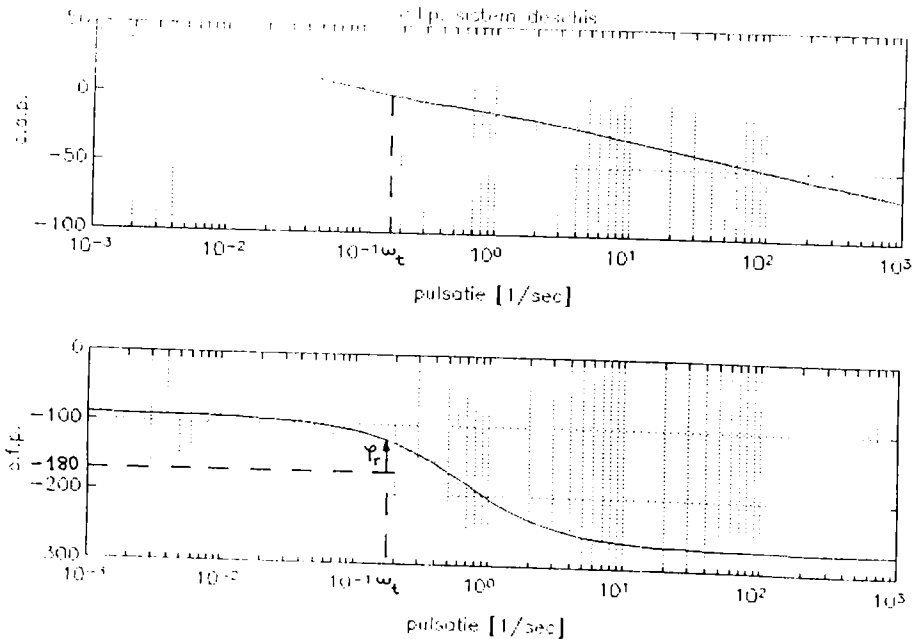


Fig.2.2.1.1. C.i.p. aferente sistemului deschis caracterizat prin f.d.t. (2.2.1.9) și k_R conform relației (2.2.1.10)

Se observa ca pulsația de taiere are valoarea:

$$\omega_1 \approx 0.17 \text{ sec}^{-1}$$

(2.2.1.11)

Performanțele în raport cu modificarea de tip treapta unitate a referinței realizate de SRA proiectat algoritmic în domeniul pulsație sunt prezentate sintetic în tabelul 2.2.1.1, în următoarele condiții:

- RG este proiectat pentru regimul "nominal" (numărul curent 1);
- se admit diferite modificări ale parametrilor PC conform regimurilor 2 ... 7 (prezentate în paragraful 2.1), care au același număr curent în tabel.

Tabelul 2.2.1.1. Performanțele SRA proiectat în domeniul pulsație definite în răspunsul indicial în raport cu w.

| Nr. crt. | Parametri PC | Tip de răspuns | Indicatori de calitate | | | |
|----------|---|----------------|------------------------|----------------|----------------|-------------|
| | | | φ_r [°] | $t_{.1}$ [sec] | σ_1 [%] | t_o [sec] |
| 1 | $\alpha_y = K_{qn}^* = \alpha_\omega = 1$ | A | 58.9 | 2.7 | 20.78 | 3.5 |
| 2 | $\alpha_y = 1.25$ $K_{qn}^* = \alpha_\omega = 1$ | A | 56.3 | 2.55 | 26.35 | 3.4 |
| 3 | $\alpha_y = 0.75$ $K_{qn}^* = \alpha_\omega = 1$ | A | 60.2 | 3.25 | 18.42 | 3.95 |
| 4 | $K_{qn}^* = 1.25$ $\alpha_y = \alpha_\omega = 1$ | A | 51.8 | 3.15 | 26.64 | 4.25 |
| 5 | $K_{qn}^* = 0.75$ $\alpha_y = \alpha_\omega = 1$ | C | 69.1 | 2.05 | 14.36 | 2.5 |
| 6 | $\alpha_\omega = 0.5$ $\alpha_y = K_{qn}^* = 1$ | B | 37.7 | 1.7 | 21.73 | 3.15 |
| 7 | $\alpha_\omega = 0$ $\alpha_y = K_{qn}^* = 1$ | B | 17.2 | 2.75 | 23.1 | 3.4 |

Tabelul 2.2.1.1. Continuare.

| Nr. crt. | Indicatori de calitate | | | | | |
|----------|------------------------|----------------|-------------|-------------|----------------|-------------|
| | t_m [sec] | σ_1 [%] | t_1 [sec] | t_m [sec] | σ_2 [%] | t_r [sec] |
| 1 | 14.45 | 9.26 | 11.15 | - | - | 24.3 |
| 2 | 11.05 | 17.55 | 7.65 | - | - | 20.35 |
| 3 | 13.5 | 8.5 | 10.25 | - | - | 27.5 |
| 4 | 15.1 | 22.07 | 11 | - | - | 30.5 |

| | | | | | | |
|---|-------|-------|------|-------|------|-------|
| 5 | - | - | - | - | - | 15.25 |
| 6 | 13.75 | 39.36 | 8.55 | 30.2 | 3.2 | 41.7 |
| 7 | 14.25 | 93.33 | 7.7 | 29.45 | 38.1 | 55.5 |

În raport cu modificarea de tip treapta unitate a perturbației se obține un răspuns de tip a caracterizat prin următorii indicatori de calitate: $t_M^* = 6.5$ sec, $\sigma_1^* = 51.04$ %, $t_r^* = 28.5$ sec.

2.2.2. Structura de reglare automata convenționala cu regulator de tip PI. Variante de acordare optimala a parametrilor regulatorului

Acordarea optimala a parametrilor reguletoarelor în cazul caracterizării în limbaj intrare-ieșire, cunoscuta în literatura și sub denumirea de optimizare parametrica a regimurilor dinamice ale unui SRA, reprezintă o varianta cunoscuta de proiectare algoritmica având avantajele cunoscute (de exemplu, (Calin ș.a., 1979)):

- funcțiile obiectiv (criteriu) integrale pot asigura optimizarea regimurilor dinamice provocate atât de variații ale referinței cât și de variații ale perturbației;
- expresiile funcțiilor obiectiv patratice pot fi obținute direct pornind de la f.d.t. aferenta sistemului și de la transformata Laplace a referinței sau perturbației;
- combinarea funcțiilor obiectiv de diferite forme este relativ simpla, rezultând funcții obiectiv de polioptimizare.

În cadrul acestui paragraf al tezei se utilizeaza următorii indicatori de calitate integrali (funcții obiectiv):

$$J_1^* = \int_0^{\infty} e^2(t) dt, \tag{2.2.2.1}$$

$$J_2^* = \int_0^{\infty} [e^2(t) + T_p^2 \ddot{e}^2(t)] dt, \tag{2.2.2.2}$$

$$J_3^* = \int_0^{\infty} [e^2(t) + m_p^2 (u(t) - u_{\infty})^2] dt, \tag{2.2.2.3}$$

$$J_4^* = J_1^* + \nu_p \frac{\partial J_1^*}{\partial T_2} \Big|_{k_{PC}=\alpha_3=1, T_{2n}=0.5T_{1n}}, \tag{2.2.2.4}$$

$$J_5^* = J_1^* + \mu_p \frac{\partial J_1^*}{\partial \alpha_3} \Big|_{k_{PC}=\alpha_3=1, T_{2n}=0.5T_{1n}}, \tag{2.2.2.5}$$

$$J_6^a = J_1^a + \theta_p \left. \begin{array}{l} \frac{\partial J_1^a}{\partial k_{PC}} \end{array} \right|_{k_{PC}=\alpha_3=1, T_{2n}=0.5T_{1n}}, \quad (2.2.2.6)$$

Prin u_w în relația (2.2.2.3) s-a marcat valoarea de regim staționar constant (prescurtat, VRSC) a comenzii $u(t)$ corespunzătoare valorilor "nominale" ale parametrilor PC.

În relațiile anterior prezentate prin indicele superior alocat "a" se surprinde mărimea de intrare în raport cu care se efectuează optimizarea, $a \in \{w, v\}$; astfel: $a = w$ dacă se aplică semnal de tip treapta unitate pe intrarea de referință conform relației (2.1.2) rezultând funcțiile obiectiv J_i^w , $i = 1 \dots 6$, $a = v$ dacă se aplică semnal de tip treapta unitate pe intrarea de perturbație conform relației (2.1.3) rezultând funcțiile obiectiv J_i^v , $i = 1 \dots 6$.

Principial se pot considera și alte forme de variație ale semnalelor de intrare, care nu schimbă esențial punerea problemei ci doar relațiile de evaluare a integralelor. În (Calin ș.a., 1979) se menționează ca optimizarea în raport cu variațiile de tip treapta ale intrărilor w și v va asigura o comportare relativ bună a SRA și în raport cu alte forme de variație ale celor două intrări.

Scopul studiului efectuat îl constituie faptul că da recomandări privind alegerea indicatorilor de calitate integrali care să garanteze "cele mai bune" performanțe realizate de SRA din punct de vedere al criteriului de comparare menționat în paragraful 2.1.

Pentru aplicația de reglare a turajului unui HG funcțiile obiectiv din relațiile (2.2.2.4) .. (2.2.2.6) se transformă respectiv în:

$$J_4^a = J_1^a + v_p \left. \begin{array}{l} \frac{\partial J_1^a}{\partial K_{qh}^*} \end{array} \right|_{\alpha_y = K_{qh}^* = \alpha_\omega = 1}, \quad (2.2.2.7)$$

$$J_5^a = J_1^a + \mu_p \left. \begin{array}{l} \frac{\partial J_1^a}{\partial \alpha_\omega} \end{array} \right|_{\alpha_y = K_{qh}^* = \alpha_\omega = 1}, \quad (2.2.2.8)$$

$$J_6^a = J_1^a + \theta_p \left. \begin{array}{l} \frac{\partial J_1^a}{\partial \alpha_y} \end{array} \right|_{\alpha_y = K_{qh}^* = \alpha_\omega = 1} \quad (2.2.2.9)$$

Coefficienții de ponderare strict pozitivi T_p , m_p , v_p , μ_p și θ_p din relațiile (2.2.2.2) ... (2.2.2.9) au valori care se aleg pe baza experienței proiectantului.

Referitor la utilizarea acestor indicatori de calitate pot fi făcute următoarele precizări menționate în literatura (pentru sisteme cu fază minimă):

J_1^a - este cunoscut sub denumirea de Integral of Squared Error (ISE) și asigură un regim tranzitoriu foarte bun cu limitarea patratului erorii de reglare (Calin ș.a., 1979);

J_2^a - asigură suplimentar în raport cu J_1^a și limitarea valorii derivatei erorii de reglare $\dot{e}(t)$ având ca efect

reducerea valorii supreglajului σ_1 și, eventual, a subreglajului σ_2 ;

J_3^* - reprezintă un indicator de polioptimizare, care asigură reducerea eforturilor la nivelul mărimii de comandă $u(t)$;

J_4^* , J_5^* și J_6^* - sunt indicatori de calitate complecși care țin seama pe lângă limitarea patratului erorii de reglare și de reducerea sensibilității comportării SRA în raport cu modificările parametrilor T_2 , k_{PC} și respectiv α_3 (în particular este vorba despre K_{qb}^* , α_y și respectiv α_ω).

În literatura se cunosc unele studii mai restrânse referitoare la optimizarea SFN cu un RG-PDTI specific RG-V clasice și, adeseori, numai în raport cu perturbația (Plessmann, 1967), (Stein, 1972), (Preitl, 1987), (Preitl și Daday, 1987). Studiul întreprins de autor ia în considerare un RG-PI (utilizat mai nou ca RG-V) și efectuează optimizarea - pe baza utilizării setului de funcții obiectiv (2.2.2.1) ... (2.2.2.6) - atât în raport cu perturbația, cât și în raport cu referința.

Toți indicatorii de calitate integrali prezentați se calculează în punctele "nominale" caracterizate de valorile "nominale" ale parametrilor PC conform paragrafului 2.1.

Indicatorii de calitate specificați se evaluează prin metoda Hall-Phillips-Newton bazată pe egalitățile lui Parseval (de exemplu, (Calin ș.a., 1979), (Dragomir, 1987) ș.a.):

$$J_i^* = \int_0^\infty f^2(t) dt = \frac{1}{2\pi} \int_{-j\infty}^{j\infty} F(s) F(-s) ds, \quad (2.2.2.10)$$

$i = 1 \dots 6$, $a \in \{w, v\}$, în care: $f(t)$ reprezintă funcțiile din membrul drept al relațiilor (2.2.2.1) ... (2.2.2.9) (integranzii) și care trebuie să satisfacă:

$$\lim_{t \rightarrow \infty} f(t) = 0; \quad (2.2.2.11)$$

$F(s)$ reprezintă transformata Laplace a funcției (original) de timp $f(t)$ și are expresia rațională strict proprie:

$$F(s) = \frac{\sum_{\mu=0}^m b_\mu s^\mu}{\sum_{v=0}^n a_v s^v}, \text{ cu } m < n. \quad (2.2.2.12)$$

În expresiile coeficienților b_μ ($\mu = 0 \dots m$) și a_v ($v = 0 \dots n$) apar parametrii RG (în raport cu care se realizează optimizarea comportării SRA) k_R și T_1 , ca necunoscute.

În etapele cunoscute de calcul al parametrilor de acordare ai RG trebuie evidențiate câteva aspecte cărora un utilizator trebuie să le acorde atenție sporită:

1. Este necesar un studiu care să recomande un anumit indicator de calitate de optimizat în cazul SFN

întrucât în literatura se fac doar referiri sporadice la utilizarea unuia sau altuia din acești indicatori.

2. La optimizarea regimurilor dinamice în raport cu o marime de intrare trebuie verificata comportarea SRA în raport cu ambele marimi de intrare.

3. Alegerea valorilor coeficienților de ponderare T_p , m_p , v_p , μ_p sau θ_p va influența în final comportarea SRA.

Datorita complexității funcțiilor obiectiv J_i^* , $i = 1 \dots 6$, $a \in \{w, v\}$, în cadrul tezei la determinarea valorilor optime ale parametrilor $\{k_R, T_i\}$ s-a optat pentru aplicarea unei metode numerice de tip Gauss-Newton (de exemplu, (Dancea, 1976), (Sima și Varga, 1986)).

5. Un aspect important de altfel la toate problemele de reglare optima îl constituie impunerea condițiilor de stabilitate a SRA. Aceste condiții fac ca problema de optimizare inițiala fara restricții sa se transforme într-o problema cu restricții de tip inegalitate, care se fixeaza prin aplicarea criteriului Hurwitz (de exemplu, (Rasvan, 1987), (Voicu, 1986) ș.a.) (proiectarea algoritmică a RG se face presupunând - după cum s-a menționat în paragraful 1.2.3 - ca SRA este liniar (adica u nu intra în limitare)).

În cadrul tezei se prezintă sintetic doar rezultatele optimizării SRA pentru studiul de caz al reglării turajiei hidrogenatorului de la PdF 1 (pe scurt, optimizarea RG-V din cadrul SRA-V). Calculele detaliate utilizând pachetul de programe Matlab (Matlab, 1989) au fost efectuate de autor și sunt cuprinse în detaliu în cel de-al doilea referat (Precup, 1995a).

a) Cazul funcției obiectiv $J_1^* = \int_0^{\infty} e^2(t) dt.$

Prin minimizarea lui J_1^* rezulta urmatoarele valori optime ale parametrilor RG:

$k_R = 1.6039, T_i = 9.844 \text{ sec},$ (2.2.2.13)

iar performanțele SRA optimizat în raport cu variația de tip treapta unitate a referinței sunt prezentate în tabelul 2.2.2.1.

Tabelul 2.2.2.1. Performanțele SRA optimizat după J_1^* definite în răspunsul indicial în raport cu w.

| Nr. crt. | Parametri PC | Tip de răspuns | Indicatori de calitate | | | |
|----------|--|----------------|------------------------|-----------------------|-----------------|--------------------|
| | | | $\phi_r [^\circ]$ | $t_{-1} [\text{sec}]$ | $\sigma_1 [\%]$ | $t_0 [\text{sec}]$ |
| 1 | $\alpha_y = K_{qh}^* = \alpha_w = 1$ | A | 57.7 | 2.85 | 23.54 | 3.6 |
| 2 | $\alpha_y = 1.25$ $K_{qh}^* = \alpha_w = 1$ | A | 55.9 | 2.7 | 27.63 | 3.75 |
| 3 | $\alpha_y = 0.75$ $K_{qh}^* = \alpha_w = 1$ | A | 59.7 | 3.4 | 21.39 | 4.15 |
| 4 | $K_{qh}^* = 1.25$ $\alpha_y = \alpha_w = 1$ | A | 46.8 | 3.22 | 28.41 | 3.57 |

| | | | | | | |
|---|--|---|------|------|-------|------|
| 5 | $K_{qh}^* = 0.75$ $\alpha_y = \alpha_w = 1$ | D | 67.2 | 2.57 | 20.08 | 2.4 |
| 6 | $\alpha_w = 0.5$ $\alpha_y = K_{qh}^* = 1$ | A | 38.7 | 2.85 | 24.13 | 2.95 |
| 7 | $\alpha_w = 0$ $\alpha_y = K_{qh}^* = 1$ | B | 21.3 | 2.8 | 24.88 | 3.7 |

Tabelul 2.2.2.1. Continuare.

| Nr. crt. | Indicatori de calitate | | | | | |
|----------|------------------------|----------------|-------------|-------------|----------------|-------------|
| | t_m [sec] | σ_1 [%] | t_1 [sec] | t_m [sec] | σ_2 [%] | t_r [sec] |
| 1 | 12.5 | 15.95 | 10.1 | - | - | 23.95 |
| 2 | 10.2 | 27.42 | 7.55 | - | - | 30.35 |
| 3 | 8.9 | 12.5 | 6.25 | - | - | 30.2 |
| 4 | 14.2 | 27.08 | 10.15 | - | - | 40.45 |
| 5 | - | - | - | 15.75 | 5.32 | 30.8 |
| 6 | 12.2 | 43.91 | 9.6 | - | - | 30.5 |
| 7 | 12.55 | 90.65 | 20.2 | 23.4 | 12.7 | 43.05 |

Indicatorii de calitate în raport cu modificarea de tip treapta unitate a perturbației realizați de SRA optimizat după J_1^* au valorile: $t_m^* = 4.65$ sec, $\sigma_1^* = 48.52$ %, $t_r^* = 39.05$ sec, răspunsul fiind de tip a.

b) Cazul funcției obiectiv $J_1^* = \int_0^{\infty} e^2(t) dt$.

Întrucât răspunsul indicial în raport cu w al SRA optimizat după J_1^* este foarte oscilant (suprareglaj de aproximativ 70 % și subreglaj de aproximativ 50 %), deci inacceptabil, valorile optime ale parametrilor RG nu interesează.

c) Cazul funcției obiectiv $J_2^* = \int_0^{\infty} [e^2(t) + T_p^2 \dot{e}^2(t)] dt$.

Pe baza efectuării unui set de optimizări utilizând coeficientul de ponderare T_p ca parametru, se constată că performanțele cele mai bune se obțin pentru $T_p \in [0.5; 1.5]$ sec. Exemplificând pentru $T_p = 1$ sec, valorile optime ale parametrilor RG rezultate prin minimizarea lui J_2^* sunt:

$$k_R = 1.599, T_1 = 10.0047 \text{ sec.} \quad (2.2.2.14)$$

În tabelul 2.2.2.2 sunt prezentați sintetic indicatorii de calitate ai SRA în raport cu variația de tip treapta

unitate a referinței.

Tabelul 2.2.2.2. Performanțele SRA optimizat după J_2^* definite în răspunsul indicial în raport cu w .

| Nr. crt. | Parametri PC | Tip de răspuns | Indicatori de calitate | | | |
|----------|--|----------------|------------------------|----------------|-------------------|-------------|
| | | | ϕ_r [°] | $t_{.1}$ [sec] | $\sigma_{.1}$ [%] | t_o [sec] |
| 1 | $\alpha_y = K_{qh}^* = \alpha_w = 1$ | A | 58.1 | 2.8 | 23.27 | 3.55 |
| 2 | $\alpha_y = 1.25$ $K_{qh}^* = \alpha_w = 1$ | B | 57.1 | 2.7 | 27.65 | 3.3 |
| 3 | $\alpha_y = 0.75$ $K_{qh}^* = \alpha_w = 1$ | A | 59.9 | 3.3 | 20.89 | 4.05 |
| 4 | $K_{qh}^* = 1.25$ $\alpha_y = \alpha_w = 1$ | B | 47.2 | 3.2 | 28.3 | 3.65 |
| 5 | $K_{qh}^* = 0.75$ $\alpha_y = \alpha_w = 1$ | D | 69.1 | 2.62 | 20.83 | 3.5 |
| 6 | $\alpha_w = 0.5$ $\alpha_y = K_{qh}^* = 1$ | A | 40.4 | 2.85 | 24.11 | 3.05 |
| 7 | $\alpha_w = 0$ $\alpha_y = K_{qh}^* = 1$ | B | 21.6 | 2.9 | 25.37 | 3.45 |

Tabelul 2.2.2.2. Continuare.

| Nr. crt. | Indicatori de calitate | | | | | |
|----------|------------------------|----------------|-------------|-------------|----------------|-------------|
| | t_w [sec] | σ_1 [%] | t_1 [sec] | t_m [sec] | σ_2 [%] | t_r [sec] |
| 1 | 12.4 | 14.6 | 10.1 | - | - | 22.95 |
| 2 | 10.15 | 26.61 | 8.95 | 16.25 | 5.76 | 29.85 |
| 3 | 15.65 | 11.5 | 11.25 | - | - | 29.35 |
| 4 | 14.05 | 26 | 9.75 | 21.85 | 2.08 | 39.6 |
| 5 | - | - | - | 14.2 | 4.23 | 30.5 |
| 6 | 12.15 | 42.91 | 9.6 | - | - | 39.5 |
| 7 | 12.5 | 90.37 | 9.3 | 23.45 | 11.53 | 44 |

SRA optimizat după J_2^* realizează un răspuns indicial în raport cu perturbația de tip a și următorii

indicatori de calitate: $t_M^* = 4.85$ sec, $\sigma_1^* = 48.8$ %, $t_r^* = 40.1$ sec.

d) **Cazul funcției obiectiv** $J_2^* = \int_0^{\infty} [e^2(t) + T_p^2 \dot{e}^2(t)] dt.$

În urma optimizarilor și simulărilor repetate pentru diferite valori ale lui T_p se observa că performanțele cele mai bune au loc pentru $T_p \in [6; 7]$ sec; pentru $T_p = 6.5$ sec se obține un RG optimizat cu parametrii:

$$k_R = 1.6235, T_i = 9.6925 \text{ sec,} \tag{2.2.2.15}$$

iar performanțele SRA în raport cu w sunt redată sintetic în tabelul 2.2.2.3.

Tabelul 2.2.2.3. Performanțele SRA optimizat după J_2^* definite în răspuns indicial în raport cu w .

| Nr. crt. | Parametri PC | Tip de răspuns | Indicatori de calitate | | | |
|----------|---|----------------|------------------------|----------------|-------------------|-------------|
| | | | ϕ_r [°] | $t_{.1}$ [sec] | $\sigma_{.1}$ [%] | t_o [sec] |
| 1 | $\alpha_y = K_{q_n}^* = 1$ $\alpha_u = 1$ | A | 57.4 | 2.9 | 24.64 | 3.65 |
| 2 | $\alpha_y = 1.25$ $K_{q_n}^* = \alpha_u = 1$ | B | 55.6 | 2.7 | 27.67 | 3.7 |
| 3 | $\alpha_y = 0.75$ $K_{q_n}^* = \alpha_u = 1$ | A | 58.3 | 3.5 | 21.89 | 4.25 |
| 4 | $K_{q_n}^* = 1.25$ $\alpha_y = \alpha_u = 1$ | A | 44.5 | 3.22 | 28.4 | 3.97 |
| 5 | $K_{q_n}^* = 0.75$ $\alpha_y = \alpha_u = 1$ | D | 68.4 | 2.57 | 19.64 | 3.47 |
| 6 | $\alpha_u = 0.5$ $\alpha_y = K_{q_n}^* = 1$ | A | 38.4 | 2.91 | 24.13 | 3.8 |
| 7 | $\alpha_u = 0$ $\alpha_y = K_{q_n}^* = 1$ | B | 19.3 | 2.92 | 25.39 | 3.8 |

Tabelul 2.2.2.3. Continuare.

| Nr. crt. | Indicatori de calitate | | | | | |
|----------|------------------------|----------------|-------------|-------------|----------------|-------------|
| | t_w [sec] | σ_1 [%] | t_1 [sec] | t_w [sec] | σ_2 [%] | t_r [sec] |
| 1 | 12.65 | 17.28 | 10.9 | - | - | 24.55 |
| 2 | 10.3 | 28.76 | 9.4 | 16.4 | 5.16 | 30.75 |
| 3 | 21.2 | 17.09 | 12.65 | - | - | 38.55 |

| | | | | | | |
|---|-------|-------|-------|-------|-------|-------|
| 4 | 14.4 | 28.42 | 10.55 | - | - | 41.25 |
| 5 | - | - | - | 13.9 | 4.35 | 29.8 |
| 6 | 12.25 | 45.94 | 10.05 | - | - | 40.15 |
| 7 | 12.55 | 93.52 | 9.25 | 28.35 | 14.18 | 43.8 |

În raport cu variația de tip treapta unitate a perturbației răspunsul SRA optimizat după J_2^v este de tip a, cu următoarele performanțe: $t_M^v = 4.51$ sec, $\sigma_1^v = 48.011$ %, $t_r^v = 38.05$ sec.

e) Cazul funcției obiectiv J_3^w = $\int_0^{\infty} [e^2(t) + m_p^2 (u(t)-u_{\infty})^2] dt$.

Datorita faptului ca valoarea optima la parametrului T_i este mare (de aproximativ 50 sec) și, prin urmare, aduce dificultăți la o implementare numerică cvasicontinuală a RG-PI, se apreciază ca pentru studiul de caz considerat minimizarea lui J_3^w conduce la o soluție inacceptabilă.

f) Cazul funcției obiectiv J_3^v = $\int_0^{\infty} [e^2(t) + m_p^2 (u(t)-u_{\infty})^2] dt$.

Minimizarea lui J_3^v pentru studiul de caz al reglării unui HG de la Pdf 1 determina alegerea coeficientului de ponderare m_p care asigură cel mai bun comportament al SRA în domeniul $m_p \in [1; 1.4]$. Pentru $m_p = 1.2$ rezulta RG optimal de tip PI cu parametrii:

$$k_R = 0.7425, T_i = 5.172 \text{ sec}; \quad (2.2.2.16)$$

comportamentul SRA în raport cu w este ilustrat sintetic prin datele din tabelul 2.2.2.4.

Tabelul 2.2.2.4. Performanțele SRA optimizat după J_3^v definite în răspunsul indicial în raport cu w .

| Nr. crt. | Parametri PC | Tip de răspuns | Indicatori de calitate | | | |
|----------|--|----------------|------------------------|----------------|-------------------|-------------|
| | | | ϕ_r [°] | $t_{.1}$ [sec] | $\sigma_{.1}$ [%] | t_o [sec] |
| 1 | $\alpha_y = K_{qh}^* = \alpha_w = 1$ | A | 58.4 | 2.3 | 12.44 | 3.15 |
| 2 | $\alpha_y = 1.25$ $K_{qh}^* = \alpha_w = 1$ | A | 55.3 | 2.35 | 15.97 | 3.2 |
| 3 | $\alpha_y = 0.75$ $K_{qh}^* = \alpha_w = 1$ | A | 60.3 | 2.3 | 9.89 | 3.15 |
| 4 | $K_{qh}^* = 1.25$ $\alpha_y = \alpha_w = 1$ | A | 52.6 | 2.7 | 16.13 | 3.25 |
| 5 | $K_{qh}^* = 0.75$ $\alpha_y = \alpha_w = 1$ | A | 65.7 | 1.95 | 8.98 | 2.35 |
| 6 | $\alpha_w = 0.5$ | B | 36.3 | 2.4 | 13.34 | 3.3 |

| | | | | | | |
|---|---|---|------|-----|-------|-----|
| | $\alpha_y = K_{qh}^* = 1$ | | | | | |
| 7 | $\alpha_w = 0$ $\alpha_y = K_{qh}^* = 1$ | B | 10.2 | 2.5 | 14.42 | 3.5 |

Tabelul 2.2.2.4. Continuare.

| Nr. crt. | Indicatori de calitate | | | | | |
|----------|------------------------|----------------|-------------|-------------|----------------|-------------|
| | t_m [sec] | σ_1 [%] | t_1 [sec] | t_m [sec] | σ_2 [%] | t_r [sec] |
| 1 | 20.2 | 6.97 | 15.1 | - | - | 31.2 |
| 2 | 15.55 | 11.01 | 10.23 | - | - | 25.9 |
| 3 | 28.7 | 3.19 | 14.4 | - | - | 36.75 |
| 4 | 18.75 | 12.44 | 13.05 | - | - | 30.3 |
| 5 | 22.7 | 3.84 | 15.45 | - | - | 31.1 |
| 6 | 17.4 | 37.11 | 9.3 | 37 | 8.53 | 46.65 |
| 7 | 17.5 | 97.08 | 10.8 | 35.8 | 66.4 | 65.3 |

SRA optimizat după J_3^* realizează în raport cu variația de tip treaptă unitate a lui v un răspuns de tip a, cu următorii indicatori de calitate: $t_m^* = 6.65$ sec, $\sigma_1^* = 54.08$ %, $t_r^* = 24.4$ sec.

$$g) \text{ Cazul funcției obiectiv } J_3^* = J_1^* + v_p \left. \begin{array}{l} \frac{\partial J_1^*}{\partial K_{qh}^*} \\ \alpha_y = K_{qh}^* = \alpha_w = 1 \end{array} \right\}$$

Pentru studiul de caz al reglării turajiei unui HG de la PdF 1 performanțele cele mai bune ale SRA se obțin dacă $v_p \in [0.1; 0.2]$. Pentru exemplificare, dacă $v_p = 0.15$ rezultă următoarele valori optime ale parametrilor RG:

$$k_R = 1.4479, T_1 = 9.839 \text{ sec}, \quad (2.2.2.17)$$

iar performanțele în raport cu w ale SRA rezultat sunt redată sintetic prin intermediul tabelului 2.2.2.5.

Tabelul 2.2.2.5. Performanțele SRA optimizat după J_4^* definite în răspunsul indicial în raport cu w .

| Nr. crt. | Parametri PC | Tip de răspuns | Indicatori de calitate | | | |
|----------|--------------------------------------|----------------|------------------------|-------------|----------------|-------------|
| | | | ϕ_r [°] | t_1 [sec] | σ_1 [%] | t_0 [sec] |
| 1 | $\alpha_y = K_{qh}^* = \alpha_w = 1$ | B | 61.4 | 2.75 | 22.78 | 3.45 |
| 2 | $\alpha_y = 1.25$ | B | 57.6 | 2.6 | 26.9 | 3.25 |

| | | | | | | |
|---|---|---|------|------|-------|------|
| | $K_{qh}^* = \alpha_\omega = 1$ | | | | | |
| 3 | $\alpha_y = 0.75$ $K_{qh}^* = \alpha_\omega = 1$ | B | 64.3 | 3.1 | 23.73 | 3.85 |
| 4 | $K_{qh}^* = 1.25$ $\alpha_y = \alpha_\omega = 1$ | B | 50.9 | 3.18 | 28.19 | 3.78 |
| 5 | $K_{qh}^* = 0.75$ $\alpha_y = \alpha_\omega = 1$ | C | 71.7 | 2.7 | 20.18 | 3.5 |
| 6 | $\alpha_\omega = 0.5$ $\alpha_y = K_{qh}^* = 1$ | A | 41.4 | 2.85 | 24.11 | 3.45 |
| 7 | $\alpha_\omega = 0$ $\alpha_y = K_{qh}^* = 1$ | B | 24.4 | 2.8 | 24.87 | 3.3 |

Tabelul 2.2.2.5. Continuare.

| Nr. crt. | Indicatori de calitate | | | | | |
|----------|------------------------|----------------|-------------|-------------|----------------|-------------|
| | t_n [sec] | σ_1 [%] | t_1 [sec] | t_m [sec] | σ_2 [%] | t_r [sec] |
| 1 | 12.2 | 9.69 | 10.65 | 18.8 | 6.64 | 31.05 |
| 2 | 9.95 | 19.63 | 7.65 | 16.3 | 8.14 | 24.6 |
| 3 | 14.35 | 9.1 | 12.85 | 23.1 | 6.25 | 46.5 |
| 4 | 13.6 | 20.88 | 10.65 | 21.6 | 7.28 | 32.45 |
| 5 | - | - | - | - | - | 50.7 |
| 6 | 12.2 | 37.65 | 8.3 | - | - | 37.9 |
| 7 | 12.75 | 84.4 | 9.8 | 25.4 | 10.53 | 45.45 |

Performanțele obținute în raport cu v sunt: raspuns de tip a, $t_M^* = 4.9$ sec, $\sigma_1^* = 49.22$ %, $t_r^* = 41.35$ sec.

$$h) \text{ Cazul funcției obiectiv } J_1^* = J_1^* + v_p \frac{\partial J_1^*}{\partial K_{qh}^*} \Big|_{\alpha_y = K_{qh}^* = \alpha_\omega = 1}$$

Dupa efectuarea unui numar mare de optimizari și simulari considerând pe θ_p ca parametru se observa ca performanțele cele mai bune ale SRA(-V) se obțin pentru $\theta_p \in [1.5; 2.5]$. Astfel, pentru $\theta_p = 2$, RG(-V) optimal va avea parametrii:

$$k_R = 1.9701, T_1 = 12.3812 \text{ sec}, \quad (2.2.2.18)$$

iar SRA(-V) are performanțele în raport cu w conform tabelului 2.2.2.6.

Tabelul 2.2.2.6. Performanțele SRA optimizat după J_s^* definite în răspunsul indicial în raport cu w .

| Nr. crt. | Parametri PC | Tip de răspuns | Indicatori de calitate | | | |
|----------|--|----------------|------------------------|----------------|-------------------|-------------|
| | | | φ_r [°] | $t_{.1}$ [sec] | $\sigma_{.1}$ [%] | t_o [sec] |
| 1 | $\alpha_y = K_{qh}^* = \alpha_w = 1$ | B | 47.6 | 2.88 | 23.87 | 3.68 |
| 2 | $\alpha_y = 1.25$ $K_{qh}^* = \alpha_w = 1$ | B | 46 | 2.7 | 27.66 | 3.3 |
| 3 | $\alpha_y = 0.75$ $K_{qh}^* = \alpha_w = 1$ | B | 48.9 | 3.4 | 21.39 | 4.15 |
| 4 | $K_{qh}^* = 1.25$ $\alpha_y = \alpha_w = 1$ | B | 33.6 | 3.25 | 28.35 | 3.95 |
| 5 | $K_{qh}^* = 0.75$ $\alpha_y = \alpha_w = 1$ | D | 60.8 | 2.55 | 18.53 | 2.85 |
| 6 | $\alpha_w = 0.5$ $\alpha_y = K_{qh}^* = 1$ | A | 32.8 | 3.05 | 24.61 | 3.75 |
| 7 | $\alpha_w = 0$ $\alpha_y = K_{qh}^* = 1$ | B | 16.4 | 2.95 | 25.62 | 3.85 |

Tabelul 2.2.2.6. Continuare.

| Nr. crt. | Indicatori de calitate | | | | | |
|----------|------------------------|----------------|-------------|-------------|----------------|-------------|
| | t_m [sec] | σ_1 [%] | t_1 [sec] | t_m [sec] | σ_2 [%] | t_r [sec] |
| 1 | 12.15 | 18.04 | 10 | 18.05 | 7.87 | 28.65 |
| 2 | 10.05 | 31.2 | 8.1 | 15.3 | 14.76 | 33.6 |
| 3 | 11.25 | 12.5 | 9.2 | 14.25 | 10.62 | 30.1 |
| 4 | 13.85 | 38.4 | 10.8 | 20.4 | 9.73 | 38.9 |
| 5 | - | - | - | 15.6 | 7.41 | 32.2 |
| 6 | 11.75 | 46.33 | 10.1 | - | - | 46.4 |
| 7 | 11.9 | 91.46 | 9.5 | 20 | 13.71 | 52.1 |

În raport cu v se obțin următoarele performanțe: răspuns de tip a, $t_m^* = 4.15$ sec, $\sigma_1^* = 47.89$ %.

$t_r^* = 45.9 \text{ sec.}$

$$i) \text{ Cazul funcției obiectiv } J_5^* = J_1^* + \mu_p \frac{\partial J_1^*}{\partial \alpha_\omega} \Bigg|_{\alpha_\gamma = K_{qh}^* = \alpha_\omega = 1}$$

De aceasta data pentru coeficientul de ponderare μ_p se recomanda domeniul $\mu_p \in [0.15; 0.25]$. Pentru $\mu_p = 0.2$ se obține:

$$k_R = 1.6002, T_i = 8.0382 \text{ sec.} \quad (2.2.2.19)$$

iar SRA optimizat are performanțele în raport cu referința redată în tabelul 2.2.2.7.

Tabelul 2.2.2.7. Performanțele SRA optimizat după J_5^* definite în răspunsul indicial în raport cu w .

| Nr. crt. | Parametri PC | Tip de răspuns | Indicatori de calitate | | | |
|----------|--|----------------|------------------------|-----------------------|--------------------|--------------------|
| | | | $\varphi_r [^\circ]$ | $t_{.1} [\text{sec}]$ | $\sigma_{.1} [\%]$ | $t_0 [\text{sec}]$ |
| 1 | $\alpha_\gamma = K_{qh}^* = \alpha_\omega = 1$ | A | 51.5 | 2.95 | 24.18 | 3.73 |
| 2 | $\alpha_\gamma = 1.25$ $K_{qh}^* = \alpha_\omega = 1$ | B | 49.1 | 2.8 | 28.15 | 3.5 |
| 3 | $\alpha_\gamma = 0.75$ $K_{qh}^* = \alpha_\omega = 1$ | B | 53.4 | 4.35 | 26.14 | 5.1 |
| 4 | $K_{qh}^* = 1.25$ $\alpha_\gamma = \alpha_\omega = 1$ | B | 38.7 | 3.4 | 29.3 | 3.95 |
| 5 | $K_{qh}^* = 0.75$ $\alpha_\gamma = \alpha_\omega = 1$ | A | 62.6 | 2.65 | 19.83 | 2.95 |
| 6 | $\alpha_\omega = 0.5$ $\alpha_\gamma = K_{qh}^* = 1$ | A | 33.2 | 2.9 | 24.86 | 3.7 |
| 7 | $\alpha_\omega = 0$ $\alpha_\gamma = K_{qh}^* = 1$ | B | 15.8 | 3.85 | 25.65 | 2.95 |

Tabelul 2.2.2.7. Continuare.

| Nr. crt. | Indicatori de calitate | | | | | |
|----------|------------------------|-----------------|--------------------|--------------------|-----------------|--------------------|
| | $t_w [\text{sec}]$ | $\sigma_1 [\%]$ | $t_1 [\text{sec}]$ | $t_m [\text{sec}]$ | $\sigma_2 [\%]$ | $t_r [\text{sec}]$ |
| 1 | 13.85 | 26.49 | 10.3 | - | - | 38.1 |
| 2 | 11 | 37.09 | 8.14 | 17.7 | 5.38 | 34.3 |
| 3 | 27.55 | 32.64 | 10 | 22.4 | 7.85 | 55.95 |

| | | | | | | |
|---|-------|-------|------|-------|-------|-------|
| 4 | 16 | 38.18 | 11.3 | 23.4 | 6.54 | 46.5 |
| 5 | 12.35 | 14.61 | 9.65 | - | - | 26.5 |
| 6 | 12.9 | 56.48 | 8.5 | - | - | 41.35 |
| 7 | 13 | 99.84 | 9.8 | 23.65 | 30.25 | 55.05 |

SRA optimizat asigura urmatoarele performanțe în raport cu perturbația: raspuns indicial de tip a, $t_M^v = 5.1 \text{ sec}$, $\sigma_1^v = 50.88 \%$, $t_r^v = 29.8 \text{ sec}$.

$$j) \text{ Cazul funcției obiectiv } J_3^v = J_1^v + \mu_p \left. \begin{array}{l} \frac{\partial J_1^v}{\partial \alpha_\omega} \\ \alpha_\gamma = K_{qh}^* = \alpha_\omega = 1 \end{array} \right\}$$

Minimizarea lui J_3^v pentru diverse valori ale coeficientului de ponderare μ_p conduce la rezultate inacceptabile manifestate, spre exemplu, prin oscilații pronunțate (suprareglaj de aproximativ 80 % și subreglaj de aproximativ 50 %) în raspunsul indicial al SRA în raport cu referința.

$$k) \text{ Cazul funcției obiectiv } J_6^w = J_1^w + \theta_p \left. \begin{array}{l} \frac{\partial J_1^w}{\partial \alpha_\gamma} \\ \alpha_\gamma = K_{qh}^* = \alpha_\omega = 1 \end{array} \right\}$$

Pentru studiul de caz considerat indicatorii de calitate cu valorile cele mai bune se obțin pentru $\theta_p \in [0.6; 0.8]$. Dacă $\theta_p = 0.7$, atunci RG(-V) optimal va avea parametrii:

$$k_R = 0.5424, T_1 = 6.4731 \text{ sec.} \quad (2.2.2.20)$$

Comportamentul în raport cu referința al SRA(-V) optimizat rezulta pe baza tabelului 2.2.2.8.

Tabelul 2.2.2.8. Performanțele SRA optimizat după J_6^w definite în raspunsul indicial în raport cu w.

| Nr. crt. | Parametri PC | Tip de răspuns | Indicatori de calitate | | | |
|----------|--|----------------|------------------------|-----------------------|--------------------|--------------------|
| | | | $\phi_r [^\circ]$ | $t_{.1} [\text{sec}]$ | $\sigma_{.1} [\%]$ | $t_o [\text{sec}]$ |
| 1 | $\alpha_\gamma = K_{qh}^* = \alpha_\omega = 1$ | C | 73.8 | 3.05 | 9.73 | 3.2 |
| 2 | $\alpha_\gamma = 1.25$ $K_{qh}^* = \alpha_\omega = 1$ | C | 70.9 | 2.35 | 10.88 | 3.2 |
| 3 | $\alpha_\gamma = 0.75$ $K_{qh}^* = \alpha_\omega = 1$ | C | 75.4 | 2.2 | 8.12 | 3.25 |
| 4 | $K_{qh}^* = 1.25$ $\alpha_\gamma = \alpha_\omega = 1$ | C | 69.9 | 2.5 | 10.14 | 3.4 |
| 5 | $K_{qh}^* = 0.75$ $\alpha_\gamma = \alpha_\omega = 1$ | C | 77.3 | 1.95 | 9.72 | 2.8 |

| | | | | | | |
|---|--|---|------|------|------|------|
| 6 | $\alpha_\omega=0.5$ $\alpha_y=K_{qh}^*=1$ | A | 48.7 | 2.35 | 9.12 | 3.45 |
| 7 | $\alpha_\omega=0$ $\alpha_y=K_{qh}^*=1$ | B | 15.9 | 2.45 | 9.82 | 3.5 |

Tabelul 2.2.2.8. Continuare.

| Nr. crt. | Indicatori de calitate | | | | | |
|----------|------------------------|----------------|-------------|-------------|----------------|-------------|
| | t_m [sec] | σ_1 [%] | t_1 [sec] | t_m [sec] | σ_2 [%] | t_r [sec] |
| 1 | - | - | - | - | - | 42.4 |
| 2 | - | - | - | - | - | 23.6 |
| 3 | - | - | - | - | - | 48.4 |
| 4 | - | - | - | - | - | 31.8 |
| 5 | - | - | - | - | - | 38.85 |
| 6 | 24.45 | 19.4 | 15.3 | - | - | 41.9 |
| 7 | 22.75 | 77.6 | 11.2 | 48 | 43.96 | 68.8 |

Performanțele în raport cu perturbația ale SRA optimizat sunt următoarele: răspuns indicial de tip a, $t_M^* = 8.25$ sec, $\sigma_1^* = 58.57$ %, $t_r^* = 46.35$ sec.

$$1) \text{ Cazul funcției obiectiv } J_\omega^* = J_1^* + \theta_p \frac{\partial J_1^*}{\partial \alpha_y} \Big|_{\alpha_y = K_{qh}^* = \alpha_\omega = 1}$$

Întrucât valoarea optimală a parametrului T_i rezulta relativ mare (de aproximativ 60 sec) care face dificilă implementarea numerică a RG, și acest caz se considera inacceptabil.

Sinteza concluziilor referitoare la utilizarea indicatorilor de calitate integrali în acordarea RG-PI pentru conducerea PC cu fază neminimă cu f.d.t. de forma (2.1.1) este prezentată în paragraful 2.3.

2.2.3. Structura de reglare automată bazată pe urmărirea unui model matematic de referință al procesului condus

Se cunoaște că structurile de reglare automată bazate pe modelul matematic (MM) al procesului condus (PC) constituie soluții alternative "atractive" care pot asigura în buna măsură satisfacerea atât a performanțelor de regim dinamic cât și a performanțelor de regim staționar impuse. În (De Neyer și Goretz, 1993) se prezintă o structură generală a unui sistem de reglare automată bazat pe MM al PC care, prin

particularizare, conduce la diverse structuri cunoscute dintre care se amintesc doar doua:

- a) structura bazata pe urmarirea unui MM de referinta (etalon) al PC ("Model Following Control"), prezentata, de exemplu, și în (Calin și Dumitrache, 1985);
- b) structura bazata pe MM intern al PC ("Internal Model Control"), dezvoltata în general în (Morari și Zafiriou, 1989).

Pe baza analizei structurilor a) și b), datorita simplitații de aplicare la SFN s-a optat pentru prima dintre structuri.

Structura de SRA bazata pe urmarirea unui MM de referinta al PC este prezentata în fig.2.2.3.1, în care: $H_M(s)$ - f.d.t. aferenta modelului cu valori nominale ale parametrilor; $H_C(s)$ - f.d.t. aferenta blocului de corecție a comportării SRA; y_M - ieșirea modelului; e_M - eroarea de urmarire, cu expresia:

$$e_M = y - y_M. \tag{2.2.3.1}$$

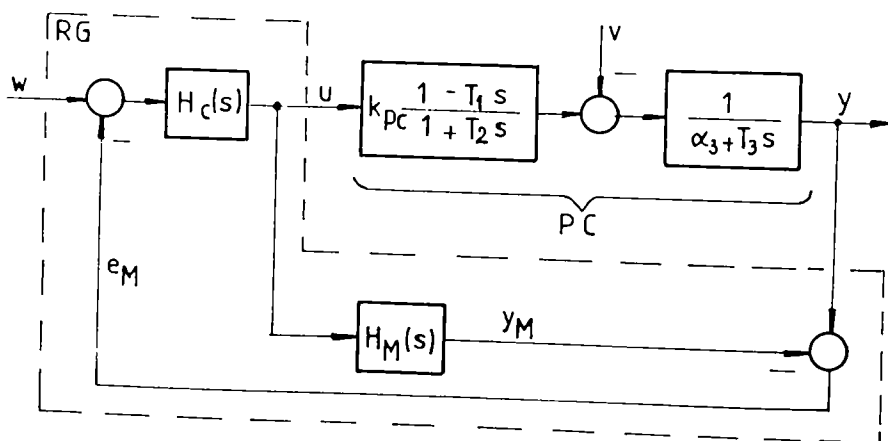


Fig.2.2.3.1. Schema bloc informaționala aferenta SRA bazat pe urmarirea unui MM de referința al PC.

Ca și la proiectarea în domeniul pulsație (frecvența), se presupune ca PC este liniarizat în jurul unui p.d.f.s.c. și ca regimul de funcționare menține valoarea comenzii între valorile de limitare $\{u_m, u_M\}$.

În vederea proiectării, structura din fig.2.2.3.1 se transforma sub forma structurii prezentate în fig.2.2.3.2.

Pe baza fig.2.2.3.2 se poate explicita f.d.t. a RG:

$$H_R(s) = \frac{H_C(s)}{1 - H_C(s) H_M(s)} \tag{2.2.3.2}$$

respectiv:

$$H_M(s) = \frac{H_R(s) - H_c(s)}{H_R(s) H_c(s)} \quad (2.2.3.3)$$

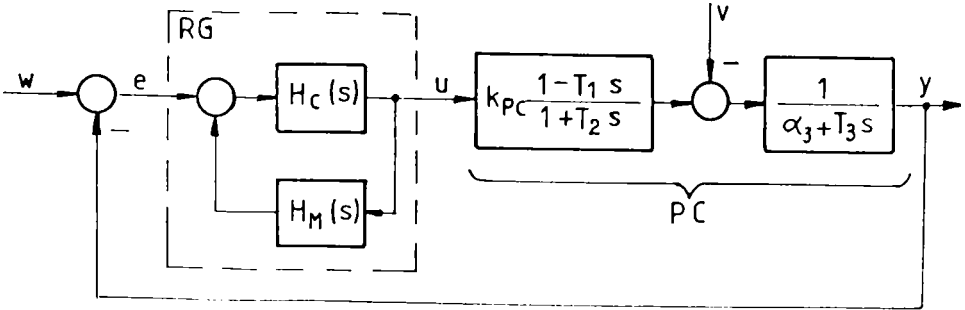


Fig.2.2.3.2. Schema bloc informațională realizabilă echivalentă structurii din fig.2.2.3.1.

Prin proiectare se impune ca f.d.t. în raport cu referința w să aibă expresia dorită $H_w(s)$:

$$H_w(s) = H_c(s) H_{PC}(s), \quad (2.2.3.4)$$

care se mai poate exprima sub formele:

$$H_{PC}(s) = H_w(s)/H_c(s), \quad (2.2.3.5)$$

$$H_c(s) = H_w(s)/H_{PC}(s). \quad (2.2.3.6)$$

În condițiile urmăririi exacte de către PC a modelului:

$$e_M = 0 \quad (2.2.3.7)$$

și

$$H_M(s) = H_{PC}(s), \quad (2.2.3.8)$$

din relațiile (2.2.3.2), (2.2.3.5) și (2.2.3.8) rezulta:

$$H_R(s) = \frac{H_c(s)}{1 - H_w(s)}, \quad (2.2.3.9)$$

care, prin utilizarea relației (2.2.3.6), devine:

$$H_R(s) = \frac{H_w(s)}{H_{PC}(s) [1 - H_w(s)]} \quad (2.2.3.10)$$

Prin punerea în evidență a numărătorilor și numitorilor f.d.t. $H_w(s)$ și $H_{PC}(s)$:

$$H_w(s) = B_w(s)/A_w(s), \quad (2.2.3.11)$$

$$H_{PC}(s) = B_{PC}(s)/A_{PC}(s) \quad (2.2.3.12)$$

și substituirea exprimarilor (2.2.3.11) și (2.2.3.12) în relația (2.2.3.10), se obține f.d.t. aferenta RG:

$$H_R(s) = \frac{B_w(s) A_{PC}(s)}{B_{PC}(s) [A_w(s) - B_w(s)]} \quad (2.2.3.13)$$

Din expresia (2.1.1) a f.d.t. $H_{PC}(s)$ se pune în evidența numitorul, respectiv numărătorul:

$$A_{PC}(s) = (1 + T_2 s) (\alpha_3 + T_3 s), \quad (2.2.3.14)$$

$$B_{PC}(s) = k_{PC} (1 - T_1 s). \quad (2.2.3.15)$$

În scopul realizabilității fizice a regulatorului se impune (Müller, 1984):

$$A_w(s) = (1 + T_{imp} s)^2, \quad (2.2.3.16)$$

$$B_w(s) = 1 - T_1 s, \quad (2.2.3.17)$$

unde T_{imp} este o constanta de timp impusa.

Observație: Prin impunerea unei f.d.t. $H_w(s)$ de forma (2.2.3.11), (2.2.3.16), (2.2.3.17) se asigură un răspuns aperiodic al SRA; alegerea unei valori cât mai mari pentru T_{imp} în raport cu T_1 determină scăderea subreglajului σ_1 (Dragomir și Preitl, 1978).

Prin înlocuirea expresiilor (2.2.3.14) ... (2.2.3.17) în f.d.t. $H_R(s)$ din relația (2.2.3.13) rezulta:

$$H_R(s) = \frac{(1 + T_2 s)(\alpha_3 + T_3 s)}{k_{PC} s (2 T_{imp} + T_1 + T_{imp}^2 s)}, \quad (2.2.3.18)$$

care, pentru $\alpha_3 \neq 0$, corespunde unui regulator de tip PIDT1.

Observație: În cazul $\alpha_3 = 0$ regulatorul rezulta însă de tip PDT1 datorită simplificării cu "s", efectul constând în pierderea caracterului astatic de către SRA ($\gamma_n \neq 0$).

Pentru aplicația de SFN2-1ZP constând în reglarea turajiei unui hidrogenator, relația (2.2.3.18) se transformă în (a se vedea corespondența parametrilor conform relației (1.2.3.3)):

$$H_R(s) = \frac{(1 + 0.5 K_{qh}^* T_w s)(\alpha_w + T_m s)}{\alpha_y s (2 T_{imp} + K_{qh}^* T_w + T_{imp}^2 s)} \quad (2.2.3.19)$$

Particularizând valorile parametrilor conform relațiilor (2.1.24) și (2.1.25) și impunând:

$$T_{imp} = 5 \text{ sec.} \quad (2.2.3.20)$$

pentru studiul de caz considerat se obține următoarea f.d.t. aferenta RG:

$$H_R(s) = \frac{(1 + 1.1 s)(1 + 6.8 s)}{s (12.2 + 25 s)} \quad (2.2.3.21)$$

Performanțele SRA proiectat algoritmic pe baza urmării unui model matematic de referință al procesului condus corespunzător comportării în raport cu modificarea de tip treapta unitate a referinței sunt prezentate în tabelul 2.2.3.1.

Tabelul 2.2.3.1. Performanțele SRA proiectat pe baza urmării unui model matematic de referință al procesului condus definite în răspunsul judiciar în raport cu w .

| Nr. crt. | Parametri PC | Tip de răspuns | Indicatori de calitate | | | |
|----------|--|----------------|------------------------|----------------|-------------------|-------------|
| | | | ϕ_r [°] | $t_{.1}$ [sec] | $\sigma_{.1}$ [%] | t_o [sec] |
| 1 | $\alpha_y = K_{qh}^* = \alpha_o = 1$ | C | 70.7 | 2.25 | 15.56 | 3.1 |
| 2 | $\alpha_y = 1.25$ $K_{qh}^* = \alpha_o = 1$ | A | 69.6 | 2.45 | 21.75 | 3.35 |
| 3 | $\alpha_y = 0.75$ $K_{qh}^* = \alpha_o = 1$ | A | 70.8 | 3.05 | 15.72 | 3.8 |
| 4 | $K_{qh}^* = 1.25$ $\alpha_y = \alpha_o = 1$ | A | 67.1 | 2.9 | 22.16 | 3.85 |
| 5 | $K_{qh}^* = 0.75$ $\alpha_y = \alpha_o = 1$ | C | 74.4 | 2.1 | 12.18 | 2.5 |
| 6 | $\alpha_o = 0.5$ $\alpha_y = K_{qh}^* = 1$ | C | 44.2 | 2.6 | 18.34 | 3.3 |
| 7 | $\alpha_o = 0$ $\alpha_y = K_{qh}^* = 1$ | C | 10.7 | 2.65 | 20.32 | 3.3 |

Tabelul 2.2.3.1. Continuare.

| Nr. crt. | Indicatori de calitate | | | | | |
|----------|------------------------|----------------|-------------|-------------|----------------|-------------|
| | t_m [sec] | σ_1 [%] | t_1 [sec] | t_m [sec] | σ_2 [%] | t_r [sec] |
| 1 | - | - | - | - | - | 25.4 |
| 2 | 14.05 | 10.6 | 10.5 | - | - | 25.15 |
| 3 | 16.25 | 8.8 | 11.5 | - | - | 32.3 |
| 4 | 19.25 | 14.05 | 14.55 | - | - | 31.85 |
| 5 | - | - | - | - | - | 20.35 |
| 6 | 15.75 | 18.45 | 10.7 | - | - | 40.8 |
| 7 | 16.8 | 32.25 | 8.8 | - | - | 54.95 |

În raport cu modificarea de tip treapta unitate a perturbației răspunsul obținut este de tip b. cu

urmatorii indicatori de calitate: $t_M^v = 6.8$ sec, $\sigma_1^v = 54.68$ %, $t_m^v = 32.8$ sec, $\sigma_2^v = 3.54$ %, $t_r^v = 34.4$ sec.

2.3. Analiza comparativa a metodelor clasice de proiectare algoritmica a reguletoarelor. Concluzii

Pe baza studiului efectuat și a rezultatelor obținute prezentate în paragraful 2.2 se evidențiază următoarele aspecte de interes teoretic și practic:

1) Structura de reglare automata convențională cu regulator de tip PI (RG-PI) este o structură clasică, convenabilă; adoptarea ei în conducerea SFN (în particular, în reglarea turajiei unui HG) este justificată prin faptul că atât în raport cu perturbația cât și în raport cu referința se obțin performanțe acceptabile ale SRA. Pe lângă metoda de proiectare consacrată în literatură - cea în domeniul pulsație - se pot utiliza cu succes metodele de acordare optimă a parametrilor RG-PI bazate pe minimizarea unor indicatori de calitate integrali. Structura de conducere bazată pe urmărirea unui model matematic de referință al PC poate da rezultate adecvate.

2) Întrucât reguletoarele utilizate au componenta I, ele vor asigura îndeplinirea condiției de statism natural nul al SRA:

$$\gamma_n = 0. \quad (2.3.1)$$

În cazul aplicației de reglare a turajiei unui hidrogenerator statismul nenul necesar funcționării cuplate la sistemul energetic va trebui asigurat obligatoriu prin realizarea unui statism (artificial) după puterea activă sau după deschiderea aparatului director (de exemplu, (Preitl ș.a., 1983)).

3) Performanțele SRA au fost testate în condițiile precizate în cadrul paragrafului 2.1; prin aceasta se asigură posibilitatea comparării performanțelor SRA cu reguletoare proiectate algoritmic în diferite variante. În acest scop, în fig.2.3.1 și 2.3.2 sunt prezentați sintetic principalii indicatori de calitate empirici aferenți tuturor SRA abordate în cadrul acestui capitol, cu referire la valorile parametrilor PC conform regimurilor 1 ... 7 (în conformitate cu paragraful 2.1).

Notațiile utilizate în fig.2.3.1 și 2.3.2 se referă la variantele luate în considerare de RG proiectate algoritmic prin metode clasice și au următoarea semnificație:

- ▲ - RG proiectat în domeniul pulsație;
- △ - RG proiectat pe baza minimizării funcției obiectiv J_1^* ;
- ▽ - RG proiectat pe baza minimizării funcției obiectiv J_2^* ;
- ◊ - RG proiectat pe baza minimizării funcției obiectiv J_2^* ;
- - RG proiectat pe baza minimizării funcției obiectiv J_3^* ;
- ✖ - RG proiectat pe baza minimizării funcției obiectiv J_4^* ;
- ⊠ - RG proiectat pe baza minimizării funcției obiectiv J_4^* ;
- - RG proiectat pe baza minimizării funcției obiectiv J_5^* ;
- ◇ - RG proiectat pe baza minimizării funcției obiectiv J_6^* ;
- ▼ - RG proiectat pe baza urmării unui MM de referință al PC.

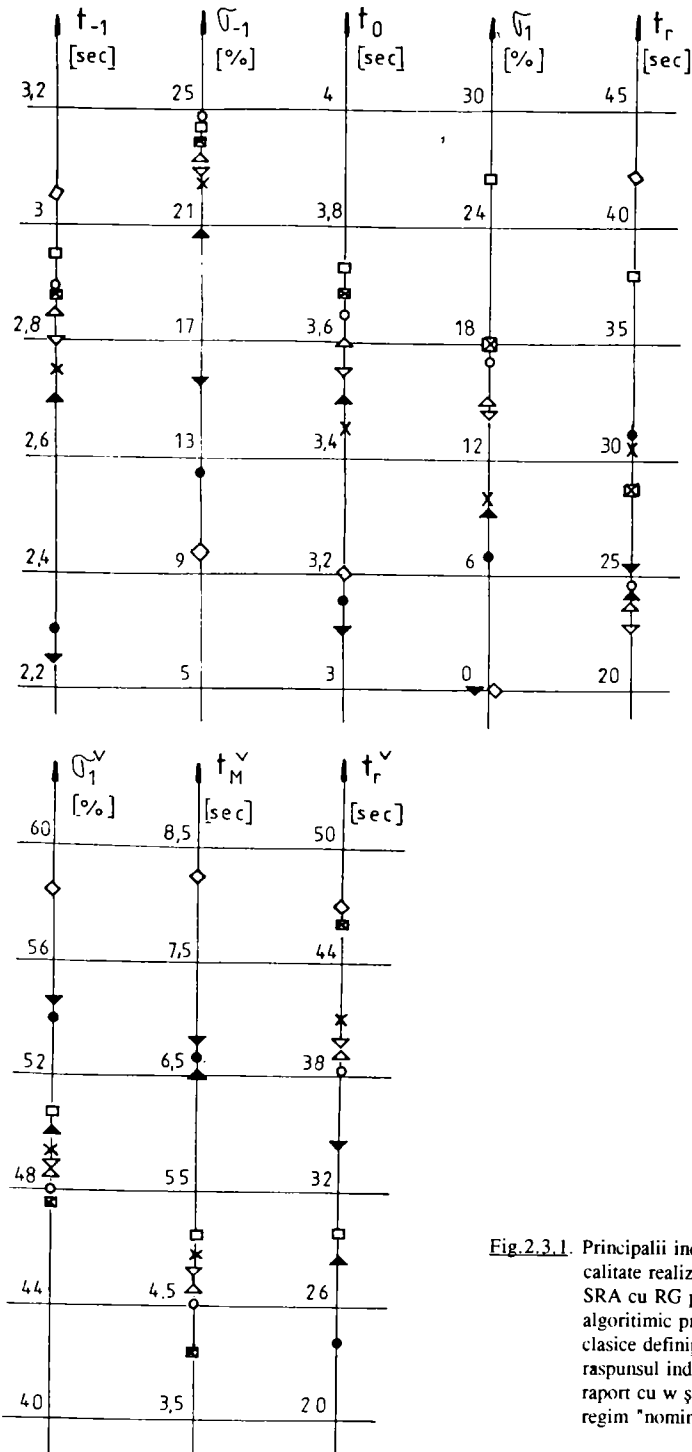


Fig.2.3.1. Principalii indicatori de calitate realizați de SRA cu RG proiectate algoritmic prin metode clasice definiți în răspunsul indicial în raport cu w și v în regim "nominal".

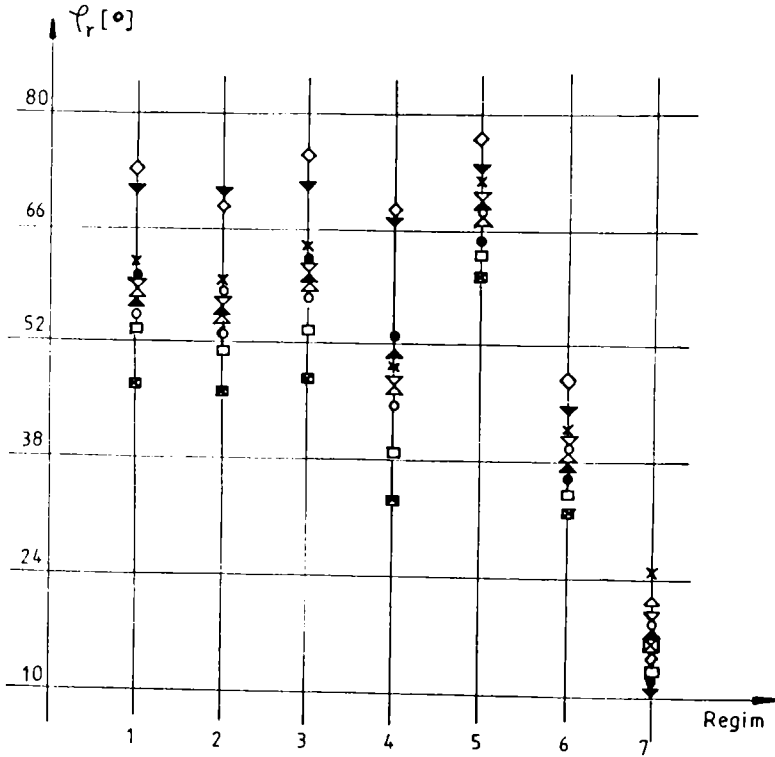


Fig.2.3.2. Rezerva de faza realizată de SRA cu RG proiectate algoritmic prin metode clasice în regimurile 1 ... 7.

Comparând valorile indicatorilor de calitate realizați de cele zece variante de SRA analizate, prezentate sintetic în fig.2.3.1, se poate construi tabelul 2.3.1, pe baza caruia se pot fixa recomandari privind o ordine preferențială de alegere a metodei de acordare a regulatorului în vederea realizării celei mai bune valori (este vorba, evident, despre valoarea minimă) a unui anumit indicator de calitate.

Tabelul 2.3.1. Ordinea de alegere a RG proiectate algoritmic prin metode clasice pe baza indicatorilor de calitate empirici realizați de SRA în regim "nominal".

| Varianta de RG | Ordine alegere indicator de calitate | | | | | | | | |
|----------------------|--------------------------------------|----------|-------|------------|-------|--------------|---------|---------|--|
| | σ_1 | t_{-1} | t_0 | σ_1 | t_r | σ_1^v | t_m^v | t_r^v | |
| ▲ | 4 | 3 | 5 | 4 | 3 | 6 | 7 | 2 | |
| △ | 7 | 6 | 7 | 7 | 2 | 3 | 3 | 6 | |
| ▽ | 6 | 5 | 6 | 6 | 1 | 4 | 4 | 7 | |
| ○ | 10 | 8 | 8 | 8 | 4 | 2 | 2 | 5 | |
| • | 2 | 2 | 2 | 3 | 8 | 8 | 8 | 1 | |
| × | 5 | 4 | 4 | 5 | 7 | 5 | 5 | 8 | |
| ⊗ | 8 | 7 | 9 | 9 | 6 | 1 | 1 | 9 | |
| □ | 9 | 9 | 10 | 10 | 9 | 7 | 6 | 3 | |
| ◇ | 1 | 10 | 3 | 1-2 | 10 | 10 | 10 | 10 | |
| ▼ | 3 | 1 | 1 | 1-2 | 5 | 9 | 9 | 4 | |

Pe baza tabelului 2.3.1 și a fig.2.3.2 se poate evidenția "cel mai bun" comportament realizat:

- în raport cu referința: SRA cu RG proiectat pe baza urmaririi unui MM de referința al PC (▼), urmat de SRA cu RG proiectat pe baza minimizării lui J_3^v (•) și de SRA cu RG proiectat în domeniul pulsație (▲);
- în raport cu perturbația: SRA cu RG proiectat pe baza minimizării lui J_2^v (○), urmat de SRA cu RG proiectat pe baza minimizării lui J_4^v (⊗) și de SRA cu RG proiectat pe baza minimizării lui J_1^w (△);
- în raport cu modificările parametrilor PC: SRA cu RG proiectat în domeniul pulsație (▲) și SRA cu RG proiectate pe baza minimizării lui J_1^w (△) și J_2^w (▽).

4) Situația $\alpha_3 = 0$ (echivalenta pentru aplicația considerata cu condiția $\alpha_\omega = 0$ corespunzatoare funcționării în gol a HG necuplat la SE) nu ridică probleme de calcul ci numai de stabilitate deoarece f.d.t. a sistemului deschis are expresiile:

- pentru SRA convenționala cu RG-PI:

$$H_0(s) = \frac{k_R k_{PC} (1 - T_1 s)(1 + T_1 s)}{T_1 T_3 s^2 (1 + T_2 s)} \tag{2.3.2}$$

- pentru SRA cu RG proiectat algoritmic pe baza urmaririi unui MM de referința al PC:

$$H_0(s) = \frac{(1 + T_3 s)(1 - T_1 s)}{T_3 s^2 (2 T_{imp} + T_1 + T_{imp}^2 s)} \quad (2.3.3)$$

Datorită caracterului de sistem cu fază neminimă corelat cu caracterul integrator al PC, f.d.t. din relațiile (2.3.2) și (2.3.3) implică o valoare foarte scăzută a rezervei de fază și, deci, dificultăți foarte mari legate de stabilizare reflectate în comportamentul SRA. Prin urmare, este necesar ca situația $\alpha_3 = 0$ să fie tratată cu atenție sporită; ca soluții posibile se au în vedere utilizarea unor alte f.d.t. aferente RG sau, în unele situații, a două seturi de parametri de acordare ai RG, dintre care unul să corespundă reproiectării RG în situația $\alpha_3 = 0$.

5) Studiul efectuat da recomandări privind alegerea unor structuri și metode clasice de conducere a SFN. Deși pentru mai multe situații performanțele pot fi considerate bune, se pune însă întrebarea dacă utilizarea unor metode neconvenționale de conducere - în speța, a conducerii fuzzy - nu poate da satisfacție.

Cap. III. DEZVOLTAREA UNOR STRUCTURI DE REGULATOARE FUZZY DESTINATE
CONDUCERII SISTEMELOR CU FAZĂ NEMINIMĂ

3.1. Considerații generale

Regulatoarele fuzzy (RG-F) au la baza teoria mulțimilor vagi (fuzzy) elaborata de Lofti A. Zadeh în 1963 prin lucrarea (Zadeh, 1963). Prima aplicație în tehnica reglării automate a fost realizata de E.H. Mamdani în 1974, iar prima explozie a aplicațiilor de conducere fuzzy a avut loc în anii 1980 - 1990 în Japonia și a vizat atât domeniul conducerii proceselor industriale cât și pe cel al aplicațiilor electrocasnice.

În lucrarea de referință (Pfeiffer și Isermann, 1993a) se menționează situațiile în care conducerea fuzzy poate fi aplicata cu succes:

- procesul condus este neliniar;
- modelul matematic al PC este (parțial) necunoscut;
- sunt disponibile cunoștințe și experiența din partea unui operator uman care a condus o buna perioada de timp procesul;
- este posibila realizarea de sisteme de conducere ierarhizata;
- se utilizeaza deja regulatoare bazate pe reguli.

În aceeași lucrare se punctează și principalele domenii de aplicații industriale ale conducerii fuzzy (reglajului fuzzy) (la nivelul anului 1992/1993):

- reglarea turajăiei acționarilor cu motoare de curent continuu, curent alternativ, pas cu pas ș.a.;
- conducerea servosistemelor hidraulice, pneumatice ș.a.;
- reglarea concentrației amestecurilor, a pH-ului apelor reziduale și a unor procese biologice;
- reglarea amestecurilor și a reacțiilor din unele reactoare chimice;
- reglarea temperaturii unor procese din energetica, industria materialelor de construcție ș.a.;
- conducerea manipuletoarelor și a roboților industriali.

Faptul ca până în prezent nu s-au realizat/nu sunt prezentate în literatura (dupa cunoștințele autorului) studii privind utilizarea regulatoarelor fuzzy în conducerea sistemelor cu faza neminima se datorează comportarii particulare a proceselor cu faza neminima. Aceasta comportare implica reconsiderarea unora din aspectele legate de dezvoltarea regulatoarelor fuzzy și justifică alegerea acestei teme de cercetare - la îndemnul conducătorului științific - de catre autor.

Bazele matematice ale reglajului fuzzy sunt bine cunoscute și prezentate mai mult sau mai puțin detaliat în literatura de specialitate. Aici este momentul sa fie amintit faptul ca printre pionierii în domeniu se înscriu românii C.V. Negoita și D.A. Ralescu, prin lucrarea (Negoita și Ralescu, 1974) în care s-au intuit chiar și aplicații de reglaj fuzzy. Alte cărți de referință privind reglajul fuzzy sunt: (Zimmermann, 1985), (Tilli, 1991), (Driankov ș.a., 1993), (Kruse ș.a., 1993), (Bühler, 1994) ș.a. Deosebit de utile sunt și sintezele privind reglajul fuzzy, cum ar fi: (Lee, 1990a), (Lee, 1990b) și (Preuß 1992a), (Preuß, 1992b).

Reglajul fuzzy fiind încă un domeniu relativ nou în cadrul conducerii automate a proceselor, notațiile și chiar terminologia utilizate atât în limba engleza cât și în limba română nu sunt încă unificate, ceea ce explică faptul că în literatura de specialitate pentru unii termeni se întâlnesc denumiri diferite; în cadrul lucrării (Precup și Preitl, 1995c) pentru o bună parte din termenii întâlniți se încearcă o unificare a terminologiei în limba română.

Schema de baza principială aferentă unui RG-F este prezentată în fig.3.1.1.

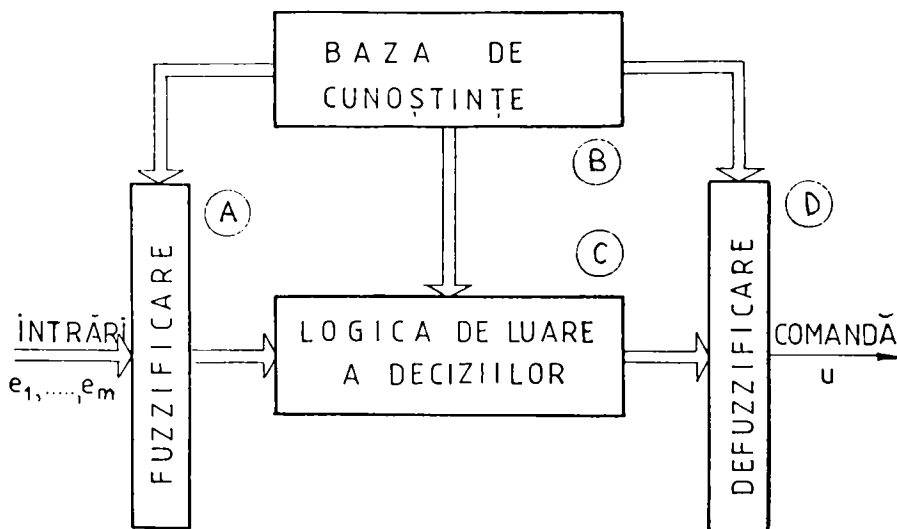


Fig.3.1.1. Configurația de baza a unui RG-F.

Schema bloc din fig.3.1.1 pune în evidență componentele funcționale ale unui RG-F:

- A) modulul de fuzzificare;
- B) baza de cunoștințe alcătuită din:
 - B1) baza de date (informații),
 - B2) baza de reguli;
- C) modulul de luare a deciziilor;
- D) modulul de defuzzificare.

Principalele elemente - care apar în cadrul celor patru module anterior precizate - care stau la baza dezvoltării unui RG-F și, în același timp, pot influența proprietățile unui RG-F, sunt:

- A) Strategia de fuzzificare;
- B1) - discretizarea și normalizarea universurilor discursurilor,

- partiționarea fuzzy a spațiilor de intrare și ieșire,
 - completitudinea bazei de date (informații),
 - funcțiile de apartenență ale mulțimilor fuzzy primare;
- B2) - completitudinea bazei de reguli,
- numărul de reguli,
 - tipurile regulilor,
 - consistența regulilor,
 - interactivitatea regulilor;
- C) Tipul de inferență fuzzy;
- D) Strategia de defuzificare.

Un RG-F propriu-zis (conform fig.3.1.1) reprezintă un element neliniar, fără dinamică. Dinamica se introduce practic în afara RG-F propriu-zis în următoarele două moduri:

- prelucrarea dinamică a marimilor de intrare (prealabil fuzzificării)
- prelucrarea dinamică a marimii de ieșire (comanda) ferme (ulterior defuzificării).

Principalele dificultăți care apar în dezvoltarea reguletoarelor fuzzy sunt legate de:

- numărul foarte mare de grade de libertate în proiectare,
- necesitatea asigurării unor proprietăți dinamice suplimentare (de exemplu, forțări, efect de integrare ș.a.),
- în unele situații, baze de cunoștințe incomplete.

Din aceste motive, în practică se apelează adeseori variante fuzzificate ale reguletoarelor convenționale. Aceste reguletoare pot fi acordate fie experimental, fie pe baza unor strategii de optimizare dinamică. Este de așteptat ca reguletorul convențional fuzzificat să redea - mai mult sau mai puțin - proprietățile reguletorului de bază din care a fost dezvoltat.

În literatura sunt prezentate fuzzificări ale majorității reguletoarelor convenționale (de exemplu, (Kawaji ș.a., 1991), (Galichet și Foulloy 1993), (Bühler, 1994) ș.a.), iar reguletoarele fuzzy cvasitipizate obținute, bazate pe reguletoare convenționale de tip P, PI, PD și PID, sunt cunoscute sub numele de reguletoare fuzzy de tip cvasi-P (RG-F-P), cvasi-PI (RG-F-PI), cvasi-PD (RG-F-PD), respectiv cvasi-PID (RG-F-PID). Problema dezvoltării unor astfel de reguletoare a stat și în atenția autorului; prin lucrările (Precup și Preitl, 1993), (Precup și Preitl, 1994b), (Preitl și Precup, 1994a), (Precup și Preitl, 1995b), (Preitl și Precup, 1995) autorul tezei a propus (în colaborare) diverse variante de reguletoare fuzzy cvasitipizate.

RG-F cu dinamică dezvoltate de autor și prezentate în cadrul tezei prezintă următoarele avantaje:

- sunt simplu de proiectat;
- nu necesită o modelare matematică exactă a procesului condus;
- asigură performanțe de regim dinamic și staționar foarte bune în SRA în care sunt încadrate,

- superioare performanțelor asigurate de regulatoarele convenționale;
- față de comportamentul asigurat de regulatoarele convenționale, pot asigura sistemelor de reglare automată în care sunt încadrate un comportament mai bun la modificările parametrilor procesului condus.

Ca dezavantaje ale reglajului fuzzy - comune și pentru regulatoarele dezvoltate în cadrul tezei - se menționează următoarele:

- necesită experiența din partea proiectantului în ceea ce privește selectarea unor parametri liberi ai RG-F astfel încât să se obțină cel mai bun comportament al SRA cu RG-F;
- datorită volumului mare de calcule implementarea este mai dificilă în comparație cu implementarea regulatoarelor convenționale.

Cele cinci tipuri de regulatoare fuzzy dezvoltate în zece variante bazate pe RG-F-PI în varianta standard prezentate în cadrul tezei sunt următoarele:

- RG-F-PI în varianta standard (paragraful 3.2):
 - RG-F-PI cu integrare pe ieșire în varianta standard (RG-F-PI-IE standard),
 - RG-F-PI cu integrare pe intrare în varianta standard (RG-F-PI-II standard);
- RG-F-PI cu baza de reguli modificată, în două variante (paragraful 3.3):
 - RG-F-PI-IE cu baza de reguli modificată,
 - RG-F-PI-II cu baza de reguli modificată;
- RG-F-PI cu baza de reguli modificată și distribuție modificată a funcțiilor de apartenență aferente termenilor lingvistici ai comenzii, în două variante (paragraful 3.4):
 - RG-F-PI-IE cu baza de reguli modificată și distribuție modificată a funcțiilor de apartenență aferente termenilor lingvistici ai comenzii,
 - RG-F-PI-II cu baza de reguli modificată și distribuție modificată a funcțiilor de apartenență aferente termenilor lingvistici ai comenzii;
- RG-F-PI cu structura variabilă, în două variante (paragraful 3.5):
 - RG-F-PI-IE cu structura variabilă,
 - RG-F-PI-II cu structura variabilă;
- RG-F-PI-IE cu viteza de integrare variabilă, în două variante (paragraful 3.6):
 - RG-F-PI-IE cu viteza de integrare variabilă în funcție de valoarea actuală a erorii de reglare și de valoarea actuală a incrementului erorii de reglare,
 - RG-F-PI-IE cu viteza de integrare variabilă în funcție de valoarea actuală a erorii de reglare și de valoarea anterioară a comenzii.

3.2. Regulatorul fuzzy de tip cvazi-PI în varianta standard

Componenta I a unui RG-F propriu-zis (fără dinamică) se poate introduce în două moduri:

I. pe ieșirea RG-F, rezultând așa-numitul RG-F-PI cu integrare pe ieșire în varianta standard (RG-F-PI-IE standard);

II. pe intrarea RG-F, rezultând așa-numitul RG-F-PI cu integrare pe intrare în varianta standard (RG-F-PI-II standard).

I. RG-F-PI-IE standard se caracterizează prin introducerea dinamicii sub forma derivării (numerice a) erorii de reglare și a integrării (numerice a) incrementului comenzii.

În dezvoltarea regulatorului se pornește de la f.d.t. a unui RG-PI convențional sub forma (2.2.1.5); prin discretizare cu metoda trapezelor (de exemplu, (Isermann, 1977)) se obține ecuația discretă aferentă algoritmului de reglare numerică (ARN) cvasicontinuala de tip PI (ARN-PI) în varianta incrementală (de viteză):

$$\Delta u_k = K_p \Delta e_k + K_i e_k = K_p (\Delta e_k + \alpha e_k), \quad (3.2.1)$$

în care parametrii au expresiile:

$$K_p = k_R (1 - T_e/2T_i), \quad (3.2.2)$$

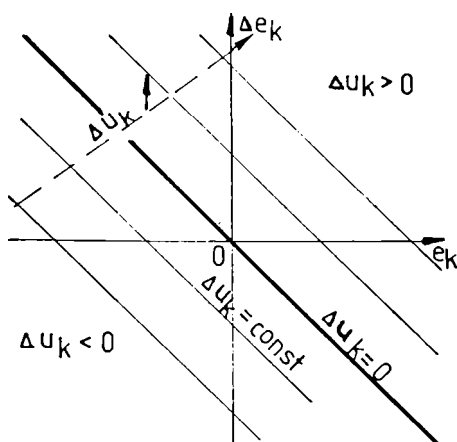
$$K_i = k_R T_e/T_i, \quad (3.2.3)$$

$$\alpha = K_i/K_p = 2 T_e/(2 T_i - T_e). \quad (3.2.4)$$

Semnificația parametrilor din relațiile (3.2.1) ... (3.2.4) este: k_R, T_i - parametrii RG-PI convențional; T_e - perioada de eșantionare (pasul de discretizare); e_k - eroarea de reglare la al k-lea pas de discretizare; $\Delta e_k = e_k - e_{k-1}$ - incrementul erorii de reglare; u_k - comanda la al k-lea pas de discretizare; $\Delta u_k = u_k - u_{k-1}$ - incrementul comenzii.

Observație: Pe parcursul tezei se folosește notația consacrată $x_k = x(k T_e)$.

Pe baza relației (3.2.1) și a reprezentării incrementului comenzii Δu_k în planul fazelor



$\Delta u_k, e_k$ se pot stabili că eva din proprietățile pseudofuzzy ale ARN-PI în varianta cvasicontinuala incrementală conform fig.3.2.1:

a) există "dreapta de comandă nulă" $\Delta u_k = 0$ cu ecuația:

$$\Delta e_k + \alpha e_k = 0; \quad (3.2.5)$$

b) în raport cu această dreaptă punctele din semiplanul superior și din semiplanul inferior drepte sunt caracterizate de $\Delta u_k > 0$, respectiv $\Delta u_k < 0$;

c) distanța de la un punct al planului fazelor la "dreapta de comandă nulă" corespunde modului u incrementului comenzii $|\Delta u_k|$.

Fig.3.2.1. Reprezentarea în planul fazelor aferentă ARN-PI.

În esență, RG-F-PI-IE are două intrări (variabile lingvistice de intrare) - eroarea de reglare e_k și incrementul erorii de reglare Δe_k - și o ieșire (variabila lingvistică de ieșire), incrementul comenzii Δu_k .

În varianta clasică problema fuzificării se rezolvă prin alegerea unor funcții de apartenență de tip triunghiular uniform distribuite cu grad de acoperire 1 pentru e_k și Δe_k și de tip singleton pentru Δu_k , fig.3.2.2; parametrii specifici RG-F-PI-IE, $\{B_e, B_{\Delta e}, B_{\Delta u}\}$, sunt corelați cu formele funcțiilor de apartenență aferente termenilor lingvistici ai intrărilor și ieșirii.

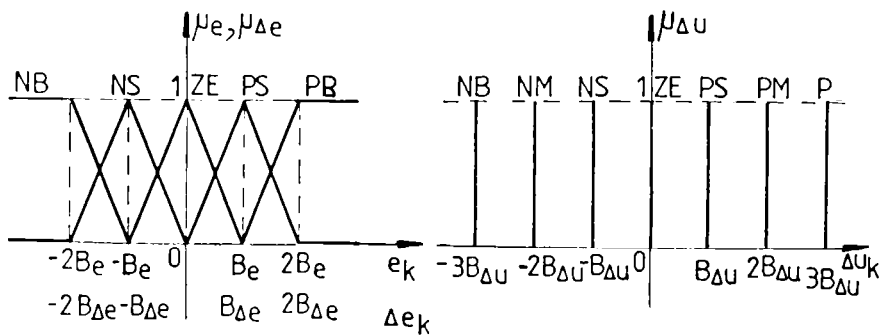


Fig.3.2.2. Alura funcțiilor de apartenență pentru e_k (μ_{e_k}), Δe_k ($\mu_{\Delta e}$) și Δu_k ($\mu_{\Delta u}$).

Tabelul 3.2.1. Tabelul de decizie aferent RG-F-PI-IE standard.

| $e_k \backslash \Delta e_k$ | NB | NS | ZE | PS | PB |
|-----------------------------|----|----|----|----|----|
| PB | ZE | PS | PM | PB | PB |
| PS | NS | ZE | PS | PM | PB |
| ZE | NM | NS | ZE | PS | PM |
| NS | NB | NM | NS | ZE | PS |
| NB | NB | NB | NM | NS | ZE |

Baza de reguli completa a RG-F-PI-IE standard se construiește (ținând seama de proprietățile pseudo-fuzzy a), b) și c) enunțate. Pentru câte 5 termeni lingvistici ai intrărilor rezulta 25 de reguli care sunt sintetizate într-un tabel de decizie (cautare) de tip MacVicar-Whelan prezentat în tabelul 3.2.1 (utilizat, de exemplu, și în (Kawaji ș.a., 1991)).

Parametrii specifici RG-F-PI-IE $\{B_e, B_{\Delta e}, B_{\Delta u}\}$ se fixează prin parcurgerea următoarelor etape (Precup și Preitl, 1993):

- în lungul "drepte de comanda nulă" are loc relația:

$$\alpha = -\Delta e_k / c_k = B_{\Delta e} / B_e; \quad (3.2.6)$$

- în lungul drepteii caracterizate de $\Delta u_k = B_{\Delta u}$ este îndeplinită relația (3.2.7):

$$B_{\Delta u} = \Delta u_k = K_p (\Delta e_k + \alpha e_k) = K_p [(-\alpha e_k + B_{\Delta e}) + \alpha e_k]; \quad (3.2.7)$$

- prin urmare, ținând seama de expresia (3.2.4) referitoare la valoarea lui α și de relațiile (3.2.6) și (3.2.7), rezulta:

$$B_{\Delta e} = \alpha B_e, \quad B_{\Delta u} = K_i B_e, \quad (3.2.8)$$

unde parametrul (liber) strict pozitiv B_e se alege conform experienței proiectantului.

Prin aceasta, parametrii $\{k_R, T_i\}$ specifici RG-PI convențional (obținuți printr-o metoda clasică de proiectare algoritmică) se reflectă - via parametrii $\{K_p, K_I, \alpha\}$ specifici ARN-PI din varianta cvasicontinuală incrementală - în parametrii $\{B_e, B_{\Delta e}, B_{\Delta u}\}$ specifici RG-F-PI-IE.

Pentru inferența s-a ales metoda max-min a lui Mamdani (prezentată în literatură, de exemplu, în (Lee, 1990b)), iar defuzificarea s-a realizat prin metoda centrului de greutate aplicată la singletonuri (de exemplu, (Berenji, 1993)).

Legat de RG-F-PI-IE standard prezintă interes evidențierea următoarelor aspecte care trebuie luate în seama:

1) RG-F-PI-IE furnizează la ieșire dependent de proprietățile elementului de execuție (EE):

- incrementul comenzii Δu_k pentru EE cu caracter integrator,
- comanda u_k pentru EE cu caracter proporțional (acesta este cazul aplicației considerate), u_k se calculează pe baza relației:

$$u_k = u_{k-1} + \Delta u_k. \quad (3.2.9)$$

Relația (3.2.9) corespunde unui bloc de integrare numerică pe ieșirea regulatorului și are f.d.t. (în z):

$$H^E(z) = \frac{u(z)}{\Delta u(z)} = \frac{1}{1 - z^{-1}}. \quad (3.2.10)$$

Schema bloc informațională a RG-F-PI-IE standard se prezintă în fig.3.2.3. Schema evidențiază prelucrările dinamice suferite de unele mărimi ale RG-F (propriu-zis, fără dinamica) și justifică denumirea de RG-F-PI cu integrare pe ieșire acordată acestui tip de regulator fuzzy.

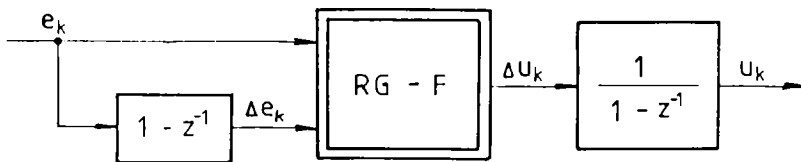


Fig.3.2.3. Schema bloc informațională aferentă RG-F-PI-IE standard.

2) Aceasta varianta de RG-F-PI poate fi dezvoltata pornind de la un RG-PI convențional cu f.d.t. (2.2.1.5) proiectat algoritmic cu una din metodele clasice prezentate în capitolul II, ce are drept rezultat parametrii $\{k_R, T_I\}$. Perioada de eșantionare T_e se alege astfel încât sa se asigure cerințele unei conduceri cvasicontinue (de exemplu, (Dumitrache, 1980)); parametrii $\{K_p, K_I, \alpha\}$ specifici ARN-PI în varianta cvasicontinuala incrementală se determina pe baza relațiilor (3.2.2) ... (3.2.4). Pe baza de încercări/experiența se alege B_e și aplicând relația (3.2.8) rezulta ceilalți doi parametri $\{B_{\Delta e}, B_{\Delta u}\}$ specifici RG-F-PI-IE.

3) Prin modul în care a fost dezvoltat, se poate aprecia că RG-F-PI-IE standard este echivalent ARN-PI cvasicontinual incremental din care a fost dezvoltat; de menționat este faptul că echivalența se pastrează numai în anumite zone ale spațiului fazelor (în speța, într-o vecinătate apropiată a "drepte de comanda nulă"), motiv pentru care RG-F propus este considerat a fi de tip cvasi-PI (Preitl ș.a., 1993c).

4) Problema discretizării, scalării și normalizării mulțimilor de baza pe care sunt definite funcțiile de apartenență ale mulțimilor fuzzy se rezolvă prin alegerea adecvată a parametrului B_e .

5) RG-F-PI-IE standard poate conduce la îmbunătățirea performanțelor SRA în care este încadrat, ceea ce constituie un avantaj față de cazul clasic al RG-PI discret de baza.

Performanțele ce pot fi realizate de un SRA cu RG-F-PI-IE standard în conducerea unui sistem cu faza neminimă se testează pe studiul de caz luat în considerare (paragraful 2.1).

Proiectarea în domeniul pulsație (frecvența) (de exemplu) a condus la un RG-PI convențional cu f.d.t. (2.2.1.5) și parametrii având următoarele valori (care asigură o rezerva de faza de aproximativ 50° , relațiile (2.2.1.8) și (2.2.1.10)):

$$k_R = 1.1, \quad T_I = 6.8 \text{ sec.} \quad (3.2.11)$$

Prin alegerea perioadei de eșantionare:

$$T_e = 50 \text{ msec} = 0.05 \text{ sec}, \quad (3.2.12)$$

acceptată de elementul de execuție al SRA-V (Precup și Preitl, 1993) - se obțin parametrii specifici ARN-PI în varianta cvasicontinuala incrementală:

$$K_p = 1.096, \quad K_I = 0.0081, \quad \alpha = 0.0074. \quad (3.2.13)$$

Fie $B_e = 0.5$ (valoarea este rezultatul unor încercări); prin aplicarea relației (3.2.8) rezulta ceilalți parametri ai RG-F-PI-IE standard:

$$B_{\Delta e} = 0.0037, \quad B_{\Delta u} = 0.004. \quad (3.2.14)$$

Rezultatele de simulare numerică a comportării SRA în raport cu modificarea treapta a referinței la utilizarea RG-F-PI-IE standard sunt prezentate în tabelul 3.2.2.

SRA cu RG-F-PI-IE standard dezvoltat asigură următoarele performanțe în raport cu perturbația: răspuns indicial de tip a, $t_M^* = 5.75 \text{ sec}$, $\sigma_1^* = 46.26 \%$, $t_r^* = 28.35 \text{ sec}$.

Tabelul 3.2.2. Performanțele SRA cu RG-F-PI-IE standard definite în răspunsul indicial în raport cu w .

| Nr. crt. | Parametri PC | Tip de răspuns | Indicatori de calitate | | |
|----------|---|----------------|------------------------|----------------|-------------|
| | | | t_1 [sec] | σ_1 [%] | t_0 [sec] |
| 1 | $\alpha_y = K_{qh}^* = \alpha_\omega = 1$ | C | 2.7 | 14.31 | 4.1 |
| 2 | $\alpha_y = 1.25$ $K_{qh}^* = \alpha_\omega = 1$ | C | 2.7 | 15.56 | 4.05 |
| 3 | $\alpha_y = 0.75$ $K_{qh}^* = \alpha_\omega = 1$ | C | 2.7 | 13.13 | 4.15 |
| 4 | $K_{qh}^* = 1.25$ $\alpha_y = \alpha_\omega = 1$ | C | 3.3 | 16.59 | 4.75 |
| 5 | $K_{qh}^* = 0.75$ $\alpha_y = \alpha_\omega = 1$ | C | 2.05 | 12.48 | 3.05 |
| 6 | $\alpha_\omega = 0.5$ $\alpha_y = K_{qh}^* = 1$ | A | 2.85 | 14.82 | 4.45 |
| 7 | $\alpha_\omega = 0$ $\alpha_y = K_{qh}^* = 1$ | B | 3 | 15.46 | 4.95 |

Tabelul 3.2.2. Continuare.

| Nr. crt. | Indicatori de calitate | | | | | |
|----------|------------------------|----------------|-------------|-------------|----------------|-------------|
| | t_m [sec] | σ_1 [%] | t_1 [sec] | t_m [sec] | σ_2 [%] | t_r [sec] |
| 1 | - | - | - | - | - | 27.1 |
| 2 | - | - | - | - | - | 25.8 |
| 3 | - | - | - | - | - | 29.7 |
| 4 | - | - | - | - | - | 24.8 |
| 5 | - | - | - | - | - | 28.5 |
| 6 | 22.2 | 7.08 | 17.5 | - | - | 22.75 |
| 7 | 19.5 | 42.11 | 13.2 | 35.2 | 20.12 | 55.5 |

Analizând performanțele realizate de SRA cu RG-F-PI-IE standard se constată că în ansamblu (în raport cu modificările referinței, perturbației și parametrilor PC) sunt mai bune în comparație cu performanțele

realizate de SRA cu RG-PI convențional (conform paragrafului 2.2.1); din acest punct de vedere se considera ca dezvoltarea acestei variante de RG-F poate fi justificata.

II. RG-F-PI-II standard are specifica introducerea dinamicii sub forma integrării (numerice a) erorii de reglare.

În dezvoltarea RG-F-PI-II standard se pornește de asemenea de la f.d.t. aferenta RG-PI convențional (2.2.1.5) cu parametrii $\{k_R, T_i\}$; prin discretizare cu metoda trapezelor se obține următoarea f.d.t. în z aferenta RG-PI numeric:

$$H_R(z) = K_I \frac{1}{1 - z^{-1}} + K_P, \quad (3.2.15)$$

în care parametrii K_P și K_I au expresiile (3.2.2) respectiv (3.2.3).

Notând cu e_{k-1} integrala erorii de reglare, calculata conform ecuației discrete (3.2.16):

$$e_{k-1} = e_{k-1} + e_k \quad (3.2.16)$$

și punând în evidența f.d.t. în z a blocului de integrare numeric necesar a fi plasat pe intrarea RG-F:

$$H^I(z) = \frac{e(z)}{e(z)} = \frac{1}{1 - z^{-1}}, \quad (3.2.17)$$

rezulta ARN-PI cvasicontinual în varianta de poziție caracterizat prin ecuațiile discrete (3.2.16) și (3.2.18):

$$u_k = K_I e_{k-1} + K_P e_k = K_P^* e_{k-1} + K_I^* e_k = K_P^* (e_{k-1} + \alpha^* e_k). \quad (3.2.18)$$

Parametrii K_P^* , K_I^* și α^* au următoarele expresii:

$$K_P^* = K_I = k_R T_e / T_i, \quad (3.2.19)$$

$$K_I^* = K_P = k_R (1 - T_e / 2 T_i), \quad (3.2.20)$$

$$\alpha^* = K_I^* / K_P^* = 1 / \alpha = T_i / T_e - 1 / 2. \quad (3.2.21)$$

Schema bloc informațională aferenta RG-F-PI-II standard, care ilustrează efectuarea integrării (numerice) pe intrarea RG-F propriu-zis, este prezentată în fig.3.2.4.

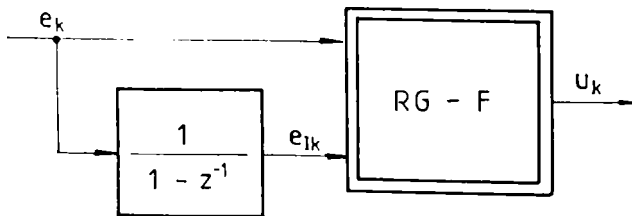


Fig.3.2.4. Schema bloc informațională aferenta RG-F-PI-II standard.

RG-F-PI-II standard se dezvoltă prin analogie cu cazul RG-F-PI-IE standard prezentat anterior. Analogia constă în faptul că se păstrează alăturile funcțiilor de apartenență, tabelul de decizie, metoda de inferență și metoda de defuzzificare. Singurele deosebiri apar în faptul că:

- RG-F-PI-II standard admite ca variabile lingvistice de intrare pe e_k și e_{rk} cu funcțiile de apartenență μ_e (de parametru B_e) și μ_{ei} (de parametru B_{ei}) (fața de e_k și respectiv Δe_k din cazul RG-F-PI-IE standard);
- RG-F-PI-II standard are comanda u_k (cu funcția de apartenență μ_u și parametrul B_u) ca variabila lingvistică de ieșire (fața de incrementul comenzii Δu_k din cazul RG-F-PI-IE standard).

Prin urmare, executând schimbările e_{rk} în loc de Δe_k și u_k loc de Δu_k atât alăturile funcțiilor de apartenență din fig.3.2.2 cât și tabelul de decizie din tabelul 3.2.1 își mențin valabilitatea și pentru RG-F-PI-II standard.

Parametrii specifici RG-F-PI-II standard sunt $\{B_e, B_{ei}, B_u\}$, iar relațiile de proiectare (de tip (3.2.8)) sunt următoarele:

$$B_{ei} = \alpha^* B_e, \quad B_u = K_I^* B_e; \quad (3.2.22)$$

parametrul B_e va fi ales conform experienței proiectantului de SRA.

Aspectele 2) ... 5) prezentate anterior rămân valabile și în acest caz cu observația că trebuie luate în considerare cele două schimbări menționate.

Pentru testarea performanțelor ce pot fi realizate de un SRA cu RG-F-PI-II standard în conducerea unui SFN se apelează studiul de caz considerat.

Acceptând valorile parametrilor RG-PI convențional din relația (3.2.11) și valoarea perioadei de eșantionare conform relației (3.2.12), din relațiile (3.2.19) ... (3.2.21) rezultă parametrii ARN-PI cvasicontinual în varianta de poziție:

$$K_p^* = 0.0081, K_I^* = 1.096, \alpha^* = 135.5. \quad (3.2.23)$$

Alegând din nou $B_e = 0.5$, din relația (3.2.22) se obțin ceilalți doi parametri ai RG-F-PI-II standard:

$$B_{ei} = 67.75, B_u = 0.548. \quad (3.2.24)$$

Performanțele în raport cu referința realizate de SRA cu RG-F-PI-II standard dezvoltat sunt redată sintetic în tabelul 3.2.3.

Tabelul 3.2.3. Performanțele SRA cu RG-F-PI-II standard definite în răspunsul indicial în raport cu w .

| Nr. crt. | Parametri PC | Tip de răspuns | Indicatori de calitate | | |
|----------|---|----------------|------------------------|-------------------|-------------|
| | | | $t_{.1}$ [sec] | $\sigma_{.1}$ [%] | t_0 [sec] |
| 1 | $\alpha_y = K_{qn}^* = \alpha_\omega = 1$ | A | 1.77 | 14.77 | 2.97 |
| 2 | $\alpha_y = 1.25$ $K_{qn}^* = \alpha_\omega = 1$ | B | 1.77 | 19.69 | 2.82 |

| | | | | | |
|---|--|---|------|-------|------|
| 3 | $\alpha_y=0.75$ $K_{qh}^*=\alpha_w=1$ | A | 2.25 | 12.06 | 3.2 |
| 4 | $K_{qh}^*=1.25$ $\alpha_y=\alpha_w=1$ | B | 2.35 | 20.79 | 3.45 |
| 5 | $K_{qh}^*=0.75$ $\alpha_y=\alpha_w=1$ | C | 1.55 | 10.03 | 2.35 |
| 6 | $\alpha_w=0.5$ $\alpha_y=K_{qh}^*=1$ | A | 1.92 | 16.15 | 2.87 |
| 7 | $\alpha_w=0$ $\alpha_y=K_{qh}^*=1$ | B | 1.93 | 17.22 | 3.13 |

Tabelul 3.2.3. Continuare.

| Nr. crt. | Indicatori de calitate | | | | | |
|----------|------------------------|----------------|-------------|-------------|----------------|-------------|
| | t_w [sec] | σ_1 [%] | t_1 [sec] | t_m [sec] | σ_2 [%] | t_r [sec] |
| 1 | 14.4 | 8.9 | 11.7 | - | - | 21.4 |
| 2 | 11.5 | 14.04 | 8.6 | 16.25 | 4.56 | 42.6 |
| 3 | 19.2 | 7.83 | 17.2 | - | - | 27 |
| 4 | 14.45 | 22.92 | 11 | 27 | 2.14 | 32.5 |
| 5 | - | - | - | - | - | 15.3 |
| 6 | 13.5 | 35.32 | 8.5 | - | - | 34.4 |
| 7 | 14.6 | 74.54 | 10 | 29.8 | 30.88 | 57.85 |

În raport cu perturbația se obțin următoarele performanțe realizate de SRA cu RG-F-PI-II standard: răspuns indicial de tip a, $t_m^* = 5.1$ sec, $\sigma_1^* = 44.6$ %, $t_r^* = 30.4$ sec.

Analizând performanțele realizate de SRA cu RG-F-PI-II standard se observa din nou îmbunătățirea comportamentului în raport cu modificările referinței, perturbației și parametrilor PC fața de comportamentul SRA cu RG-PI convențional; din acest punct de vedere dezvoltarea acestei variante de RG-F poate fi justificată.

Noutatea și avantajul deosebit aduse de cele două variante standard de RG-F-PI constau în modalitatea simplă de dezvoltare - prin analogie cu situația RG-F-PD conform (Kawaji ș.a., 1991) - în raport cu alte modalități de dezvoltare prezentate, de exemplu, în (Bühler, 1994). Autorul a publicat (în colaborare) lucrarea (Preitl și Precup, 1993) referitoare la dezvoltarea RG-F-PI-IE standard, în timp ce dezvoltarea RG-F-

PI-II standard conform celor prezentate anterior apare pentru prima data în cadrul acestei teze.

Din experiența autorului dar și din adnotările din literatura se poate afirma ca cele doua variante standard de RG-F-PI dau satisfacție deplină și se recomanda a fi utilizate în general la conducerea sistemelor cu faza minima, nu neaparat la conducerea SFN. Deși performanțele realizate de SRA a proceselor cu faza neminima care includ cele doua variante standard de RG-F-PI sunt superioare performanțelor realizate de SRA clasice, pentru îmbunătățirea în continuare a performanțelor SRA sunt justificate/necesare modificari ale RG-F-PI.

3.3. Regulatorul fuzzy de tip cvasi-PI cu baza de reguli modificata

Un dezavantaj al RG-F-PI-IE standard îl constituie valoarea relativ mare a modulului incrementului comenzii Δu_k în cazul în care e_k și Δe_k au același semn; similar, dezavantajul RG-F-PI-II standard îl constituie valoarea mare a modulului comenzii u_k în cazul în care e_k și e_{k-1} au același semn.

Dezavantajele menționate se manifesta cu pregnanța în cazul conducerii sistemelor cu faza neminima (și, în particular, în cazul SFN2-IZP) prin valorile mari ale suprareglajului și subreglajului, datorate prezenței zeroului pozitiv în f.d.t. a procesului condus (2.1.1).

O modalitate posibila de compensare a acestor dezavantaje și de îmbunătățire a performanțelor SRA - introdusa de autor prin (Precup și Preitl, 1994b) - consta în modificarea a șase reguli din baza de reguli atât a RG-F-PI-IE standard cât și a RG-F-PI-II standard, corezpunzatoare aceluiasi semn (strict pozitiv și respectiv strict negativ) al lui e_k și Δe_k , respectiv e_k și e_{k-1} ; ca rezultat se obține tabelul de decizie prezentat în tabelul 3.3.1 pentru cazul RG-F-PI-IE, cele șase reguli modificate fiind marcate prin hașurare.

Tabelul 3.3.1. Tabelul de decizie aferent RG-F-PI-IE cu baza de reguli modificata.

| $\Delta e_k \backslash e_k$ | NB | NS | ZE | PS | PB |
|-----------------------------|----|----|----|----|----|
| PB | ZE | PS | PM | PS | PS |
| PS | NS | ZE | PS | PM | PS |
| ZE | NM | NS | ZE | PS | PM |
| NS | NS | NM | NS | ZE | PS |
| NB | NS | NS | NM | NS | ZE |

Tabelul de decizie aferent RG-F-PI-II cu baza de reguli modificata are același conținut cu cel din tabelul 3.3.1, cu obsrvația ca în locul lui Δe_k se va considera e_{k-1} .

Celelalte 19 reguli ale bazei de reguli aferente celor doua RG-F-PI rămân nemodificate; de asemenea, se pastreaza nemodificate metodele de fuzzificare, defuzzificare, inferența, baza de date precum și schemele bloc informaționale din fig.3.2.3 și 3.2.4 aferente celor doua regulatoare fuzzy.

Regulatorul modificat se dezvolta urmarind etapele din paragraful 3.2, iar constanta de timp de

integrare T_i rămâne de aceeași valoare; pentru a crește viteza de răspuns a SRA coeficientul de transfer k_R se poate alege de valoare mai mare.

În concret, pentru studiul de caz acceptat al conducerii unui proces de tip SFN2-1ZP se obține succesiv:

a) pentru cazul RG-F-PI-IE cu baza de reguli modificata:

$$k_R = 1.5, T_i = 6.8 \text{ sec}, \quad (3.3.1)$$

$$T_e = 0.05 \text{ sec}, K_p = 1.4945, K_i = 0.011, \alpha = 0.0074, \quad (3.3.2)$$

$$B_e = 0.5, B_{\Delta e} = 0.0037, B_{\Delta u} = 0.0055; \quad (3.3.3)$$

b) pentru cazul RG-F-PI-II cu baza de reguli modificata:

$$k_R = 1.5, T_i = 6.8 \text{ sec}, \quad (3.3.4)$$

$$T_e = 0.05 \text{ sec}, K_p^* = 0.011, K_i^* = 1.4945, \alpha^* = 135.5, \quad (3.3.5)$$

$$B_e = 0.5, B_{ei} = 67.75, B_u = 0.7473. \quad (3.3.6)$$

Performanțele în raport cu referința realizate de SRA cu RG-F-PI-IE cu baza de reguli modificata și SRA cu RG-F-PI-II cu baza de reguli modificata sunt ilustrate în tabelele 3.3.2 și respectiv 3.3.3.

Tabelul 3.3.2. Performanțele SRA cu RG-F-PI-IE cu baza de reguli modificata definite în răspunsul indicial în raport cu w .

| Nr. crt. | Parametri PC | Tip de răspuns | Indicatori de calitate | | |
|----------|--|----------------|------------------------|-------------------|-------------|
| | | | $t_{.1}$ [sec] | $\sigma_{.1}$ [%] | t_0 [sec] |
| 1 | $\alpha_y = K_{qh}^* = \alpha_w = 1$ | C | 2.9 | 9.59 | 4.35 |
| 2 | $\alpha_y = 1.25$ $K_{qh}^* = \alpha_w = 1$ | C | 2.95 | 10.57 | 4 |
| 3 | $\alpha_y = 0.75$ $K_{qh}^* = \alpha_w = 1$ | C | 2.9 | 8.54 | 4.3 |
| 4 | $K_{qh}^* = 1.25$ $\alpha_y = \alpha_w = 1$ | C | 3.6 | 11.66 | 5.1 |
| 5 | $K_{qh}^* = 0.75$ $\alpha_y = \alpha_w = 1$ | C | 2.2 | 7.79 | 3.2 |
| 6 | $\alpha_w = 0.5$ $\alpha_y = K_{qh}^* = 1$ | B | 3.05 | 10.05 | 4.65 |
| 7 | $\alpha_w = 0$ $\alpha_y = K_{qh}^* = 1$ | B | 3.2 | 10.63 | 4.7 |

Tabelul 3.3.2. Continuare.

| Nr. crt. | Indicatori de calitate | | | | | |
|----------|------------------------|----------------|-------------|-------------|----------------|-------------|
| | t_w [sec] | σ_1 [%] | t_1 [sec] | t_m [sec] | σ_2 [%] | t_r [sec] |
| 1 | - | - | - | - | - | 25.5 |
| 2 | - | - | - | - | - | 24.65 |
| 3 | - | - | - | - | - | 26.3 |
| 4 | - | - | - | - | - | 26 |
| 5 | - | - | - | - | - | 26.55 |
| 6 | 17.95 | 4.03 | 15.25 | 25.65 | 3.7 | 27.2 |
| 7 | 17.55 | 41.31 | 12.4 | 29 | 16.46 | 54.2 |

Tabelul 3.3.3. Performanțele SRA cu RG-F-PI-II cu baza de reguli modificata definite in raspunsul indicial in raport cu w.

| Nr. crt. | Parametri PC | Tip de răspuns | Indicatori de calitate | | |
|----------|--|----------------|------------------------|----------------|-------------|
| | | | t_1 [sec] | σ_1 [%] | t_0 [sec] |
| 1 | $\alpha_y = K_{qh}^* = \alpha_w = 1$ | A | 1.75 | 11.17 | 2.75 |
| 2 | $\alpha_y = 1.25$ $K_{qh}^* = \alpha_w = 1$ | B | 1.79 | 17.32 | 3.49 |
| 3 | $\alpha_y = 0.75$ $K_{qh}^* = \alpha_w = 1$ | A | 1.92 | 8.77 | 3.52 |
| 4 | $K_{qh}^* = 1.25$ $\alpha_y = \alpha_w = 1$ | A | 2.25 | 17.88 | 3.7 |
| 5 | $K_{qh}^* = 0.75$ $\alpha_y = \alpha_w = 1$ | C | 1.4 | 7.68 | 2.3 |
| 6 | $\alpha_w = 0.5$ $\alpha_y = K_{qh}^* = 1$ | A | 1.34 | 13.55 | 3.1 |
| 7 | $\alpha_w = 0$ $\alpha_y = K_{qh}^* = 1$ | B | 1.46 | 14.93 | 3.31 |

Tabelul 3.3.3. Continuare.

| Nr. crt. | Indicatori de calitate | | | | | |
|----------|------------------------|----------------|-------------|-------------|----------------|-------------|
| | t_m [sec] | σ_1 [%] | t_1 [sec] | t_m [sec] | σ_2 [%] | t_r [sec] |
| 1 | 15.7 | 6.62 | 11.75 | - | - | 22.65 |
| 2 | 11.45 | 14.8 | 8.4 | 16.9 | 4.38 | 41 |
| 3 | 27.4 | 6.57 | 22 | - | - | 35.95 |
| 4 | 16 | 16.07 | 11.45 | - | - | 27.9 |
| 5 | - | - | - | - | - | 11.4 |
| 6 | 13.8 | 37.5 | 9 | - | - | 32.05 |
| 7 | 14.75 | 80.21 | 7.9 | 29.85 | 35.06 | 57.55 |

SRA dezvoltate prezinta în raport cu perturbajia urmatoarele performanțe:

- pentru cazul RG-F-PI-IE cu baza de reguli modificata: raspuns indicial de tip a, $t_M^* = 5.63$ sec, $\sigma_1^* = 46.83$ %, $t_r^* = 22.15$ sec;
- pentru cazul RG-F-PI-II cu baza de reguli modificata: raspuns indicial de tip a, $t_M^* = 5$ sec, $\sigma_1^* = 44.1$ %, $t_r^* = 30.4$ sec.

Analiza comparativa a performanțelor realizate de SRA prevazut cu RG-F-PI corectate evidențiază faptul ca:

- RG-F-PI cu baza de reguli modificata asigura, în ansamblu, comportament mai bun al SRA atât în comparație cu comportamentul asigurat de "cel mai bun" RG convențional cât și în comparație cu cel asigurat de RG-F-PI standard;
- îmbunătățirea performanțelor este mai accentuata în situația RG-F-PI-IE cu baza de reguli modificata.

Dupa cunoștințele autorului, cele doua variante de RG-F-PI cu baza de reguli modificata sunt originale; RG-F-PI-IE cu baza de reguli modificata a fost prezentat prin lucrarea (Precup și Preitl, 1994b).

3.4. Regulatorul fuzzy de tip cvasi-PI cu baza de reguli modificata și distribuție modificata a funcțiilor de apartenență aferente termenilor lingvistici ai comenzii

Acest tip de RG-F-PI dezvoltat de autor nemijlocit pentru conducerea SFN este aplicabil atât pentru varianta cu integrare pe ieșirea regulatorului cât și pentru varianta cu integrare pe intrarea regulatorului și are la baza urmatoarele principii:

- modificarea bazei de reguli în doua maniere:

- pentru cazul RG-F-PI-IE: micșorarea modului incrementului comenzii în cazurile în care eroarea de reglare și incrementul erorii de reglare sunt de același semn,
- pentru cazul RG-F-PI-II: micșorarea modului comenzii în cazurile în care eroarea de reglare și integrala erorii de reglare sunt de același semn;

b) modificarea distribuției funcțiilor de apartenență aferente:

- pentru cazul RG-F-PI-IE: termenilor lingvistici ai incrementului comenzii,
- pentru cazul RG-F-PI-II: termenilor lingvistici ai comenzii.

Întrucât principiile sunt comune, structura modificată de RG-F-PI împreună cu modificările aferente vor fi prezentate numai pentru cazul RG-F-PI-IE. Distribuția neuniformă a funcțiilor de apartenență aferente comenzii Δu_k este prezentată în fig.3.4.1, iar tabelul de decizie modificat este prezentat în tabelul 3.4.1.

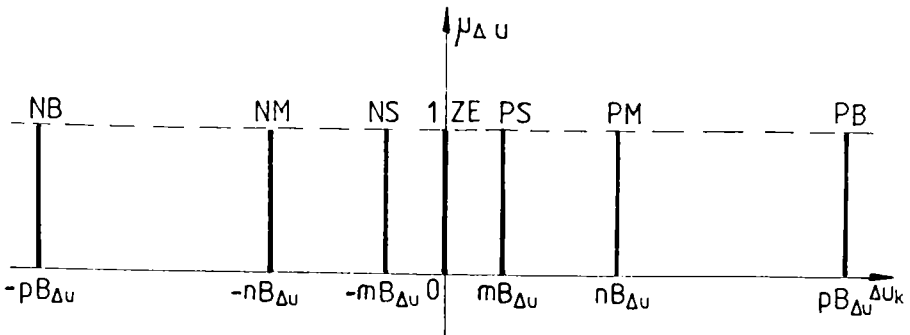


Fig.3.4.1. Alura funcțiilor de apartenență pentru comanda Δu_k aferente RG-F-PI-IE cu baza de reguli modificată și distribuție modificată a funcțiilor de apartenență aferente termenilor lingvistici ai comenzii.

În vederea îmbunătățirii performanțelor de regim dinamic ale SRA destinate conducerii sistemelor cu faza neminimă (inclusiv a SFN2-IZP), prin cele două modificări ilustrate se urmăresc:

- pentru cazul RG-F-PI-IE: scăderea (și) mai accentuată a valorii modului incrementului comenzii pe măsura ce cresc valorile modulelor erorii de reglare și incrementului erorii de reglare,
- pentru cazul RG-F-PI-II: scăderea valorii modului comenzii pe măsura ce cresc valorile modulelor erorii de reglare și integralei erorii de reglare.

Cele două variante de RG-F-PI propuse diferă de cele standard în principal prin tabelul de decizie și prin definirea suplimentară a parametrilor specifici m , n , p (m^* , n^* , p^*) (fig.3.4.1). Prin urmare, parametrii specifici celor două variante de reglare propuse (toți cu valoare strict pozitivă) sunt:

Tabelul 3.4.1. Tabelul de decizie aferent RG-F-PI-IE cu baza de reguli modificata și distribuție modificata a funcțiilor de apartenență aferente termenilor lingvistici ai comenzii.

| | | | | | |
|-----------------------|----|----|----|----|----|
| e_k Δe_k | NB | NS | ZE | PS | PB |
| PB | ZE | PB | PB | PM | PS |
| PS | NB | ZE | PB | PB | PM |
| ZE | NB | NB | ZE | PB | PB |
| NS | NM | NB | NB | ZE | PB |
| NB | NS | NM | NB | NB | ZE |

a) pentru cazul RG-F-PI-IE: $\{B_e, B_{\Delta e}, B_{\Delta u}, m, n, p\}$;

b) pentru cazul RG-F-PI-II: $\{B_e, B_{e_i}, B_u, m^*, n^*, p^*\}$.

În continuare, regulatoarele modificate se dezvoltă ca în paragrafele 3.2 și 3.3, cu observația ca în acest caz numărul parametrilor liberi ce trebuie selectați este patru.

Pentru studiul de caz considerat se dovedește avantajoasa următoarea alegere a parametrilor:

$$B_e = 0.5, m = 0.25, n = 0.5, p = 1; \quad (3.4.1)$$

$$B_e = 0.5, m^* = 0.8, n^* = 0.9, p^* = 1. \quad (3.4.2)$$

În continuare, ceilalți parametri se obțin ca în paragraful 3.3:

$$B_{\Delta e} = 0.0037, B_{\Delta u} = 0.0055; \quad (3.4.3)$$

$$B_{e_i} = 67.75, B_u = 0.7473. \quad (3.4.4)$$

Perioada de eșantionare T_e a fost aleasă de 0.05 sec.

Comportarea celor două SRA cu RG-F-PI dezvoltate în acest paragraf în raport cu referința este caracterizată prin indicatorii de calitate sintetizați în tabelele 3.4.2 și 3.4.3.

Tabelul 3.4.2. Performanțele SRA cu RG-F-PI-IE cu baza de reguli modificata și distribuție modificata a funcțiilor de apartenență aferente termenilor lingvistici ai comenzii definite în răspunsul indicial în raport cu w .

| Nr. crt. | Parametri PC | Tip de răspuns | Indicatori de calitate | | |
|----------|--|----------------|------------------------|-------------------|-------------|
| | | | $t_{.1}$ [sec] | $\sigma_{.1}$ [%] | t_0 [sec] |
| 1 | $\alpha_y = K_{qh} = \alpha_w = 1$ | C | 2.85 | 7.44 | 4.45 |
| 2 | $\alpha_y = 1.25$ $K_{qh} = \alpha_w = 1$ | C | 2.9 | 8.1 | 4.45 |
| 3 | $\alpha_y = 0.75$ $K_{qh} = \alpha_w = 1$ | C | 2.85 | 6.86 | 4.4 |

| | | | | | |
|---|--|---|------|------|------|
| 4 | $K_{qh}^* = 1.25$ $\alpha_y = \alpha_w = 1$ | C | 3.55 | 8.58 | 5.7 |
| 5 | $K_{qh}^* = 0.75$ $\alpha_y = \alpha_w = 1$ | C | 2.2 | 6.47 | 3.25 |
| 6 | $\alpha_w = 0.5$ $\alpha_y = K_{qh}^* = 1$ | A | 3 | 7.7 | 4.35 |
| 7 | $\alpha_w = 0$ $\alpha_y = K_{qh}^* = 1$ | B | 3.15 | 8.02 | 4.45 |

Tabelul 3.4.2. Continuare.

| Nr. crt. | Indicatori de calitate | | | | | |
|----------|------------------------|----------------|-------------|-------------|----------------|-------------|
| | t_m [sec] | σ_1 [%] | t_1 [sec] | t_m [sec] | σ_2 [%] | t_r [sec] |
| 1 | - | - | - | - | - | 23.25 |
| 2 | - | - | - | - | - | 23.1 |
| 3 | - | - | - | - | - | 26.5 |
| 4 | - | - | - | - | - | 24.2 |
| 5 | - | - | - | - | - | 23.7 |
| 6 | 22.85 | 3.06 | - | - | - | 25.05 |
| 7 | 22.75 | 41.64 | 15.05 | 36.3 | 16.19 | 53.4 |

Tabelul 3.4.3. Performanțele SRA cu RG-F-PI-II cu baza de reguli modificată și distribuție modificată a funcțiilor de apartenență aferente termenilor lingvistici ai comenzii definite în răspunsul indicial în raport cu w.

| Nr. crt. | Parametri PC | Tip de răspuns | Indicatori de calitate | | |
|----------|--|----------------|------------------------|----------------|-------------|
| | | | t_1 [sec] | σ_1 [%] | t_0 [sec] |
| 1 | $\alpha_y = K_{qh}^* =$ $= \alpha_w = 1$ | C | 1.1 | 8.29 | 2.6 |
| 2 | $\alpha_y = 1.25$ $K_{qh}^* = \alpha_w = 1$ | A | 1.1 | 11.62 | 2.6 |
| 3 | $\alpha_y = 0.75$ $K_{qh}^* = \alpha_w = 1$ | C | 1.1 | 9.87 | 2.8 |
| 4 | $K_{qh}^* = 1.25$ $\alpha_y = \alpha_w = 1$ | C | 1.35 | 14.25 | 3 |

| | | | | | |
|---|--|---|------|-------|------|
| 5 | $K_{qh}^* = 0.75$ $\alpha_y = \alpha_w = 1$ | C | 0.85 | 10.2 | 2.15 |
| 6 | $\alpha_w = 0.5$ $\alpha_y = K_{qh}^* = 1$ | A | 1.15 | 11.05 | 2.95 |
| 7 | $\alpha_w = 0$ $\alpha_y = K_{qh}^* = 1$ | B | 1.25 | 13.92 | 3.1 |

Tablul 3.4.3. Continuare.

| Nr. crt. | Indicatori de calitate | | | | | |
|----------|------------------------|----------------|-------------|-------------|----------------|-------------|
| | t_m [sec] | σ_1 [%] | t_1 [sec] | t_m [sec] | σ_2 [%] | t_r [sec] |
| 1 | - | - | - | - | - | 21.05 |
| 2 | 21.5 | 12.61 | 14.3 | - | - | 43 |
| 3 | - | - | - | - | - | 38.6 |
| 4 | - | - | - | - | - | 23 |
| 5 | - | - | - | - | - | 16.1 |
| 6 | 21.7 | 33.06 | 12.4 | - | - | 42.1 |
| 7 | 18.1 | 78.91 | 10.1 | 35.05 | 37.21 | 54.85 |

Comportarea în raport cu perturbajă realizată de cele două SRA cu RG-F-PI dezvoltate se caracterizează după cum urmează:

a) pentru cazul RG-F-PI-IE cu baza de reguli modificată și distribuție modificată a funcțiilor de apartenență aferente termenilor lingvistici ai comenzii: răspuns indicial de tip a, $t_m^y = 7.05$ sec, $\sigma_1^y = 52.51$ %, $t_r^y = 29.75$ sec;

b) pentru cazul RG-F-PI-II cu baza de reguli modificată și distribuție modificată a funcțiilor de apartenență aferente termenilor lingvistici ai comenzii: răspuns indicial de tip a, $t_m^y = 4.95$ sec, $\sigma_1^y = 44.45$ %, $t_r^y = 31.95$ sec.

Analiza comparativă a performanțelor evidențiază faptul că cele două SRA cu RG-F-PI cu baza de reguli modificată și distribuție modificată a funcțiilor de apartenență aferente termenilor lingvistici ai comenzii asigură:

- în comparație cu RG convenționale și cu RG-F-PI standard, o comportare a SRA în ansamblu mai bună;
- în comparație cu RG-F-PI cu baza de reguli modificată, o comportare mai bună în raport cu

modificarea referinței și mai puțin buna în raport cu modificarea perturbației și cu modificările parametrilor PC.

Dupa cunoștințele autorului, ambele variante de RG-F-PI cu baza de reguli modificata și distribuție modificata a funcțiilor de apartenență aferente termenilor lingvistici ai comenzii sunt originale. Varianta de RG-F-PI-IE cu baza de reguli modificata și distribuție modificata a funcțiilor de apartenență aferente termenilor lingvistici ai comenzii a fost prezentata în cel de-al doilea referat de doctorat (Precup, 1995a); varianta de RG-F-PI-II cu baza de reguli modificata și distribuție modificata a funcțiilor de apartenență aferente termenilor lingvistici ai comenzii apare pentru prima data în cadrul tezei.

3.5. Regulatorul fuzzy de tip cvasi-PI cu structura variabila

Urmărind scopul propus de îmbunătățire a comportamentului SRA destinate conducerii SFN, ideea care sta la baza dezvoltării acestui tip de RG-F consta în utilizarea a doua RG-F-PI într-o conexiune paralelă dar cu acțiune alternativă asupra procesului, după cum urmează:

- primul RG-F, notat cu indice superior (1), este dedicat pentru situațiile cu valori mici ale modulului erorii de reglare (în vederea reducerii supra-reglajului) și pentru situațiile cu valori mari ale modulului erorii de reglare (în vederea reducerii sub-reglajului) și a fost dedus dintr-un RG-PI convențional cu coeficient de transfer $k_R^{(1)}$ redus;
- cel de-al doilea RG-F, notat cu indice superior (2), este dedicat pentru situațiile cu valori medii ale modulului erorii de reglare (în vederea reducerii timpului de reglare) și a fost dedus dintr-un RG-PI convențional cu coeficient de transfer $k_R^{(2)}$ mare.

Ambele RG-F-PI menționate anterior sunt în varianta standard (a se vedea paragraful 3.2), iar comanda u_k este elaborata conform următoarelor relații:

a) pentru cazul RG-F-PI-IE:

$$u_k = u_{k-1} + \beta_k, \quad (3.5.1)$$

în care:

$$\beta_k = \begin{cases} \Delta u_k^{(1)} & , \text{ pentru } |e_k| \in [0, 1/4) \cup [1, \infty), \\ \Delta u_k^{(2)} & , \text{ pentru } |e_k| \in [1/3, 2/3), \\ \Delta u_k^{(1)} + C_1 (e_k - 1/4) & , \text{ pentru } |e_k| \in [1/4, 1/3), \\ \Delta u_k^{(1)} + C_2 (1 - e_k) & , \text{ pentru } |e_k| \in [2/3, 1); \end{cases} \quad (3.5.2)$$

b) pentru cazul RG-F-PI-II:

$$u_k = \beta_k^*, \quad (3.5.3)$$

în care:

$$\beta_k^* = \begin{cases} u_k^{(1)} & , \text{ pentru } |e_k| \in [0, 1/4) \cup [1, \infty), \\ u_k^{(2)} & , \text{ pentru } |e_k| \in [1/3, 2/3), \\ u_k^{(1)} + C_1^*(e_k - 1/4), & \text{ pentru } |e_k| \in [1/4, 1/3), \\ u_k^{(1)} + C_2^*(1 - e_k) & , \text{ pentru } |e_k| \in [2/3, 1). \end{cases} \quad (3.5.4)$$

Parametrii C_1 , C_2 , C_1^* și C_2^* sunt strict pozitivi și se aleg conform experienței proiectantului de SRA.

Cealalți parametri specifici regulatorului fuzzy sunt:

- a) pentru cazul RG-F-PI-IE: $\{B_e^{(1)}, B_e^{(2)}, B_{\Delta e}^{(1)}, B_{\Delta e}^{(2)}, B_{\Delta u}^{(1)}, B_{\Delta u}^{(2)}\}$;
 b) pentru cazul RG-F-PI-II: $\{B_e^{(1)}, B_e^{(2)}, B_{e1}^{(1)}, B_{e1}^{(2)}, B_u^{(1)}, B_u^{(2)}\}$.

Relațiile (3.5.2) și (3.5.4) pot asigura o trecere fara șocuri a comenzii de pe un RG-F-PI pe celalalt și în seama de caracterul de sistem cu faza neminima (și, în particular, de SFN2-IZP) al procesului condus; cele doua relații sunt valabile pentru un semnal de tip treapta unitate aplicat pe intrarea de referința a SRA.

Kung și Chen (Kung și Chen, 1992) au folosit o strategie asemanatoare, dar într-o varianta modificata pentru cazul unui RG-F compus dintr-un RG-F-PI și un RG-F-PD cu rezultate de simulare referitoare la conducerea unui proces de tip PT2. După cunoștințele autorului, variantele de RG-F-PI-IE cu structura variabila (prezentata în (Precup, 1995a)) și RG-F-PI-II cu structura variabila (prezentata pentru prima data în cadrul tezei) sunt originale.

RG-F-PI cu structura variabila se dezvolta conform celor prezentate în paragraful 3.2. Pentru studiul de caz luat în considerare o alegere favorabila a parametrilor liberi este:

- a) pentru varianta de RG-F-PI-IE cu structura variabila:

$$k_R^{(1)} = 0.3, k_R^{(2)} = 1.5, T_1^{(1)} = T_1^{(2)} = 6.8 \text{ sec}, \quad (3.5.5)$$

$$B_e^{(1)} = B_e^{(2)} = 0.5, C_1 = 0.004, C_2 = 0.005; \quad (3.5.6)$$

- b) pentru varianta de RG-F-PI-II cu structura variabila:

$$k_R^{(1)} = 0.8, k_R^{(2)} = 1.2, T_1^{(1)} = T_1^{(2)} = 6.8 \text{ sec}, \quad (3.5.7)$$

$$B_e^{(1)} = B_e^{(2)} = 0.5, C_1^* = 0.09, C_2^* = 0.11. \quad (3.5.8)$$

În continuare, se obține succesiv:

- a) pentru varianta de RG-F-PI-IE cu structura variabila:

$$K_p^{(1)} = 0.2989, K_1^{(1)} = 0.0022, \alpha^{(1)} = 0.0074, \quad (3.5.9)$$

$$K_p^{(2)} = 1.4945, K_1^{(2)} = 0.01, \alpha^{(2)} = 0.0074, \quad (3.5.10)$$

$$B_{\Delta e}^{(1)} = 0.0037, B_{\Delta u}^{(1)} = 0.0015, \quad (3.5.11)$$

$$B_{\Delta e}^{(2)} = 0.0037, B_{\Delta u}^{(2)} = 0.0055; \quad (3.5.12)$$

- b) pentru varianta de RG-F-PI-II cu structura variabila:

$$K_p^{\gamma(1)} = 0.0059, K_1^{\gamma(1)} = 0.7971, \alpha^{\gamma(1)} = 135.5, \quad (3.5.13)$$

$$K_p^{\gamma(2)} = 0.0096, K_1^{\gamma(2)} = 1.2952, \alpha^{\gamma(2)} = 135.5, \quad (3.5.14)$$

$$B_{e1}^{(1)} = 67.75, B_u^{(1)} = 0.3985, \quad (3.5.15)$$

$$B_{ef}^{(2)} = 67.75, B_0^{(2)} = 0.6476. \quad (3.5.16)$$

Performanțele în raport cu referința realizate de SRA cu RG-F-PI dezvoltate sunt ilustrate în tabelele 3.5.1 și 3.5.2 corespunzătoare RG-F-PI-IE cu structura variabila, respectiv RG-F-PI-II cu structura variabila.

Tabelul 3.5.1. Performanțele SRA cu RG-F-PI-IE cu structura variabila definite în răspunsul indicial în raport cu w.

| Nr. crt. | Parametri PC | Tip de răspuns | Indicatori de calitate | | |
|----------|---|----------------|------------------------|-------------------|-------------|
| | | | $t_{.1}$ [sec] | $\sigma_{.1}$ [%] | t_0 [sec] |
| 1 | $\alpha_y = K_{qh}^* = \alpha_\omega = 1$ | B | 2.8 | 7.4 | 4.3 |
| 2 | $\alpha_y = 1.25$ $K_{qh}^* = \alpha_\omega = 1$ | B | 2.8 | 8.02 | 4.3 |
| 3 | $\alpha_y = 0.75$ $K_{qh}^* = \alpha_\omega = 1$ | C | 2.8 | 6.83 | 4.35 |
| 4 | $K_{qh}^* = 1.25$ $\alpha_y = \alpha_\omega = 1$ | A | 3.45 | 8.61 | 4.7 |
| 5 | $K_{qh}^* = 0.75$ $\alpha_y = \alpha_\omega = 1$ | C | 2.15 | 6.44 | 3.2 |
| 6 | $\alpha_\omega = 0.5$ $\alpha_y = K_{qh}^* = 1$ | B | 2.95 | 7.69 | 4.45 |
| 7 | $\alpha_\omega = 0$ $\alpha_y = K_{qh}^* = 1$ | B | 3 | 7.1 | 4.8 |

Tabelul 3.5.1. Continuare.

| Nr. crt. | Indicatori de calitate | | | | | |
|----------|------------------------|----------------|-------------|-------------|----------------|-------------|
| | t_w [sec] | σ_1 [%] | t_1 [sec] | t_m [sec] | σ_2 [%] | t_r [sec] |
| 1 | 26.55 | 3.77 | 17.8 | - | - | 33.5 |
| 2 | 20 | 7.99 | 12 | 33.8 | 3.25 | 35.6 |
| 3 | - | - | - | - | - | 33.95 |
| 4 | 24.15 | 7.32 | 15.25 | - | - | 28.25 |
| 5 | - | - | - | - | - | 23.7 |
| 6 | 18.6 | 25.13 | 13.55 | 36.1 | 13.53 | 40.2 |

| | | | | | | |
|---|------|-------|------|----|-------|------|
| 7 | 23.5 | 32.14 | 16.3 | 41 | 14.37 | 58.8 |
|---|------|-------|------|----|-------|------|

Tablul 3.5.2. Performanțele SRA cu RG-F-PI-II cu structura variabila definite în răspunsul indicial în raport cu w .

| Nr. crt. | Parametri PC | Tip de răspuns | Indicatori de calitate | | |
|----------|--|----------------|------------------------|----------------|-------------|
| | | | t_1 [sec] | σ_1 [%] | t_0 [sec] |
| 1 | $\alpha_y = K_{qh} = 1$ $\alpha_w = 1$ | C | 1.25 | 11.18 | 2.85 |
| 2 | $\alpha_y = 1.25$ $K_{qh} = \alpha_w = 1$ | C | 1.25 | 15.25 | 2.8 |
| 3 | $\alpha_y = 0.75$ $K_{qh} = \alpha_w = 1$ | C | 1.2 | 7.35 | 2.85 |
| 4 | $K_{qh} = 1.25$ $\alpha_y = \alpha_w = 1$ | A | 1.55 | 15.14 | 3.1 |
| 5 | $K_{qh} = 0.75$ $\alpha_y = \alpha_w = 1$ | C | 0.95 | 7.42 | 2.2 |
| 6 | $\alpha_w = 0.5$ $\alpha_y = K_{qh} = 1$ | A | 1.3 | 12.14 | 2.9 |
| 7 | $\alpha_w = 0$ $\alpha_y = K_{qh} = 1$ | B | 1.45 | 11.31 | 3.1 |

Tablul 3.5.2. Continuare.

| Nr. crt. | Indicatori de calitate | | | | | |
|----------|------------------------|----------------|-------------|-------------|----------------|-------------|
| | t_n [sec] | σ_1 [%] | t_1 [sec] | t_n [sec] | σ_2 [%] | t_r [sec] |
| 1 | - | - | - | - | - | 26.1 |
| 2 | - | - | - | - | - | 18.13 |
| 3 | - | - | - | - | - | 37.5 |
| 4 | 21.85 | 2.03 | 18.45 | - | - | 25.4 |
| 5 | - | - | - | - | - | 28.85 |
| 6 | 15.25 | 19.87 | 11 | - | - | 39.35 |
| 7 | 16.6 | 43.12 | 8.7 | 34.25 | 16.37 | 48.95 |

În raport cu perturbajia se poate efectua următoarea sinteza a comportamentului celor două SRA:

a) pentru varianta de RG-F-PI-IE cu structura variabila rezulta un raspuns indicial de tip a și indicatorii de calitate: $t_M^v = 5.85 \text{ sec}$, $\sigma_1^v = 47.04 \%$, $t_r^v = 26.8 \text{ sec}$;

b) pentru varianta de RG-F-PI-II cu structura variabila rezulta un raspuns indicial de tip a și indicatorii de calitate: $t_M^v = 6.8 \text{ sec}$, $\sigma_1^v = 50 \%$, $t_r^v = 33 \text{ sec}$.

Studiul comparativ privind performanțele realizate de cele două SRA în comparație cu structurile anterior analizate evidențiază faptul că RG-F-PI cu structura variabila asigură performanțe aproximativ la același nivel cu situația RG-F-PI cu baza de reguli modificată și distribuție modificată a funcțiilor de apartenență aferente termenilor lingvistici ai comenzii.

3.6. Regulatorul fuzzy de tip cvasi-PI cu integrare pe ieșire cu viteza de integrare variabila

O altă soluție de îmbunătățire a performanțelor SRA cu RG-F-PI-IE destinate conducerii sistemelor cu faza neminimă abordată de autor are la bază modificarea relației (3.2.9) de generare a comenzii (prin integrare numerică) pentru cazul RG-F-PI-IE la următoarea formă conform (Lee, 1993a):

$$u_k = (1 - r_k) u_{k-1} + \Delta u_k. \quad (3.6.1)$$

Parametrul r_k - cu valori în intervalul $[-1; 1]$ - este numit factor rezidual (de exemplu, (Lee, 1993a), (Precup și Preitl, 1994b)); valoarea $r_k = 0$ corespunde RG-F-PI-IE standard. Valoarea factorului rezidual poate fi obținută în două moduri distincte, evidențiate prin cele două structuri de RG-F prezentate în fig.3.6.1 și 3.6.2:

- în funcție de valoarea actuală a erorii de reglare e_k și de valoarea actuală a incrementului erorii de reglare Δe_k , fig.3.6.1;
- în funcție de valoarea actuală a erorii de reglare e_k și de valoarea anterioară a comenzii u_{k-1} , fig.3.6.2.

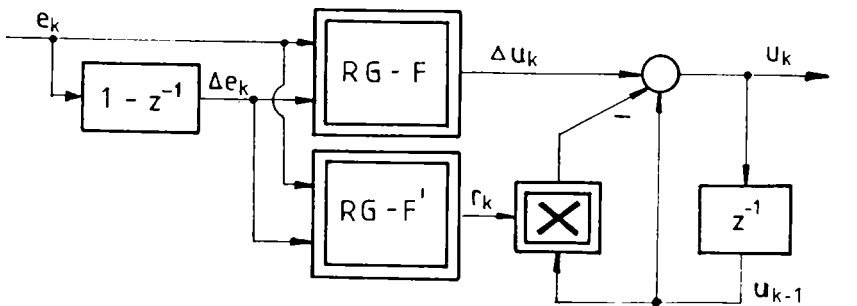


Fig.3.6.1. Schema bloc informațională aferentă RG-F-PI-IE cu viteza de integrare variabilă în funcție de valoarea actuală a erorii de reglare și de valoarea actuală a incrementului erorii de reglare.

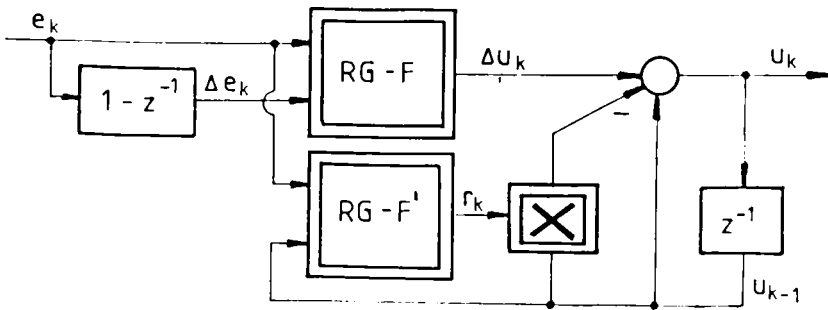


Fig.3.6.2. Schema bloc informațională aferentă RG-F-PI-IE cu viteza de integrare variabilă în funcție de valoarea actuală a erorii de reglare și de valoarea anterioară a comenzii.

Din cele până aici prezentate se observă că această modificare a structurii este specifică numai RG-F-PI-IE. Teoretic aceeași modificare de structură s-ar putea aplica și la RG-F-PI-II, principial diferind doar locul unde se efectuează integrarea (pe ieșirea, respectiv intrarea RG-F). Totuși, soluția nu se va aplica și la această variantă de regulator deoarece ecuația (3.6.1) corespunde de fapt unui element de transfer de tip integrator propriu-zis doar pentru $r_k = 0$, lucru posibil doar pentru cazul RG-F-PI-IE. Din acest motiv și titlul paragrafului s-a referit explicit la cazul RG-F-PI-IE.

În literatură se cunosc variante și mai complicate ale RG-F-PI-IE cu viteza de integrare variabilă în funcție de $\{e_k, \Delta e_k\}$ (Lee, 1993a) și RG-F-PI-II cu viteza de integrare variabilă în funcție de $\{e_k, u_{k-1}\}$ (Lee, 1993b), aplicate unor procese cu fază minimă, în particular de tip PT2. Originalitatea variantelor de RG-F-PI-IE propuse constă în simplitatea proiectării și în baza de reguli modificată specifică sistemelor cu fază neminimă (și, în cadrul acestora, SFN2-IZP). Varianta de RG-F-PI-IE cu viteza de integrare variabilă în funcție de $\{e_k, \Delta e_k\}$ a fost publicată în (Precup și Preitl, 1994b), iar varianta de RG-F-PI-IE cu viteza de integrare variabilă în funcție de $\{e_k, u_{k-1}\}$ apare pentru prima dată în cadrul acestei teze.

Dezvoltarea celor două regulatoare fuzzy - RG-F și RG-F' - care intervin în structurile din fig.3.6.1 și 3.6.2 se desfășoară conform celor prezentate în paragraful 3.2 întrucât atât RG-F (cu parametrii $\{B_e, B_{\Delta e}, B_{u_{k-1}}\}$) cât și RG-F' (cu parametrii $\{B_e', B_{\Delta e}', B_r\}$) pentru structura din fig.3.6.1 și respectiv $\{B_e', B_{u_{k-1}}', B_r\}$ pentru structura din fig.3.6.2) sunt RG-F-PI-IE cu baza de reguli modificată. Pentru ambele variante de RG-F-PI-IE propuse parametrii care trebuie aleși de proiectant sunt B_e și B_e' .

Pentru studiul de caz referitor la reglarea turației unui HG al centralei hidroelectrice PdF 1 rezultă succesiv:

a) pentru varianta de RG-F-PI-IE cu viteza de integrare variabilă în funcție de valoarea actuală a erorii de reglare și de valoarea actuală a incrementului erorii de reglare:

- impunând pe baza unei proiectări în domeniul pulsație:

- pentru RG-F:

$$k_R = 1.5, T_i = 6.8 \text{ sec}, \quad (3.6.2)$$

- pentru RG-F':

$$k_R' = 0.5, T_i' = 6.8 \text{ sec}, \quad (3.6.3)$$

prin discretizare cu o perioadă de eșantionare $T_e = 0.05 \text{ sec}$ și aplicare a relațiilor (3.2.2) (3.2.4) se obține:

- pentru RG-F:

$$K_p = 1.4945, K_i = 0.011, \alpha = 0.0074, \quad (3.6.4)$$

- pentru RG-F':

$$K_p' = 0.4982, K_i' = 0.0037, \alpha' = 0.0074, \quad (3.6.5)$$

- selectând:

$$B_e = 0.5, B_e' = 0.3 \quad (3.6.6)$$

și aplicând relația (3.2.8) se obține:

- pentru RG-F:

$$B_{\Delta e} = 0.0037, B_{\Delta u} = 0.0055, \quad (3.6.7)$$

- pentru RG-F':

$$B_{\Delta e}' = 0.0022, B_r = 0.0011; \quad (3.6.8)$$

b) pentru varianta de RG-F-PI-IE cu viteza de integrare variabila în funcție de valoarea actuală a erorii de reglare și de valoarea anterioară a comenzii:

- impunând:

- pentru RG-F:

$$k_R = 1.75, T_i = 6.8 \text{ sec}, \quad (3.6.9)$$

- pentru RG-F':

$$k_R' = 0.1, T_i' = 6.8 \text{ sec}, \quad (3.6.10)$$

pentru $T_e = 0.05 \text{ sec}$ pe baza relațiilor (3.2.2) ... (3.2.4) se obține:

- pentru RG-F:

$$K_p = 1.7437, K_i = 0.013, \alpha = 0.0074, \quad (3.6.11)$$

- pentru RG-F':

$$K_p' = 0.0996, K_i' = 0.0007, \alpha' = 0.0074, \quad (3.6.12)$$

- selectând parametrii B_e și B_e' conform relației (3.6.6), se obține apoi:

- pentru RG-F:

$$B_{\Delta e} = 0.0037, B_{\Delta u} = 0.0065, \quad (3.6.13)$$

- pentru RG-F':

$$B_e' = 0.0022, B_r = 0.0002. \quad (3.6.14)$$

Observație: Din considerente de îmbunătățire a performanțelor SRA experiența a aratat ca sunt utile

valori diferite ale parametrilor B_e și B_e' și valori diferite ale parametrilor k_R și k_R' .

Performanțele celor două SRA cu RG-F-PI-IE dezvoltate în acest paragraf în raport cu variația treapta a referinței sunt redată sintetic de tabelele 3.6.1 și 3.6.2.

Tabelul 3.6.1. Performanțele SRA cu RG-F-PI-IE cu viteza de integrare variabilă în funcție de $\{e_k, \Delta e_k\}$ definite în răspunsul indicial în raport cu w .

| Nr. crt. | Parametri PC | Tip de răspuns | Indicatori de calitate | | |
|----------|--|----------------|------------------------|-------------------|-------------|
| | | | t_{11} [sec] | σ_{11} [%] | t_o [sec] |
| 1 | $\alpha_y = K_{qh}^* = \alpha_w = 1$ | C | 2.75 | 6.36 | 4.2 |
| 2 | $\alpha_y = 1.25$ $K_{qh}^* = \alpha_w = 1$ | C | 2.8 | 7.31 | 4.2 |
| 3 | $\alpha_y = 0.75$ $K_{qh}^* = \alpha_w = 1$ | C | 2.75 | 7.36 | 4.2 |
| 4 | $K_{qh}^* = 1.25$ $\alpha_y = \alpha_w = 1$ | C | 3.4 | 8.38 | 4.75 |
| 5 | $K_{qh}^* = 0.75$ $\alpha_y = \alpha_w = 1$ | C | 2.1 | 4.68 | 3.1 |
| 6 | $\alpha_w = 0.5$ $\alpha_y = K_{qh}^* = 1$ | B | 2.9 | 6.8 | 4.35 |
| 7 | $\alpha_w = 0$ $\alpha_y = K_{qh}^* = 1$ | B | 3.05 | 7.34 | 4.5 |

Tabelul 3.6.1. Continuare.

| Nr. crt. | Indicatori de calitate | | | | | |
|----------|------------------------|----------------|-------------|-------------|----------------|-------------|
| | t_m [sec] | σ_1 [%] | t_1 [sec] | t_m [sec] | σ_2 [%] | t_r [sec] |
| 1 | - | - | - | - | - | 29.05 |
| 2 | - | - | - | - | - | 30.75 |
| 3 | - | - | - | - | - | 34.4 |
| 4 | - | - | - | - | - | 27.2 |
| 5 | - | - | - | - | - | 27.3 |
| 6 | 20.3 | 10.13 | 16.15 | 30.6 | 2.38 | 32.15 |

| | | | | | | |
|---|-------|-------|------|------|-------|------|
| 7 | 17.55 | 37.73 | 12.4 | 27.8 | 16.47 | 54.8 |
|---|-------|-------|------|------|-------|------|

Tabelul 3.6.2. Performanțele SRA cu RG-F-PI-IE cu viteză de integrare variabilă în funcție de $\{e_k, u_{k-1}\}$ definite în răspunsul indicial în raport cu w .

| Nr. crt. | Parametri PC | Tip de răspuns | Indicatori de calitate | | |
|----------|--|----------------|------------------------|-------------------|-------------|
| | | | $t_{.1}$ [sec] | $\sigma_{.1}$ [%] | t_0 [sec] |
| 1 | $\alpha_y = K_{qh}^* = \alpha_w = 1$ | C | 2.68 | 10.22 | 4.4 |
| 2 | $\alpha_y = 1.25$ $K_{qh}^* = \alpha_w = 1$ | C | 2.75 | 11.32 | 4.3 |
| 3 | $\alpha_y = 0.75$ $K_{qh}^* = \alpha_w = 1$ | C | 2.7 | 9.05 | 4.2 |
| 4 | $K_{qh}^* = 1.25$ $\alpha_y = \alpha_w = 1$ | C | 3.4 | 12.55 | 4.6 |
| 5 | $K_{qh}^* = 0.75$ $\alpha_y = \alpha_w = 1$ | C | 2 | 8.19 | 3.1 |
| 6 | $\alpha_w = 0.5$ $\alpha_y = K_{qh}^* = 1$ | B | 2.85 | 10.75 | 4.4 |
| 7 | $\alpha_w = 0$ $\alpha_y = K_{qh}^* = 1$ | B | 3.05 | 11.4 | 4.5 |

Tabelul 3.6.2. Continuare.

| Nr. crt. | Indicatori de calitate | | | | | |
|----------|------------------------|----------------|-------------|-------------|----------------|-------------|
| | t_w [sec] | σ_1 [%] | t_1 [sec] | t_m [sec] | σ_2 [%] | t_r [sec] |
| 1 | - | - | - | - | - | 28.45 |
| 2 | - | - | - | - | - | 21.5 |
| 3 | - | - | - | - | - | 33.25 |
| 4 | - | - | - | - | - | 41.2 |
| 5 | - | - | - | - | - | 28 |
| 6 | 29 | 2.75 | 25.65 | 36.35 | 2.61 | 37.85 |
| 7 | 15.9 | 43.52 | 11.4 | 25.23 | 22.47 | 54.75 |

Indicatorii de calitate definiți în răspunsul indicial în raport cu perturbația aferent celor două SRA sunt următorii:

a) pentru varianta de RG-F-PI-IE cu viteza de integrare variabilă în funcție de $\{e_k, \Delta e_k\}$: răspuns de tip a, $t_M^* = 5.25$ sec, $\sigma_1^* = 43.72$ %, $t_r^* = 25.3$ sec;

b) pentru varianta de RG-F-PI-IE cu viteza de integrare variabilă în funcție de $\{e_k, u_{k-1}\}$: răspuns de tip a, $t_M^* = 4.55$ sec, $\sigma_1^* = 45.38$ %, $t_r^* = 27$ sec.

Din analiza comparativă a performanțelor realizate de cele două SRA în comparație cu performanțele SRA anterior prezentate se constată că RG-F-PI-IE cu viteza de integrare variabilă asigură:

- în comparație cu performanțele SRA cu RG-F-PI standard, performanțe în ansamblu mai bune;
- performanțe în raport cu modificările referinței și parametrilor PC la nivelul celor asigurate de RG-F-PI cu structura variabilă;
- în comparație cu SRA cu RG-F-PI cu structura variabilă, performanțe mai bune în raport cu modificarea perturbației.

3.7. Concluzii

Pe baza studiilor efectuate, a rezultatelor de simulare numerică a comportării SRA ce includ variantele de RG-F-PI dezvoltate în cadrul acestui capitol, se pot trage următoarele concluzii:

1) Variantele prezentate de RG-F-PI sunt destinate conducerii sistemelor cu fază neminimă și studiul de caz abordat se referă la conducerea SFN2-IZP.

2) Prin extensia cu componenta I a RG-F de bază, toate variantele de RG-F-PI aici prezentate conduc la SRA astatice; de fapt, ele au fost deduse pe baza RG-PI convențional și sunt din acest punct de vedere echivalente cu acesta.

3) Performanțele realizate de SRA ce includ RG-F dezvoltate în cadrul acestui capitol pot fi analizate comparativ între ele și cu performanțele SRA cu RG convenționale. În acest scop, în fig.3.7.1 sunt prezentați sintetic principalii indicatori de calitate empirici în domeniul timp realizați de diferitele SRA.

Notațiile utilizate în fig.3.7.1 se referă la variantele de RG-F-PI dezvoltate și au următoarea semnificație:

- Δ - RG-F-PI-IE standard;
- ∇ - RG-F-PI-II standard;
- \circ - RG-F-PI-IE cu baza de reguli modificată;
- \bullet - RG-F-PI-II cu baza de reguli modificată;
- \times - RG-F-PI-IE cu baza de reguli modificată și distribuție modificată a funcțiilor de apartenență aferente termenilor lingvistici ai comenzii;
- \boxtimes - RG-F-PI-II cu baza de reguli modificată și distribuție modificată a funcțiilor de apartenență aferente termenilor lingvistici ai comenzii;

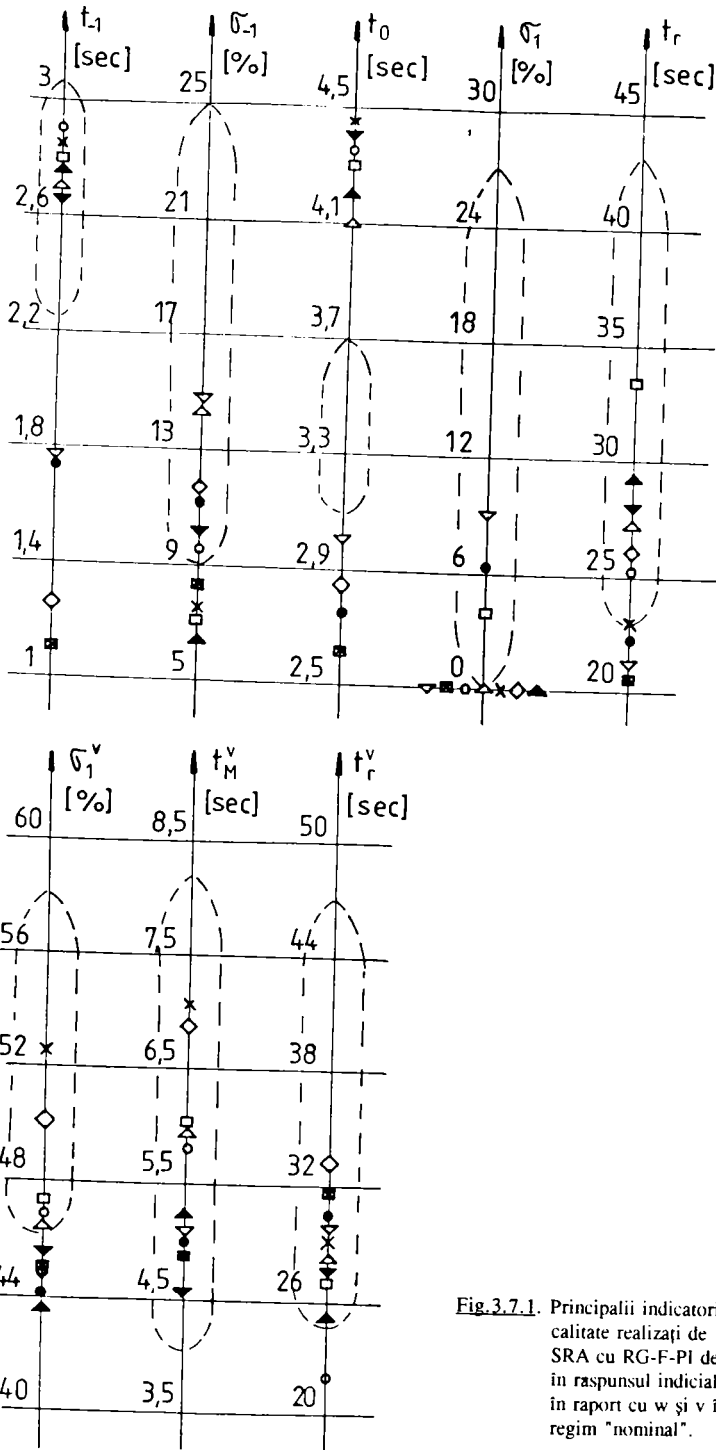


Fig.3.7.1. Principalii indicatori de calitate realizați de SRA cu RG-F-PI definiți în răspunsul indicial în raport cu w și v în regim "nominal".

- - RG-F-PI-IE cu structura variabila;
- ◇ - RG-F-PI-II cu structura variabila;
- ▲ - RG-F-PI-IE cu viteza de integrare variabila în funcție de valoarea actuala a erorii de reglare și de valoarea actuala a incrementului erorii de reglare;
- ▼ - RG-F-PI-IE cu viteza de integrare variabila în funcție de valoarea actuala a erorii de reglare curenta și de valoarea anterioara a comenzii.

Cu linie întreruptă s-au marcat în fig.3.7.1 domeniile de valori în care se încadrează principalii indicatori de calitate empirici realizați de SRA cu RG proiectate algoritmic prin metode "clasice" (conform capitolului II).

Alocând un punctaj de la 1 la 10 pentru valoarea fiecărui indicator (1 - "cel mai bun", ... , 10 - "cel mai slab"), prin compararea indicatorilor de calitate ilustrați în fig.3.7.1 se poate construi tabelul 3.7.1, care ofera recomandari privind o ordine preferențiala de alegere a tipului de RG-F-PI de utilizat.

Tabelul 3.7.1. Ordinea de alegere a RG-F-PI pe baza indicatorilor de calitate empirici realizați de SRA în regim "nominal".

| Variantă de RG | Ordine alegere indicator de calitate | | | | | | | | |
|----------------|--------------------------------------|----------|-------|------------|-------|--------------|---------|---------|--|
| | σ_{-1} | t_{-1} | t_0 | σ_1 | t_r | σ_1^v | t_M^v | t_r^v | |
| △ | 6 | 9 | 5 | 1-7 | 7 | 6 | 7 | 5 | |
| ▽ | 4 | 10 | 4 | 10 | 2 | 3 | 4 | 7 | |
| ○ | 10 | 5 | 8 | 1-7 | 5 | 7 | 6 | 1 | |
| ● | 3 | 7 | 2 | 9 | 3 | 2 | 3 | 8 | |
| × | 9 | 3 | 10 | 1-7 | 4 | 10 | 10 | 6 | |
| ⊠ | 1 | 4 | 1 | 1-7 | 1 | 4 | 2 | 9 | |
| □ | 8 | 2 | 7 | 8 | 10 | 8 | 8 | 3 | |
| ◇ | 2 | 8 | 3 | 1-7 | 6 | 9 | 9 | 10 | |
| ▲ | 7 | 1 | 6 | 1-7 | 9 | 1 | 5 | 2 | |
| ▼ | 5 | 6 | 9 | 1-7 | 8 | 5 | 1 | 4 | |

Din punct de vedere al criteriului de comparare considerat în paragraful 2.1, pe baza datelor din fig.3.7.1, tabelul 3.7.1 și a prezentărilor din paragrafele 3.2 ... 3.6 se pot evidenția următoarele aspecte:

- toate variantele de SRA cu RG-F-PI realizeaza în ansamblu un comportament mai bun în comparație cu "cel mai bun" comportament realizat de SRA cu RG proiectate algoritmic prin metode "clasice";

- "cel mai bun" comportament îl realizează:

- în raport cu referința: SRA cu RG-F-PI-II cu baza de reguli modificată și distribuție modificată a funcțiilor de apartenență aferente termenilor lingvistici ai comenzii (⊗), urmat de SRA cu RG-F-PI-II cu structura variabilă (⊙) și de SRA cu RG-F-PI-II cu baza de reguli modificată (•);
- în raport cu perturbația: SRA cu RG-F-PI-IE cu viteză de integrare variabilă în funcție de $\{e_k, \Delta e_k\}$ (▲), urmat de SRA cu RG-F-PI-IE cu viteză de integrare variabilă în funcție de $\{e_k, u_{k-1}\}$ (▼) și de SRA cu RG-F-PI-II cu baza de reguli modificată (•);
- în raport cu modificările parametrilor PC: SRA cu RG-F-PI-IE cu viteză de integrare variabilă în funcție de $\{e_k, \Delta e_k\}$ (▲), urmat de SRA cu RG-F-PI-IE cu baza de reguli modificată și distribuție modificată a funcțiilor de apartenență aferente termenilor lingvistici ai comenzii (×) și de SRA cu RG-F-PI-IE cu structura variabilă (⊙).

4) După cunoștințele autorului, o parte din RG-F-PI dezvoltate dedicate conducerii SFN și recomandările însoțitoare privind utilizarea RG-F-PI în conducerea SFN sunt originale.

Astfel, se apreciază ca originale (la momentul dezvoltării și prezentării lor la conferințe/simpozioane):

- RG-F-PI-IE cu baza de reguli modificată,
- RG-F-PI-II cu baza de reguli modificată,
- RG-F-PI-IE cu baza de reguli modificată și distribuție modificată a funcțiilor de apartenență aferente termenilor lingvistici ai comenzii,
- RG-F-PI-II cu baza de reguli modificată și distribuție modificată a funcțiilor de apartenență aferente termenilor lingvistici ai comenzii,
- RG-F-PI-IE cu structura variabilă,
- RG-F-PI-II cu structura variabilă.

Pentru celelalte variante de RG-F-PI:

- RG-F-PI-IE în varianta standard,
- RG-F-PI-II în varianta standard,
- RG-F-PI-IE cu viteză de integrare variabilă în funcție de valoarea actuală a erorii de reglare și de valoarea actuală a incrementului erorii de reglare,
- RG-F-PI-IE cu viteză de integrare variabilă în funcție de valoarea actuală a erorii de reglare și de valoarea anterioară a comenzii,

din literatura de specialitate au fost preluate doar principiile generale de "construcție informațională" a lor, autorul adaptând dezvoltarea lor ținând seama de specificul conducerii SFN; ținând seama de această comportare specifică, se menționează că această adaptare nu este însă imediată.

5) În dezvoltarea fiecărei variante de RG-F-PI unul sau mai mulți parametri este liber/sunt liberi:

- pentru cazurile ambelor variante de RG-F-PI standard și de RG-F-PI cu baza de reguli modificată;

B_e ,

- pentru cazul RG-F-PI-IE cu baza de reguli modificata și distribuție modificata a funcțiilor de apartenență aferente termenilor lingvistici ai comenzii: B_e , m , n , p ;
- pentru cazul RG-F-PI-II cu baza de reguli modificata și distribuție modificata a funcțiilor de apartenență aferente termenilor lingvistici ai comenzii: B_e , m^* , n^* , p^* ;
- pentru cazurile ambelor variante de RG-F-PI cu structura variabila: $B_e^{(1)}$, $B_e^{(2)}$;
- pentru cazurile ambelor variante de RG-F-PI-IE cu viteza de integrare variabila: B_e , B_e' .

La alegerea valorilor acestor parametri și, eventual, a valorilor altor parametri care intervin în dezvoltarea RG-F-PI trebuie avută în vedere în primul rând necesitatea asigurării stabilității SRA cu RG-F-PI; asupra acestei probleme se va reveni în capitolul V.

6) În opinia autorului, o modalitate posibilă de îmbunătățire în continuare a performanțelor SRA a proceselor cu faza neminimă constă în acordarea fuzzy a parametrilor unor tipuri de reglatoare atât convenționale cât și fuzzy; ea a fost abordată de autor în capitolul IV.

Cap. IV. DEZVOLTAREA UNOR STRATEGII DE ACORDARE FUZZY A PARAMETRILOR
UNOR TIPURI DE REGULATOARE DESTINATE CONDUCERII
SISTEMELOR CU FAZĂ NEMINIMĂ

4.1. Considerații generale

Cercetările prezentate în acest capitol au urmărit îmbunătățirea performanțelor SRA cu RG convenționale și ale SRA cu RG-F prin dezvoltarea unor structuri de conducere adaptive la care strategia de adaptare are în vedere acordarea fuzzy a unor parametri ai acestor reguloatoare. În acest context trebuie remarcat ca titlul capitolului se putea referi explicit la adaptarea fuzzy a parametrilor unor tipuri de reguloatoare; s-a preferat termenul de acordare fuzzy pentru a pune în evidență principiul de adaptare, care constă în modificările valorilor parametrilor de acordare, față de valorile considerate drept "nominale" ale parametrilor, în funcție de valoarea actuală a erorii de reglare și, eventual, de valoarea actuală a incrementului erorii de reglare sau de valorile parametrilor primari ai procesului condus.

Structurile de conducere dezvoltate în cadrul acestui capitol au specifica:

- acordarea fuzzy a parametrilor RG convențional numeric de tip PI și a parametrilor RG numeric bazat pe urmărirea unui model matematic de referință al procesului condus (paragraful 4.2);
- acordarea fuzzy a unor parametri specifici RG-F-PI în varianta standard (paragraful 4.3).

Literatura de specialitate prezintă mai multe variante relativ complexe de acordare fuzzy a parametrilor unor reguloatoare (de exemplu, (Postlethwaite, 1994), (Matko și Škrjanc, 1995), (Sousa ș.a., 1995)) dezvoltate pe baza principiilor reglării adaptive (Åström și Wittenmark, 1989), dar cu model fuzzy al PC; datorită volumului mare de calcule solicitat de algoritmi de reglare rezultați, aceste variante sunt însă relativ dificil de implementat.

Din acest motiv autorul a dezvoltat opt variante simple, originale, de structuri de acordare fuzzy a parametrilor unor reguloatoare convenționale și a parametrilor unor reguloatoare fuzzy, ușor implementabile în aplicații.

4.2. Structuri de conducere cu acordare fuzzy a parametrilor reguloatoarelor convenționale

Dezvoltarea structurilor de conducere are la baza parametrul de acordare ai reguloatoarelor convenționale obținută în urma proiectării algoritmice pe baza unei metode clasice de acordare, considerată drept parametri nominali; modificările on-line ale parametrilor de acordare utilizează RG-F dezvoltate de așa manieră încât să conducă în final la performanțe superioare ale SRA (criteriul de apreciere și de comparare a performanțelor este cel considerat în paragraful 2.1). Prin aceasta, structura reguloatoarelor dezvoltate diferă de structura clasică a reguloatoarelor convenționale de bază și pot fi considerate ca reguloatoare neliniare de același tip cu autoacordarea parametrilor (Pfeiffer și Isermann, 1993b).

În cadrul paragrafului se prezintă patru variante de acordare fuzzy a parametrilor reguloatoarelor

convenționale proiectate algoritmic în capitolul II, și anume:

- structura de regulator cu acordare fuzzy a parametrilor unui ARN-PI în varianta cvasicontinuala incrementală în funcție de valoarea actuală a erorii de reglare și de valoarea actuală a incrementului erorii de reglare (paragraful 4.2.1);
- structura de regulator cu acordare fuzzy a parametrilor unui ARN-PI în varianta cvasicontinuala incrementală în funcție de parametrii primari ai procesului condus (paragraful 4.2.2);
- două variante de structuri de regatoare cu acordare fuzzy a parametrilor unui ARN în varianta cvasicontinuala bazat pe urmărirea unui MM de referință al PC în funcție de valoarea actuală a erorii de reglare și de valoarea actuală a incrementului erorii de reglare (paragraful 4.2.3).

4.2.1. Structura de regulator cu acordare fuzzy a parametrilor unui algoritm de reglare numerică de tip PI în varianta cvasicontinuala incrementală în funcție de valoarea actuală a erorii de reglare și de valoarea actuală a incrementului erorii de reglare

Ecuția discretă aferentă ARN-PI în varianta cvasicontinuala incrementală a fost deja prezentată sub forma (3.2.1) și se rescrie astfel:

$$\Delta u_k = K_p \Delta e_k + K_i e_k. \quad (4.2.1.1)$$

Referitor la (4.2.1.1), (Tzafestas și Papanikolopoulos, 1990) prezintă următoarele două proprietăți ale algoritmului, reformulate pentru sisteme cu faza neminimă:

- a) Plecând de la observația că termenul integral ($K_i e_k$) este cel care cauzează suprareglajul și subrareglajul, rezulta că prin scăderea puternică a valorii lui K_i în situațiile în care:

- (1) eroarea de reglare devine în modul de valoare foarte mică,
- (2) modulul erorii de reglare depășește modulul referinței,

se poate reduce considerabil suprareglajul respectiv subreglajul.

Pe de altă parte, o creștere mică a valorii lui K_i atunci când eroarea de reglare este de valoare medie (în modul) determină scăderea cu 10 ... 20 % a timpului de creștere.

- b) Creșterea valorii parametrului K_p aferent termenului proporțional ($K_p \Delta e_k$) conduce la scăderea timpului de reglare și la creșterea suprareglajului și a subreglajului.

În consecință, în situațiile (1) și (2) amintite la punctul a) valoarea lui K_p trebuie scăzută.

Pe baza proprietăților a) și b) rezulta structura de regulator propusă, cu acordare fuzzy a parametrilor K_p și K_i în funcție de valoarea actuală a erorii de reglare și de valoarea actuală a incrementului erorii de reglare, prezentată în fig.4.2.1.1.

Regulatorul din fig.4.2.1.1 are o structură ierarhizată pe două nivele:

- la nivelul ierarhic inferior, încadrat în structura de SRA, se manifestă ARN-PI conform relației (4.2.1.1) cu parametrii acordabili K_p și K_i ;
- la nivelul ierarhic superior (de supervizare) are două blocuri de acordare fuzzy (BA-F și BA-F')

care realizează acordarea fuzzy a parametrilor K_p și K_i ; operația este cunoscută în literatura sub numele de "fuzzy gain scheduling" (Zhao ș.a., 1993).

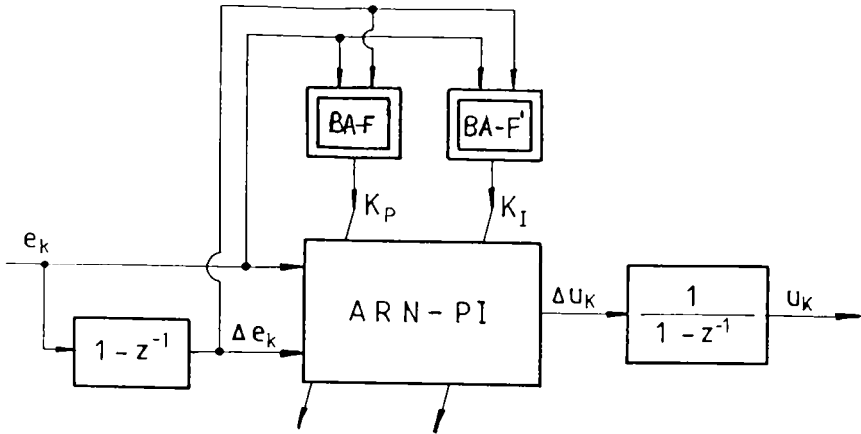


Fig.4.2.1.1. Schema bloc informațională aferentă RG cu acordare fuzzy a parametrilor K_p și K_i în funcție de $\{e_k, \Delta e_k\}$.

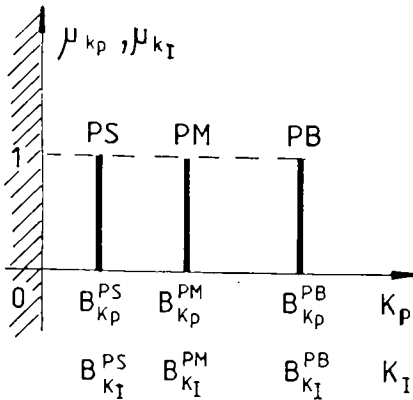


Fig.4.2.1.2. Alura funcțiilor de apartenență aferente termenilor lingvistici ai ieșirii blocului BA-F respectiv BA-F'.

Cele două blocuri de acordare fuzzy au câte două intrări (e_k și Δe_k) și câte o ieșire (K_p pentru BA-F și K_i pentru BA-F'). Funcțiile de apartenență aferente termenilor lingvistici ai intrărilor sunt de tip triunghiular uniform distribuite cu grad de acoperire 1 și alura similară celei prezentate în fig.3.2.2; parametrii de acordare specifici acestor funcții de apartenență sunt $\{B_e^P, B_{\Delta e}^P\}$ pentru BA-F, respectiv $\{B_e^I, B_{\Delta e}^I\}$ pentru BA-F'. Funcțiile de apartenență aferente termenilor lingvistici ai ieșirii sunt de tip singleton și au alura conform fig.4.2.1.2.

Inferența în cadrul celor două blocuri de acordare fuzzy se asigură după metoda max-min a lui Mamdani pe baza unui tabel de decizie prezentat în tabelul 4.2.1.1 construit ținând seama de proprietățile a) și b) menționate anterior.

Tabelul 4.2.1.1. Tabelul de decizie aferent blocurilor BA-F și BA-F'.

| | | | | | |
|--------------|----|----|----|----|----|
| e_k | NB | NS | ZE | PS | PB |
| Δe_k | | | | | |
| PB | PB | PM | PS | PS | PS |
| PS | PB | PM | PS | PS | PS |
| ZE | PM | PS | PS | PS | PM |
| NS | PS | PS | PS | PM | PB |
| NB | PS | PS | PS | PM | PB |

Defuzzificarea se asigură prin metoda centrului de greutate (pentru singletonuri).

Pentru dezvoltarea blocurilor de acordare fuzzy se pun în evidența parametrii specifici (strict pozitivi):

- pentru cazul BA-F: $\{B_e^P, B_{\Delta e}^P, B_{KP}^{PS}, B_{KP}^{PM}, B_{KP}^{PB}\}$;

- pentru cazul BA-F': $\{B_e^I, B_{\Delta e}^I, B_{KI}^{PS}, B_{KI}^{PM}, B_{KI}^{PB}\}$.

În principiu, acești parametri sunt selectați conform experienței proiectantului de SRA și valorile lor trebuie să asigure stabilitatea SRA.

Această variantă de structură de regulator cu acordare fuzzy a parametrilor unui ARN-PI în varianta cvasicontinuala incrementală în funcție de valoarea actuală a erorii de reglare și de valoarea actuală a incrementului erorii de reglare este, după cunoștințele autorului, originală și a fost dezvoltată în (Precup, 1995a). Contribuția constă în principiul de proiectare și în forma bazei de reguli dedicată nemijlocit conducerii sistemelor cu fază neminimă; regulile sunt net diferite față de alte variante cunoscute (de exemplu, (De Silva, 1991), (Zhao ș.a., 1993), (Kuhn și Wernstedt, 1995)).

Pentru studiul de caz referitor la SFN corespunzător reglării turației unui HG de la PdF 1, blocurile BA-F și BA-F' se dezvoltă după cum urmează.

Pentru $T_i = 6.8$ sec și $T_e = 0.05$ sec, din relația (3.2.4) rezultă:

$$\alpha = 0.0074. \tag{4.2.1.2}$$

Se aleg valorile parametrilor B_e^P și B_e^I :

$$B_e^P = B_e^I = 0.3. \tag{4.2.1.3}$$

Prin înlocuirea parametrilor din (4.2.1.2) și (4.2.1.3) în relația (3.2.8) rezultă:

$$B_{\Delta e}^P = B_{\Delta e}^I = 0.0022. \tag{4.2.1.4}$$

Cei alți parametri se aleg în felul următor:

$$B_{KP}^{PS} = 0.5, B_{KP}^{PM} = 1.1, B_{KP}^{PB} = 2.2; \tag{4.2.1.5}$$

$$B_{KI}^{PS} = 0.001, B_{KI}^{PM} = 0.011, B_{KI}^{PB} = 0.022. \quad (4.2.1.6)$$

Performanțele realizate de SRA cu RG cu acordare fuzzy a parametrilor unui ARN-PI în varianta cvasicontinuala incrementală în funcție de valoarea actuală a erorii de reglare și de valoarea actuală a incrementului erorii de reglare în raport cu referința sunt prezentate în tabelul 4.2.1.2.

Tabelul 4.2.1.2. Performanțele SRA cu RG cu acordare fuzzy a parametrilor unui ARN-PI în varianta cvasicontinuala incrementală în funcție de $\{e_k, \Delta e_k\}$ definite în răspunsul indicial în raport cu w .

| Nr. crt. | Parametri PC | Tip de răspuns | Indicatori de calitate | | |
|----------|--|----------------|------------------------|-------------------|-------------|
| | | | $t_{.1}$ [sec] | $\sigma_{.1}$ [%] | t_o [sec] |
| 1 | $\alpha_y = K_{qh}^* = \alpha_w = 1$ | C | 1.55 | 13.18 | 4 |
| 2 | $\alpha_y = 1.25$ $K_{qh}^* = \alpha_w = 1$ | D | 1.48 | 14.68 | 2.9 |
| 3 | $\alpha_y = 0.75$ $K_{qh}^* = \alpha_w = 1$ | B | 1.75 | 12.11 | 3.95 |
| 4 | $K_{qh}^* = 1.25$ $\alpha_y = \alpha_w = 1$ | A | 2.11 | 15.43 | 4.9 |
| 5 | $K_{qh}^* = 0.75$ $\alpha_y = \alpha_w = 1$ | C | 1 | 10.52 | 2.85 |
| 6 | $\alpha_w = 0.5$ $\alpha_y = K_{qh}^* = 1$ | A | 1.66 | 13.47 | 4.25 |
| 7 | $\alpha_w = 0$ $\alpha_y = K_{qh}^* = 1$ | B | 2.2 | 15.84 | 4.85 |

Tabelul 4.2.1.2. Continuare.

| Nr. crt. | Indicatori de calitate | | | | | |
|----------|------------------------|----------------|-------------|-------------|----------------|-------------|
| | t_w [sec] | σ_1 [%] | t_1 [sec] | t_m [sec] | σ_2 [%] | t_r [sec] |
| 1 | - | - | - | - | - | 26.7 |
| 2 | - | - | - | 22.4 | 5.7 | 25.2 |
| 3 | 24.05 | 3.08 | 21 | 27.05 | 2.56 | 28.3 |
| 4 | 19.1 | 8.73 | 13.15 | - | - | 26.4 |
| 5 | - | - | - | - | - | 26.5 |

| | | | | | | |
|---|-------|-------|------|------|-------|------|
| 6 | 22.75 | 12.22 | 10.1 | - | - | 32.5 |
| 7 | 26.2 | 42.54 | 9.4 | 45,3 | 25.12 | 58.3 |

SRA cu RG dezvoltat asigură următorii indicatori de calitate definiți în răspunsul indicial de tip a în raport cu perturbația: $t_m^v = 6.7$ sec, $\sigma_1^v = 48.45$ %, $t_r^v = 38.5$ sec.

Se observă că structura de regulator propusă asigură în ansamblu (în raport cu modificările referinței, perturbației și parametrilor PC) pentru SRA performanțe mai bune în comparație cu situația utilizării unui RG-PI convențional.

4.2.2. Structura de regulator cu acordare fuzzy a parametrilor unui algoritm de reglare numerică de tip PI în varianta numerică cvasicontinuală în funcție de parametrii primari ai procesului condus

Deși performanțele realizate de SRA cu RG cu acordare fuzzy a parametrilor unui ARN-PI în varianta cvasicontinuală incrementală în funcție de valoarea actuală a erorii de reglare și de valoarea actuală a incrementului erorii de reglare sunt îmbunătățite, ele mai pot fi ameliorate în continuare mai ales din punctul de vedere al reducerii sensibilității SRA la modificările parametrilor PC. Acesta este motivul pentru care în acest paragraf se propune o variantă de structura de RG cu acordare fuzzy a parametrilor unui ARN în varianta cvasicontinuală incrementală în funcție de parametrii primari ai PC. Structura unui astfel de SRA a unui proces condus cu faza neminimă este ilustrată în fig.4.2.2.1.

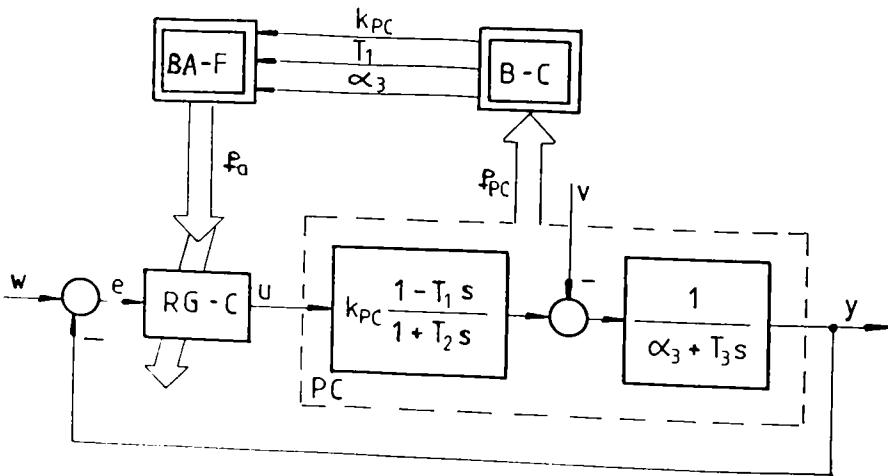


Fig.4.2.2.1. Schema bloc informațională aferentă SRA a unui PC cu faza neminimă cu acordare fuzzy a parametrilor RG-C în funcție de parametrii primari ai PC.

Elementele noi care apar în fig.4.2.2.1 au următoarele semnificații: B-C - bloc de calcul al parametrilor variabili ai PC (este vorba despre parametrii $\{k_{PC}, T_1$ (eventual T_2), $\alpha_3\}$ pentru un SFN2-IZP în general, respectiv despre parametrii $\{\alpha_y, K_{qh}^*, \alpha_\omega\}$ pentru aplicația de reglare a turației unui HG) în funcție de unii parametri primari ai PC cuprinși în vectorul p_{PC} ; BA-F - bloc de acordare fuzzy a parametrilor de acordare p_a ai regulatorului convențional RG-C.

În cazul reglării turației unui hidrogenerator vectorul p_{PC} are următoarea expresie:

$$p_{PC} = [y_{\omega 0} \quad q_0 \quad h_0 \quad \omega_0 \quad P]^T, \quad (4.2.2.1)$$

în care $y_{\omega 0}, q_0, h_0, \omega_0$ sunt coordonate ale p.d.f.s.c. în vecinătatea caruia se face liniarizarea, P reprezintă puterea activă, iar B-C este bazat pe relațiile de calcul al parametrilor $\{\alpha_y, K_{qh}^*, \alpha_\omega\}$ prezentate în paragraful 1.2.

Este evident că dacă parametrii p_{PC} nu sunt accesibili - parțial sau total - măsurătorilor, atunci B-C poate fi înlocuit cu un estimator de parametri, ceea ce implică însă o modelare matematică detaliată a procesului condus.

RG-C reprezintă de fapt ARN-PI în varianta cvasicontinuală incrementală de ecuație discretă (3.2.1) } caz în care vectorul p_a se scrie sub forma:

$$p_a = [K_p \quad K_i]^T. \quad (4.2.2.2)$$

Este de menționat că RG-C poate fi și unul din ARN bazate pe urmărirea unui MM de referință al PC, caz în care p_a are dimensiuni sensibil mai mari și procesul de acordare fuzzy se complică. De asemenea, RG-C poate fi înlocuit chiar cu variante de RG-F-PI. Procedând în acest mod se pot obține diverse variante de RG cu acordare fuzzy a parametrilor în funcție de parametrii primari ai PC.

Blocul de acordare fuzzy are, în cazul reglării turației unui hidrogenerator, trei intrări (α_y, K_{qh}^* și α_ω , cu funcții de apartenență de tip triunghiular uniform distribuite cu grad de acoperire 1 (fig.4.2.2.2)

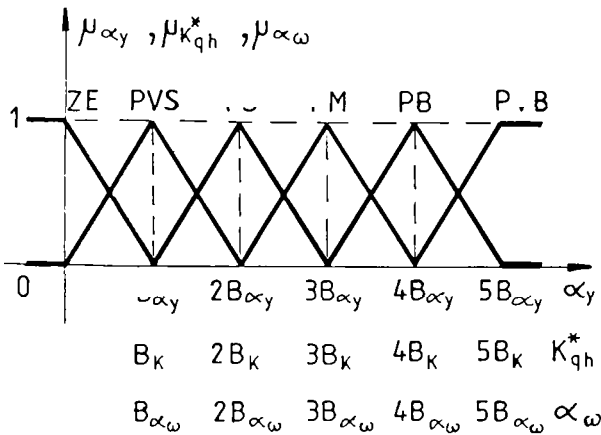
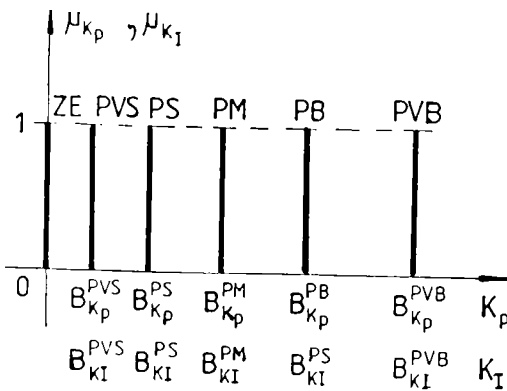


Fig.4.2.2.2. Alura funcțiilor de apartenență de intrare aferente blocului BA-F.

și două ieșiri (K_p și K_I , cu funcții de apartenență de tip singleton, fig.4.2.2.3).

Blocul BA-F utilizează metoda de inferență max-min a lui Mamdani asistată de un tabel de decizie tridimensional și metoda centrului de greutate în procesul de defuzificare.

Tabelul de decizie se construiește pe baza ideii de asigurare a unei rezerve de fază aproximativ constante (de $50^\circ \dots 55^\circ$) indiferent de valorile parametrilor PC; aceasta se materializează prin proiectarea RG-C în diverse situații aferente diferitelor valori ale parametrilor PC (situațiile au fost tratate de autor în cadrul



referatului de doc o a n . 1 . . . cup, 1994)).

Dezvoltarea regulatorului vizează, alături de construcția tabelului de decizie, alegerea parametrilor specifici care apar în fig.4.2.2.2 și 4.2.2.3.

Situația $\alpha_\omega = 0$ (cores, unza-toare funcționării în gol a hidro-generatorului) ridică problema de stabilitate a SRA (a se vedea paragraful 2.3).

Fig.4.2.2.3. Alura funcțiilor de apartenență de ieșire aferente blocului BA-F.

Această problemă se rezolvă prin reproiectarea RG-C (de tip PI) în domeniul pulsație, dar fără aplicarea principiului compensării, în vederea asigurării rezervei de fază dorite.

Procedând conform celor prezentate în (Precup, 1994), pentru studiul de caz al reglării turației unui HG al centralei hidroelectrice PdF I se aleg următoarele valori ale parametrilor specifici structurii de regulator propuse:

$$B_{\omega} = 0.26, B_K = 0.26, B_{\omega\omega} = 0.2; \quad (4.2.2.3)$$

$$B_{K_p}^{PVS} = 0.02, B_{K_p}^{PS} = 0.2, B_{K_p}^{PM} = 0.5, B_{K_p}^{PB} = 1, B_{K_p}^{PVB} = 4; \quad (4.2.2.4)$$

$$B_{K_I}^{PVS} = 0.0002, B_{K_I}^{PS} = 0.002, B_{K_I}^{PM} = 0.005, B_{K_I}^{PB} = 0.008, B_{K_I}^{PVB} = 0.02. \quad (4.2.2.5)$$

Ținând seama de valorile limita ale parametrilor $\{\alpha_\gamma, K_{gh}, \alpha_\omega\}$ prezentate în relația (1.2.2.1.24), rezulta baza de reguli incompleta a blocului BA-F materializată sub forma tabelelor de decizie din fig.4.2.2.4.

Performanțele în raport cu referința realizate de SRA cu RG dezvoltat sunt redată sintetic prin tabelul 4.2.2.1.

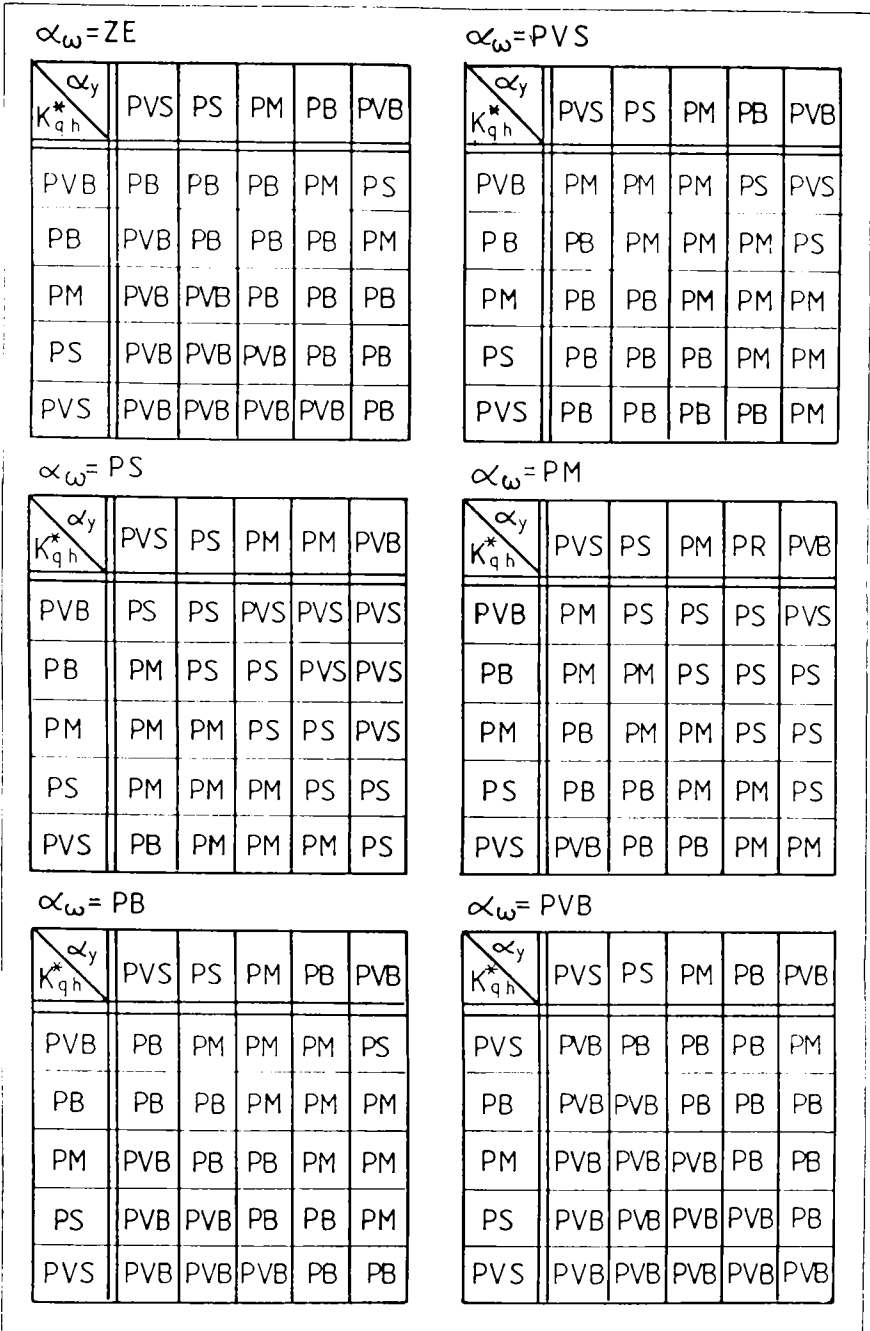


Fig.4.2.2.4. Tabelele de decizie pentru generarea lui K_p și K_l de către blocul BA-F.

Tabelul 4.2.2.1. Performanțele SRA cu RG cu acordare fuzzy a parametrilor unui ARN-PI în varianta cvasicontinuala incrementală în funcție de parametrii primari ai PC definite în răspunsul indicial în raport cu w .

| Nr. crt. | Parametri PC | Tip de răspuns | Indicatori de calitate | | |
|----------|--|----------------|------------------------|----------------|-------------|
| | | | t_1 [sec] | σ_1 [%] | t_0 [sec] |
| 1 | $\alpha_y = K_{qh}^* = \alpha_u = 1$ | C | 2.56 | 5.44 | 3.8 |
| 2 | $\alpha_y = 1.25$ $K_{qh}^* = \alpha_u = 1$ | C | 2.6 | 5.9 | 3.8 |
| 3 | $\alpha_y = 0.75$ $K_{qh}^* = \alpha_u = 1$ | C | 3 | 6.28 | 3.85 |
| 4 | $K_{qh}^* = 1.25$ $\alpha_y = \alpha_u = 1$ | C | 2.95 | 5.9 | 3.9 |
| 5 | $K_{qh}^* = 0.75$ $\alpha_y = \alpha_u = 1$ | C | 2.4 | 4.32 | 3.75 |
| 6 | $\alpha_u = 0.5$ $\alpha_y = K_{qh}^* = 1$ | A | 3 | 7.6 | 4.1 |
| 7 | $\alpha_u = 0$ $\alpha_y = K_{qh}^* = 1$ | A | 3.12 | 8.23 | 4.2 |

Tabelul 4.2.2.1. Continuare.

| Nr. crt. | Indicatori de calitate | | | | | |
|----------|------------------------|----------------|-------------|-------------|----------------|-------------|
| | t_w [sec] | σ_1 [%] | t_1 [sec] | t_m [sec] | σ_2 [%] | t_r [sec] |
| 1 | - | - | - | - | - | 16.5 |
| 2 | - | - | - | - | - | 16.5 |
| 3 | - | - | - | - | - | 20.75 |
| 4 | - | - | - | - | - | 19.75 |
| 5 | - | - | - | - | - | 16 |
| 6 | 9.5 | 9.53 | 6.9 | - | - | 25 |
| 7 | 10.65 | 11.35 | 7.25 | - | - | 31.65 |

În raport cu perturbația rezultă următoarele performanțe realizate de SRA: răspuns indicial de tip a,

$t_M^y = 4.8 \text{ sec}$, $\sigma_1^y = 44.41 \%$, $t_r^y = 23.4 \text{ sec}$.

Se poate observa cu ușurință ca performanțele asigurate de aceasta varianta de regulator sunt superioare celor asigurate de regulatoarele până aici prezentate.

Regulatorul propus cu acordare fuzzy a parametrilor K_p și K_i ai unui ARN-PI în funcție de parametri primari ai PC este original prin modalitatea de acordare a parametrilor bazată pe menținerea constantă a rezervei de fază a SRA. În literatura se mai cunosc și alte variante de acordare fuzzy a parametrilor unor ARN în funcție de parametri primari ai PC, dar aceste variante se dovedesc adecvate conducerii sistemelor cu fază minimă. Spre exemplu, în (Ling și Edgar, 1992) se face o acordare fuzzy a parametrilor unui RG-PID bazată pe interpolarea parametrilor și exemplificată pe un proces condus de tip PT1 cu parametri variabili; adaptarea metodei după (Ling și Edgar, 1992) la conducerea SFN necesită în continuare experiența din partea proiectantului de SRA.

În cadrul cercetărilor efectuate de autor s-a recurs la soluția de acordare fuzzy întrucât în cazul aplicației considerate sunt mai dificil de realizat măsurări exacte ale parametrilor PC, iar o acordare fermă (exactă), deși teoretic posibilă, devine complicată. În plus, în acest mod se realizează o trecere lină, fără șocuri, a comenzii de la un set de parametri la altul atunci când se modifică p.d.f.s.c., facilitată și de faptul - menționat în capitolul II - că parametrii PC au dependență continuă de coordonatele p.d.f.s.c. în vecinătatea cărora se efectuează liniarizarea.

4.2.3. Structuri de regulatoare cu acordare fuzzy a parametrilor unui algoritm de reglare numerică în varianta cvasicontinuală bazată pe urmărirea unui model matematic de referință al procesului condus în funcție de valoarea actuală a erorii de reglare și de valoarea actuală a incrementului erorii de reglare

După cum s-a arătat în paragraful 2.3, regulatorul bazat pe urmărirea unui MM de referință al PC poate fi caracterizat prin următoarea f.d.t. de bază (valabilă pentru $k_{PC} = \alpha_3 = 1$ în (2.2.3.18)):

$$H_R(s) = \frac{(1 + T_2 s)(1 + T_3 s)}{s(2 T_{imp} + T_1 + T_{imp}^2 s)}, \quad (4.2.3.1)$$

Ținând seama de forma particulară a f.d.t. (4.2.3.1), în continuare se pot urma mai multe direcții legate de îmbunătățirea performanțelor SRA prin introducerea acordării fuzzy a parametrilor acestui tip de regulator. Din cadrul acestor direcții, dezvoltate și prezentate pe larg de autor în (Precup, 1995a), se prezintă doar următoarele două considerate în întregime originale; strategiile de dezvoltare referitoare la cele două variante de structuri de RG cu acordare fuzzy a parametrilor unui ARN în varianta cvasicontinuală bazată pe urmărirea unui MM de referință al PC în funcție de $\{e_k, \Delta e_k\}$ sunt numerotate în cele ce urmează cu I și II.

Varianta I are la bază efectuarea următoarelor operații.

Prin discretizarea f.d.t. (4.2.3.1) cu metoda trapezelor se obține următoarea ecuație discretă aferentă

ARN (de tip PIDT1) în varianta cvasicontinuala:

$$u_k = p_1 u_{k-1} - p_2 u_{k-2} + q_0 e_k + q_1 \Delta e_k - q_2 \Delta e_{k-1}, \quad (4.2.3.2)$$

în care parametrii au expresiile:

$$p_1 = \frac{4 T_{imp}^2}{T_e (2 T_{imp} + T_1) + 2 T_{imp}^2 - T_e (2 T_{imp} + T_1) + 2 T_{imp}^2}, \quad (4.2.3.3)$$

$$p_2 = \frac{2 T_{imp}^2}{T_e (2 T_{imp} + T_1) + 2 T_{imp}^2}, \quad (4.2.3.4)$$

$$q_0 = \frac{2 T_1 T_3 + T_e (T_1 + T_3 - 1.5 T_e)}{T_e (2 T_{imp} + T_1) + 2 T_{imp}^2}, \quad (4.2.3.5)$$

$$q_1 = \frac{2 T_1 T_3 - T_e (T_1 + T_3 - 1.5 T_e)}{T_e (2 T_{imp} + T_1) + 2 T_{imp}^2}, \quad (4.2.3.6)$$

$$q_2 = \frac{2 T_{imp}^2}{T_e (2 T_{imp} + T_1) + 2 T_{imp}^2}. \quad (4.2.3.7)$$

În relațiile anterioare T_e este perioada de eșantionare (pasul de discretizare), iar $\Delta e_k = e_k - e_{k-1}$ și $\Delta e_{k-1} = e_{k-1} - e_{k-2}$ reprezintă incrementul erorii de reglare la al k-lea, respectiv al (k-1)-lea pas de discretizare; celelalte mărimi și ceilalți parametri au semnificație cunoscută.

Relația (4.2.3.2) poate fi rearanjată sub forma:

$$u_k = p_1 u_{k-1} - p_2 u_{k-2} - q_2 \Delta e_{k-1} + u_k^1, \quad (4.2.3.8)$$

unde:

$$u_k^1 = q_0 e_k + q_1 \Delta e_k. \quad (4.2.3.9)$$

Se observă imediat că dacă se acceptă asocierea lui q_0 , q_1 și u_k^1 cu K_I , K_P , respectiv Δu_k , ecuația discretă (4.2.3.9) va avea aceeași expresie cu cea a ecuației discrete (4.2.1.1) aferente ARN-PI în varianta cvasicontinuala incrementală. De aici rezultă că este posibilă acordarea fuzzy a parametrilor q_0 și q_1 (care apar în termenul u_k^1) în același mod cu acordarea fuzzy a parametrilor K_I , respectiv K_P (care apar în termenul Δu_k) în funcție de $\{e_k, \Delta e_k\}$ (paragraful 4.2.1).

Pe această bază se obține structura de reglare adaptivă din fig.4.2.3.1, numită în continuare RG cu acordare fuzzy a doi parametri ai unui ARN în varianta cvasicontinuala bazat pe urmărirea unui MM de referință al PC în funcție de valoarea actuală a erorii de reglare și de valoarea actuală a incrementului erorii de reglare sau, pe scurt, RG cu acordare fuzzy a parametrilor q_0 și q_1 în funcție de $\{e_k, \Delta e_k\}$.

Cele două blocuri de acordare fuzzy BA-F (pentru parametrul q_1) și BA-F' (pentru parametrul q_0)

situate pe nivelul de supervizare sunt similare blocurilor de acordare fuzzy cu același nume din paragraful 4.2.1. Prin urmare, parametrii - strict pozitivi - specifici acestei variante de RG sunt:

- $\{B_e^0, B_{\Delta e}^0, B_{q_0}^{PS}, B_{q_0}^{PM}, B_{q_0}^{PB}\}$ - pentru acordarea fuzzy a parametrului q_0 ;
- $\{B_e^1, B_{\Delta e}^1, B_{q_1}^{PS}, B_{q_1}^{PM}, B_{q_1}^{PB}\}$ - pentru acordarea fuzzy a parametrului q_1 ;
- $\{p_1, p_2, q_2\}$ - pentru ecuația discretă (4.2.3.8).

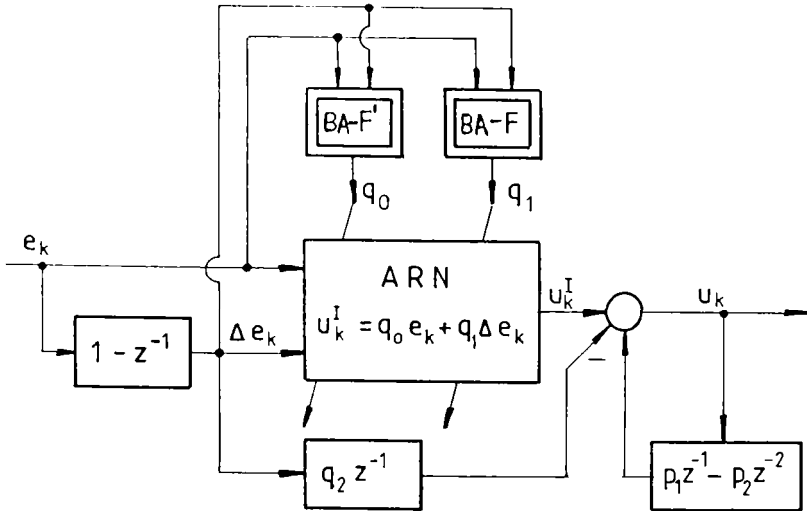


Fig.4.2.3.1. Schema bloc informațională aferentă RG cu acordare fuzzy a parametrilor q_0 și q_1 în funcție de $\{e_k, \Delta e_k\}$.

Alurile funcțiilor de apartenență, tabelul de decizie, metodele de inferență și defuzzificare sunt similare cu cele prezentate în paragraful 4.2.1.

Dezvoltarea RG cu acordare fuzzy a parametrilor q_0 și q_1 în funcție de $\{e_k, \Delta e_k\}$ demarează prin alegerea constantei de timp T_{imp} și a perioadei de eșantionare T_e , urmată de calculul parametrilor p_1, p_2 și q_2 conform relațiilor (4.2.3.3), (4.2.3.4) și respectiv (4.2.3.7); în continuare, ceilalți parametri (cei care descriu funcțiile de apartenență) se selectează conform experienței proiectantului.

În scopul păstrării caracterului integrator al RG (condiția $p_1 - p_2 = 1$ asigură un pol de valoare egală cu 1, ceea ce implică un caracter astatic al SRA), pentru parametrii p_1 și p_2 se folosesc valori exacte (ferme).

Pentru studiul de caz luat în considerare se aleg:

$$T_{imp} = 5 \text{ sec}, T_e = 0.05 \text{ sec}; \quad (4.2.3.10)$$

rezulta:

$$p_1 = 1.9759, p_2 = 0.9759, q_2 = 0.2879. \quad (4.2.3.11)$$

În continuare, se aleg:

$$B_e^0 = B_e^1 = 0.3, \quad (4.2.3.12)$$

pe baza unei relații similare relației (3.2.4) rezulta:

$$\alpha = q_0/q_1 = 2 T_e^2/[2 T_1 T_3 + T_e (T_1 + T_3 - 1.5 T_e)] = 3.25 \cdot 10^{-4} \quad (4.2.3.13)$$

și aplicând o relație de forma (3.2.8) se obține:

$$B_{ac}^0 = B_{ac}^1 = 9.77 \cdot 10^{-5}. \quad (4.2.3.14)$$

Ceilați parametri sunt selectați astfel:

$$B_{q_0}^{PS} = 10^{-4}, B_{q_0}^{PM} = 1.2 \cdot 10^{-4}, B_{q_0}^{PB} = 2.5 \cdot 10^{-4}; \quad (4.2.3.15)$$

$$B_{q_1}^{PS} = 0.3, B_{q_1}^{PM} = 0.31, B_{q_1}^{PB} = 0.33. \quad (4.2.3.16)$$

În raport cu perturbația SRA cu RG dezvoltat realizează: răspuns indicial de tip a, $t_M^* = 6.85$ sec, $\sigma_1^* = 50.44$ %, $t_r^* = 19.6$ sec.

Performanțele în raport cu referința realizate de SRA cu RG cu acordare fuzzy a parametrilor q_0 și q_1 în funcție de $\{e_k, \Delta e_k\}$ sunt prezentate în tabelul 4.2.3.1.

Tabelul 4.2.3.1. Performanțele SRA cu regulator cu acordare fuzzy a parametrilor q_0 și q_1 în funcție de $\{e_k, \Delta e_k\}$ definite în răspunsul indicial în raport cu w.

| Nr. crt. | Parametri PC | Tip de răspuns | Indicatori de calitate | | |
|----------|--|----------------|------------------------|-------------------|-------------|
| | | | t_{r1} [sec] | σ_{-1} [%] | t_0 [sec] |
| 1 | $\alpha_y = K_{qh}^* = 1$ $= \alpha_w = 1$ | C | 1.4 | 10.26 | 3.55 |
| 2 | $\alpha_y = 1.25$ $K_{qh}^* = \alpha_w = 1$ | C | 1.4 | 11.66 | 3.5 |
| 3 | $\alpha_y = 0.75$ $K_{qh}^* = \alpha_w = 1$ | C | 1.4 | 8.9 | 3.55 |
| 4 | $K_{qh}^* = 1.25$ $\alpha_y = \alpha_w = 1$ | A | 1.8 | 11.87 | 4.55 |
| 5 | $K_{qh}^* = 0.75$ $\alpha_y = \alpha_w = 1$ | C | 1.05 | 8.77 | 2.55 |
| 6 | $\alpha_w = 0.5$ $\alpha_y = K_{qh}^* = 1$ | B | 1.5 | 11.69 | 3.7 |
| 7 | $\alpha_w = 0$ $\alpha_y = K_{qh}^* = 1$ | B | 2 | 11.54 | 4.1 |

Tabelul 4.2.3.1. Continuare.

| Nr. crt. | Indicatori de calitate | | | | | |
|----------|------------------------|----------------|-------------|-------------|----------------|-------------|
| | t_m [sec] | σ_1 [%] | t_1 [sec] | t_m [sec] | σ_2 [%] | t_r [sec] |
| 1 | - | - | - | - | - | 20.5 |
| 2 | - | - | - | - | - | 20.35 |
| 3 | - | - | - | - | - | 19.6 |
| 4 | 23.25 | 2.67 | 18.75 | - | - | 22.45 |
| 5 | - | - | - | - | - | 27.7 |
| 6 | 23.2 | 15.02 | 13.6 | 40.2 | 5.12 | 43.1 |
| 7 | 23.8 | 54.53 | 10.3 | 47.3 | 31.63 | 64.1 |

Analiza comparativa a performanțelor realizate de SRA evidențiază ca aceasta varianta de structura de RG cu acordare fuzzy a parametrilor q_0 și q_1 în funcție de $\{e_x, \Delta e_x\}$ asigură în ansamblu performanțe mai bune în comparație cu RG convenționale și mai puțin bune în raport cu structura de RG cu acordare fuzzy a parametrilor unui ARN-PI în funcție de parametrii primari ai PC; prin aceasta, utilizarea primordială a ei nu este justificată.

Varianta a II-a pleacă de la observația că relația (4.2.3.1) poate fi rearanjată în forma serie:

$$H_R(s) = H_R^{II}(s) H_{F-u}^{II}(s), \quad (4.2.3.17)$$

în care $H_R^{II}(s)$ este f.d.t. a unui RG-PI:

$$H_R^{II}(s) = \frac{1 + T_3 s}{s} \quad (4.2.3.18)$$

și $H_{F-u}^{II}(s)$ este f.d.t. a unui filtru PDTI:

$$H_{F-u}^{II}(s) = \frac{1 + T_2 s}{2 T_{imp} + T_1 + T_{imp}^2 s} \quad (4.2.3.19)$$

RG-PI cu f.d.t. H_R^{II} are următorii parametri:

$$T_i = T_3 \text{ și respectiv } k_R = T_3. \quad (4.2.3.20)$$

Discretizarea cu metoda trapezelor va menține valabile relațiile (3.2.2) ... (3.2.4) stabilite între parametrii $\{k_R, T_i\}$ aferenți RG-PI (caracterizat prin relațiile (4.2.3.18) și (4.2.3.20)) și parametrii $\{K_p, K_i, \alpha\}$ specifici ARN-PI. Ca urmare, ARN-PI în varianta cvasicontinuală incrementală va obține în acest caz următoarea expresie (de forma celei din relația (3.2.1)):

$$\Delta u_k^{\text{II}} = K_p (\Delta e_k + \alpha e_k). \quad (4.2.3.21)$$

Prin discretizarea filtrului F-u (4.2.3.19) cu metoda trapezelor pentru aceeași perioadă de eșantionare T_e se obține ecuația discretă a unui algoritm de filtrare numerică de ordinul I:

$$u_k = s_1 u_{k-1} + t_0 u_k^{\text{II}} - t_1 u_{k-1}^{\text{II}}, \quad (4.2.3.22)$$

în care parametrii au expresiile:

$$s_1 = \frac{2 T_{\text{imp}}^2 - T_e (2 T_{\text{imp}} + T_1)}{2 T_{\text{imp}}^2 + T_e (2 T_{\text{imp}} + T_1)}, \quad (4.2.3.23)$$

$$t_0 = \frac{2 T_{\text{imp}}^2 + T_e (2 T_{\text{imp}} + T_1)}{2 T_2 - T_e}, \quad (4.2.3.24)$$

$$t_1 = \frac{2 T_{\text{imp}}^2 + T_e (2 T_{\text{imp}} + T_1)}{2 T_{\text{imp}}^2 + T_e (2 T_{\text{imp}} + T_1)}. \quad (4.2.3.25)$$

Ideea de bază a acestei a doua variante de RG cu acordare fuzzy a parametrilor unui ARN în varianta cvasicontinuală bazat pe urmărirea unui MM de referință al PC constă în implementarea relației (4.2.3.21) sub forma unui RG cu acordare fuzzy a parametrilor K_p și K_I (a se vedea paragraful 4.2.1) și în transmiterea comenzii elaborate u_k^{II} algoritmului de filtrare numerică având ecuația discretă (4.2.3.22). În consecință, rezulta structura de RG prezentată în fig.4.2.3.2 și numită în cele ce urmează "regulator cu acordare fuzzy a parametrilor unui ARN-PI în varianta cvasicontinuală incrementală în funcție de valoarea actuală a erorii de reglare și de valoarea actuală a incrementului erorii de reglare și filtrare a comenzii (F-u)".

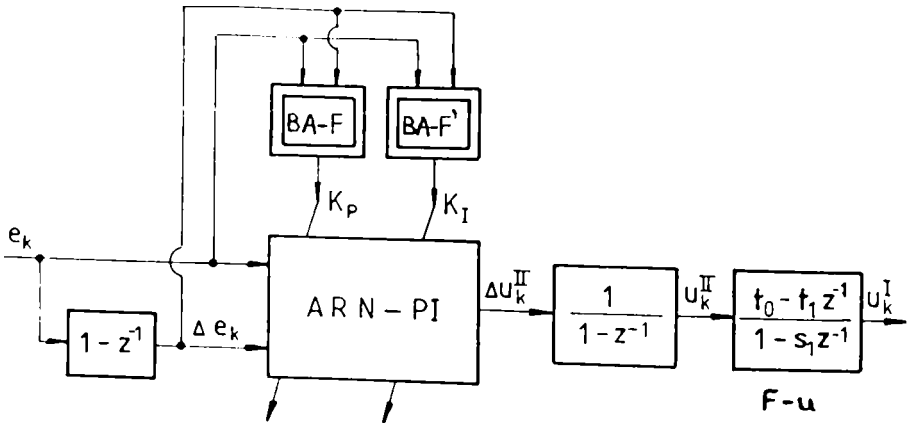


Fig.4.2.3.2. Schema bloc informațională aferentă RG cu acordare fuzzy a parametrilor unui ARN-PI în varianta cvasicontinuală incrementală în funcție de $\{e_k, \Delta e_k\}$ și filtrare a comenzii.

Dezvoltarea acestui regulator se desfășoară în două etape:

- pentru RG cu acordare fuzzy a parametrilor K_P și K_I : conform celor prezentate în paragraful 4.2.1;
- pentru algoritmul de filtrare numerică: prin alegerea adecvată, bazată pe observațiile din paragraful 2.2.3 și pe cerințele conducerii cvasicontinue, a valorilor parametrilor T_{imp} și T_e și aplicarea relațiilor (4.2.3.23) ... (4.2.3.25).

De observat este însă faptul că în raport cu structurile anterioare de reglare aceste dezvoltări sunt mai laborioase.

Pentru studiul de caz al reglării turației unui HG de la PdF 1 selectând:

$$T_{imp} = 3 \text{ sec}, T_e = 0.05 \text{ sec}, T_i = T_m = 6.8 \text{ sec.} \quad (4.2.3.26)$$

rezulta:

$$s_1 = 0.833, t_0 = 0.1222, t_1 = 0.1018, \quad (4.2.3.27)$$

$$\alpha = 0.0074. \quad (4.2.3.28)$$

Alegând în continuare:

$$B_e^P = B_e^I = 0.3, \quad (4.2.3.29)$$

din relațiile (3.2.8), (4.2.3.28) și (4.2.3.29) se obține:

$$B_{\Delta e}^P = B_{\Delta e}^I = 0.0022. \quad (4.2.3.30)$$

În final se aleg ceilalți parametri liberi aferenți blocurilor de acordare fuzzy BA-F și BA-F':

$$B_{K_P}^{PS} = 2.5, B_{K_P}^{PM} = 5, B_{K_P}^{PB} = 10; \quad (4.2.3.31)$$

$$B_{K_I}^{PS} = 0.02, B_{K_I}^{PM} = 0.04, B_{K_I}^{PB} = 0.08. \quad (4.2.3.32)$$

În tabelul 4.2.3.2 sunt prezentate performanțele realizate în raport cu referința de SRA cu RG dezvoltat.

Tabelul 4.2.3.2. Performanțele SRA cu regulator cu acordare fuzzy a parametrilor unui ARN-PI în varianta cvasicontinuală incrementală în funcție de valoarea actuală a erorii de reglare și de valoarea actuală a incrementului erorii de reglare și filtrare a comenzii definite în răspunsul indicial în raport cu w .

| Nr. crt. | Parametri PC | Tip de răspuns | Indicatori de calitate | | |
|----------|---|----------------|------------------------|-------------------|-------------|
| | | | $t_{.1}$ [sec] | $\sigma_{.1}$ [%] | t_0 [sec] |
| 1 | $\alpha_y = K_{q_h}^* = \alpha_w = 1$ | C | 2.7 | 5.9 | 4.1 |
| 2 | $\alpha_y = 1.25$ $K_{q_h}^* = \alpha_w = 1$ | C | 2.7 | 6.76 | 4.05 |
| 3 | $\alpha_y = 0.75$ $K_{q_h}^* = \alpha_w = 1$ | C | 2.75 | 6.1 | 4.15 |
| 4 | $K_{q_h}^* = 1.25$ $\alpha_y = \alpha_w = 1$ | C | 3.3 | 6.46 | 4.85 |

| | | | | | |
|---|--|---|------|------|------|
| 5 | $K_{qn}^* = 0.75$ $\alpha_y = \alpha_u = 1$ | C | 2.1 | 6.66 | 3.05 |
| 6 | $\alpha_u = 0.5$ $\alpha_y = K_{qn}^* = 1$ | A | 2.85 | 6.25 | 4.25 |
| 7 | $\alpha_u = 0$ $\alpha_y = K_{qn}^* = 1$ | B | 3 | 6.69 | 4.45 |

Tabloul 4.2.3.2. Continuare.

| Nr. crt. | Indicatori de calitate | | | | | |
|----------|------------------------|----------------|-------------|-------------|----------------|-------------|
| | t_m [sec] | σ_1 [%] | t_1 [sec] | t_m [sec] | σ_2 [%] | t_r [sec] |
| 1 | - | - | - | - | - | 16.5 |
| 2 | - | - | - | - | - | 20.7 |
| 3 | - | - | - | - | - | 30 |
| 4 | - | - | - | - | - | 25.3 |
| 5 | - | - | - | - | - | 27.5 |
| 6 | 24.75 | 2.9 | 21.6 | - | - | 27.25 |
| 7 | 22.45 | 27.47 | 16.5 | 36.6 | 12.07 | 48.7 |

SRA cu RG dezvoltat asigura urmatoorii indicatori de calitate definiți în raspunsul indicial (de tip a) în raport cu perturbajia: $t_m^* = 5.85$ sec, $\sigma_1^* = 49.27$ %, $t_r^* = 24.5$ sec.

Se observa ca aceasta a doua varianta de structura de RG cu acordare fuzzy a parametrilor unui ARN-PI în varianta evasicontinuala bazat pe urmarirea unui MM de referința al PC în funcție de $\{e_k, \Delta e_k\}$ asigura în ansamblu (în raport cu modificarile referinței, perturbajiei și parametrilor) un comportament mai bun în comparație cu prima varianta, dar sub nivelul comportamentului asigurat de structura de RG cu acordare fuzzy a parametrilor unui ARN-PI în varianta evasicontinuala incrementală în funcție de parametrii primari ai PC.

4.3. Structuri de conducere cu acordare fuzzy a unor parametri specifici ai reguletoarelor fuzzy de tip cvasi-PI în varianta standard

În general, în vederea îmbunătățirii performanțelor SRA cu RG-F pot fi (re)acordați fuzzy diferiți parametri ai RG-F. În practica, însă, acordarea fuzzy a parametrilor vizeaza cel mai des și eficient:

- funcțiile de apartenență (de exemplu, (Chunyu ș.a., 1990)) și
- baza de reguli (de exemplu, (Batur și Kasparian, 1990)).

Plecând de la aceasta observație, în cele ce urmează se prezintă patru variante de structuri de acordare fuzzy a parametrilor unui RG-F-PI orientate pe modificarea - directă sau indirectă a - formei funcțiilor de apartenență, și anume:

- structura de regulator cu acordare fuzzy a formei funcțiilor de apartenență aferente termenilor lingvistici ai intrărilor și ieșirii unui RG-F-PI standard în doua variante (paragraful 4.3.1),
- structura de regulator cu acordare fuzzy a coeficientului de transfer al unui RG-F-PI standard în doua variante (paragraful 4.3.2).

4.3.1. Structura de regulator cu acordare fuzzy a formei funcțiilor de apartenență aferente termenilor lingvistici ai intrărilor și ieșirii unui regulator fuzzy de tip cvasi-PI în varianta standard în funcție de valoarea actuală a erorii de reglare

Structura unui astfel de regulator - prezentată în doua variante corespunzătoare integrării pe ieșirea regulatorului și respectiv integrării pe intrarea regulatorului - este prezentată în fig.4.3.1.1 și respectiv în fig.4.3.1.2. Blocul de acordare fuzzy BA-F determina valoarea parametrului B_e pe baza erorii de reglare e_k . Cele doua variante sunt numite în continuare RG-F-PI standard cu modificarea valorii parametrului B_e în funcție de valoarea actuală a erorii de reglare.

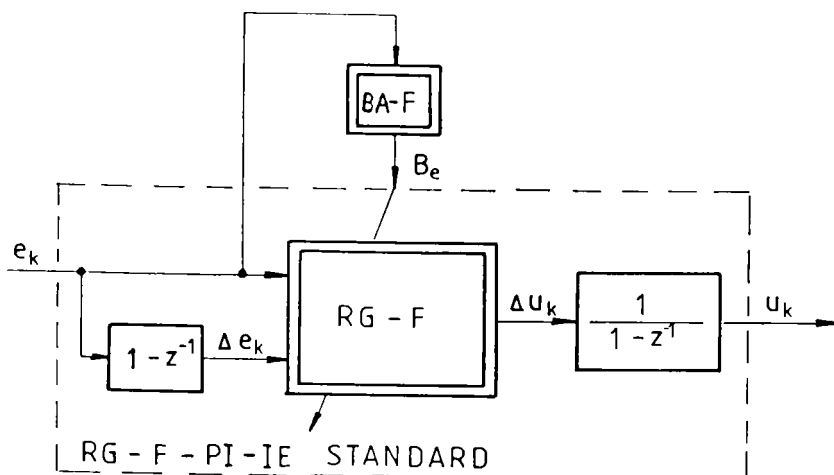


Fig.4.3.1.1. Schema bloc informațională aferentă RG-F-PI-IE standard cu modificarea valorii parametrului B_e în funcție de valoarea actuală a erorii de reglare.

Aceste regulatoare realizeaza practic o schimbare a formei (in speța, a suportului) funcțiilor de apartenența aferente termenilor lingvistici ai intrarilor și ieșirii în funcție de valoarea erorii de reglare e_k și, în consecința, pot fi considerate ca făcând parte din categoria RG-F cu autoacordarea parametrilor.

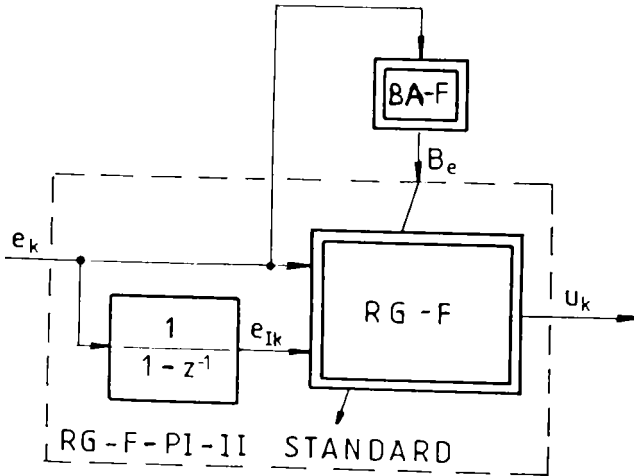


Fig.4.3.1.2. Schema bloc informațională aferentă RG-F-PI-II standard cu modificarea valorii parametrului B_e în funcție de valoarea actuală a erorii de reglare.

Blocul de acordare BA-F cu rol de supervizare lucreaza cu o intrare e_k (cu funcții de apartenența de tip triunghiular de parametru B_e^{AF} conform fig.3.2.2) și cu o ieșire B_e (cu funcții de apartenența de tip singleton de parametri $\{B_{B_e}^{PS}, B_{B_e}^{PM}, B_{B_e}^{PB}\}$ conform fig.4.2.1.2).

Tabelul 4.3.1.1. Tabelul de decizie aferent BA-F din cadrul RG-F-PI standard cu modificarea valorii parametrului B_e în funcție de e_k .

| | | | | | |
|-------|----|----|----|----|----|
| e_k | NB | NS | ZE | PS | PB |
| B_e | PS | PM | PB | PM | PS |

Inferența în cadrul BA-F se asigura utilizând metoda max-min a lui Mamdani cu un tabel de decizie unidimensional prezentat în tabelul 4.3.1.1 (dedicat conducerii SFN), iar defuzificarea se asigura pe baza metodei centrului de greutate.

Variantele de acordare fuzzy a formei funcțiilor de apartenența prezentate în literatura (de exemplu, (Chunyu ș.a., 1990), (Zhao ș.a., 1992)) sunt orientate de regula doar pe una din variabilele lingvistice de

intrare sau de ieșire și efectuează doar acordări off-line ale parametrilor. Variantele propuse se consideră originale prin aceea că:

- realizează o acordare on-line a parametrului B_e^* ,
- prin baza de reguli aferentă blocului BA-F țin seama de caracterul de sistem cu fază neminimă al PC,
- vizează toate variabilele lingvistice deoarece parametrii $B_{\Delta e}$ și $B_{\Delta u}$ depind de B_e prin intermediul relației (3.2.8), respectiv B_{e1} și B_u depind de B_e prin intermediul relației (3.2.22).

Varianta de RG-F-PI-IE cu modificarea valorii parametrului B_e în funcție de e_x a fost comunicată de autor în (Precup, 1995a) și (Precup, 1995b), iar varianta de RG-F-PI-II cu modificarea valorii parametrului B_e în funcție de e_x apare pentru prima dată în cadrul tezei.

Dezvoltarea celor două variante de RG-F-PI prezentate constă în parcurgerea următorilor pași:

- proiectarea algoritmică a RG-PI convențional de parametri $\{k_R, T_I\}$;
- selectarea valorii perioadei de eșantionare T_e și determinarea valorilor parametrilor $\{K_P, K_I, \alpha\}$ respectiv $\{K_P^*, K_I^*, \alpha^*\}$ specifici ARN-PI în varianta cvasicontinuală (în conformitate cu paragraful 3.2);
- alegerea valorilor parametrilor de acordare strict pozitivi $\{B_e^{AF}, B_{Be}^{PS}, B_{Be}^{PM}, B_{Be}^{PB}\}$ (parametrii $\{B_{\Delta e}, B_{\Delta u}\}$ respectiv $\{B_{e1}, B_u\}$ se calculează on-line dependent de valoarea actuală a lui B_e).

Pentru studiul de caz abordat (reglarea turăției unui HG de la centrala hidroelectrică PdF 1) se alege:

a) pentru cazul RG-F-PI-IE cu modificarea valorii parametrului B_e în funcție de e_x :

$$B_e^{AF} = 0.5, B_{Be}^{PS} = 0.3, B_{Be}^{PM} = 0.5, B_{Be}^{PB} = 0.7; \quad (4.3.1.1)$$

b) pentru cazul RG-F-PI-II cu modificarea valorii parametrului B_e în funcție de e_x :

$$B_e^{AF} = 0.5, B_{Be}^{PS} = 0.8, B_{Be}^{PM} = 1, B_{Be}^{PB} = 1.2. \quad (4.3.1.2)$$

Pentru valorile convenabile ale parametrilor:

$$k_R = 1.1, T_m = 6.8 \text{ sec}, T_e = 0.05 \text{ sec}, \quad (4.3.1.3)$$

rezulta:

$$K_P = 1.096, K_I = 0.0081, \alpha = 0.0074, \quad (4.3.1.4)$$

respectiv:

$$K_P^* = 0.0081, K_I^* = 1.096, \alpha^* = 135.5. \quad (4.3.1.5)$$

Performanțele în raport cu referința realizate de cele două SRA cu RG dezvoltate sunt redată sintetic prin tabelele 4.3.1.2 și 4.3.1.3.

Tabelul 4.3.1.2. Performanțele SRA cu RG-F-PI-IE cu modificarea valorii parametrului B_e în funcție de valoarea actuală a erorii de reglare definite în răspunsul indicial în raport cu w .

| Nr. crt. | Parametri PC | Tip de răspuns | Indicatori de calitate | | |
|----------|--|----------------|------------------------|-------------------|-------------|
| | | | $t_{,1}$ [sec] | $\sigma_{,1}$ [%] | t_o [sec] |
| 1 | $\alpha_y = K_{qh}^* = \alpha_w = 1$ | C | 2.75 | 5.58 | 4.15 |
| 2 | $\alpha_y = 1.25$ $K_{qh}^* = \alpha_w = 1$ | C | 2.75 | 6.33 | 4.2 |
| 3 | $\alpha_y = 0.75$ $K_{qh}^* = \alpha_w = 1$ | C | 2.75 | 6.88 | 4.3 |
| 4 | $K_{qh}^* = 1.25$ $\alpha_y = \alpha_w = 1$ | C | 3.35 | 6.95 | 5.15 |
| 5 | $K_{qh}^* = 0.75$ $\alpha_y = \alpha_w = 1$ | C | 2.1 | 4.49 | 3.1 |
| 6 | $\alpha_w = 0.5$ $\alpha_y = K_{qh}^* = 1$ | A | 2.9 | 5.89 | 4.3 |
| 7 | $\alpha_w = 0$ $\alpha_y = K_{qh}^* = 1$ | B | 3.05 | 6.28 | 4.5 |

Tabelul 4.3.1.2. Continuare.

| Nr. crt. | Indicatori de calitate | | | | | |
|----------|------------------------|----------------|-------------|-------------|----------------|-------------|
| | t_w [sec] | σ_1 [%] | t_1 [sec] | t_n [sec] | σ_2 [%] | t_r [sec] |
| 1 | - | - | - | - | - | 19.3 |
| 2 | - | - | - | - | - | 17.45 |
| 3 | - | - | - | - | - | 27.05 |
| 4 | - | - | - | - | - | 20.6 |
| 5 | - | - | - | - | - | 26.95 |
| 6 | 16.55 | 8.06 | 11.85 | - | - | 24.25 |
| 7 | 17.8 | 27.83 | 14.7 | 37 | 10.06 | 52.5 |

Tabelul 4.3.1.3. Performanțele SRA cu RG-F-PI-II cu modificarea valorii parametrului B_s în funcție de valoarea actuală a erorii de reglare definite în răspunsul indicial în raport cu w .

| Nr. crt. | Parametri PC | Tip de răspuns | Indicatori de calitate | | |
|----------|--|----------------|------------------------|-------------------|-------------|
| | | | $t_{,1}$ [sec] | $\sigma_{,1}$ [%] | t_o [sec] |
| 1 | $\alpha_y = K_{qh}^* = \alpha_w = 1$ | A | 1.35 | 11.68 | 2.9 |
| 2 | $\alpha_y = 1.25$ $K_{qh}^* = \alpha_w = 1$ | B | 1.32 | 14.47 | 3 |
| 3 | $\alpha_y = 0.75$ $K_{qh}^* = \alpha_w = 1$ | A | 1.85 | 11.98 | 2.7 |
| 4 | $K_{qh}^* = 1.25$ $\alpha_y = \alpha_w = 1$ | B | 1.8 | 15.37 | 3.1 |
| 5 | $K_{qh}^* = 0.75$ $\alpha_y = \alpha_w = 1$ | C | 1.05 | 9.51 | 2.25 |
| 6 | $\alpha_w = 0.5$ $\alpha_y = K_{qh}^* = 1$ | A | 1.38 | 10.72 | 2.75 |
| 7 | $\alpha_w = 0$ $\alpha_y = K_{qh}^* = 1$ | B | 1.47 | 11.96 | 3.2 |

Tabelul 4.3.1.3. Continuare.

| Nr. crt. | Indicatori de calitate | | | | | |
|----------|------------------------|----------------|-------------|-------------|----------------|-------------|
| | t_m [sec] | σ_1 [%] | t_1 [sec] | t_m [sec] | σ_2 [%] | t_r [sec] |
| 1 | 14.65 | 7.06 | 12 | - | - | 22.3 |
| 2 | 11 | 10.75 | 8.5 | 16 | 4.88 | 23.65 |
| 3 | 17.2 | 8.64 | 14.6 | - | - | 25.3 |
| 4 | 12.2 | 11.04 | 7.95 | 20.4 | 3.74 | 38.05 |
| 5 | - | - | - | - | - | 17.85 |
| 6 | 9.9 | 22.01 | 7.7 | - | - | 25.3 |
| 7 | 14.6 | 34.54 | 7.9 | 29.2 | 17.56 | 58.57 |

Performanțele celor două SRA definite în răspunsul indicial în raport cu perturbația sunt următoarele:

a) pentru cazul RG-F-PI-IE cu modificarea valorii parametrului B_s în funcție de c_1 : răspuns de tip

a, $t_M^y = 5.6$ sec, $\sigma_1^y = 45.72$ %, $t_r^y = 28.7$ sec;

b) pentru cazul RG-F-PI-II cu modificarea valorii parametrului B_e în funcție de e_k : răspuns de tip a, $t_M^y = 5.1$ sec, $\sigma_1^y = 44.52$ %, $t_r^y = 33.35$ sec.

Se observa ca RG-F-PI-IE cu modificarea valorii parametrului B_e în funcție de valoarea actuala a erorii de reglare asigura în ansamblu un comportament al SRA:

- mai bun față de RG-F-PI-II cu modificarea valorii parametrului B_e în funcție de valoarea actuala a erorii de reglare;
- la același nivel cu situația celei de-a doua variante de RG cu acordare fuzzy a parametrilor unui ARN în varianta cvasi-continuala bazat pe urmărirea unui MM de referință al PC în funcție de valoarea actuala a erorii de reglare și de valoarea actuala a incrementului erorii de reglare.

4.3.2. Structura de regulator cu acordare fuzzy a coeficientului de transfer al unui regulator fuzzy de tip cvasi-PI în varianta standard în funcție de valoarea actuala a erorii de reglare

Și în acest caz dependent de locul de plasare a componentei integrale se disting două variante deja cunoscute. Structurile propuse se deosebesc de cele din paragraful 4.3.1 prin faptul ca de aceasta data se (re)acordează coeficientul de transfer k_R al RG. Cele două structuri de reglare de acest tip cu schemele bloc din fig.4.3.2.1 și 4.3.2.2 vor fi prezentate în paralel; ele sunt cunoscute în literatura - după cum s-a menționat deja în acest capitol - sub numele de "fuzzy gain scheduling" (de exemplu, (Zhao ș.a., 1993)) și vor fi numite în cele ce urmează RG-F-PI standard cu acordare fuzzy a parametrului k_R în funcție de valoarea actuala a erorii de reglare.

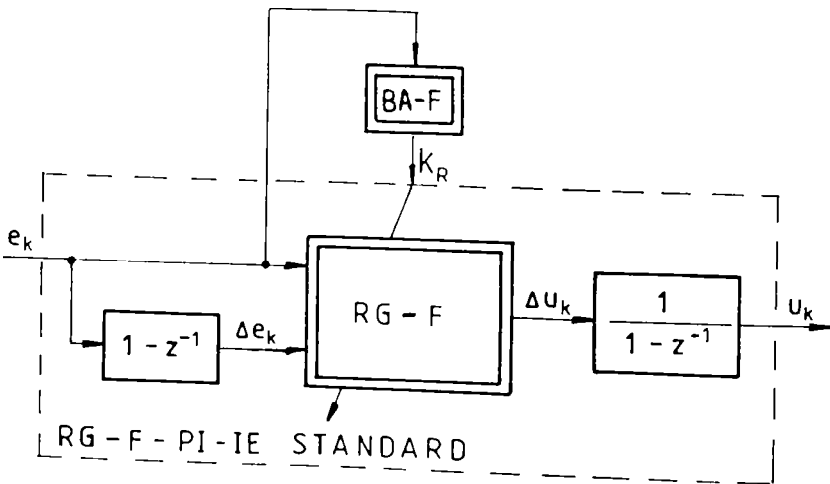


Fig.4.3.2.1. Schema bloc informațională aferentă RG-F-PI-IE standard cu acordare fuzzy a parametrului k_R în funcție de valoarea actuala a erorii de reglare.

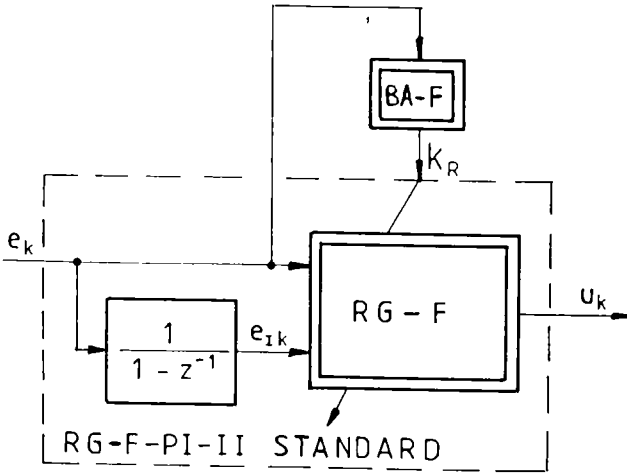


Fig.4.3.2.2. Schema bloc informațională aferentă RG-F-PI-II standard cu acordare fuzzy a parametrului k_R în funcție de valoarea actuală a erorii de reglare.

Blocul de acordare fuzzy BA-F de la nivelul ierarhic superior realizează prin intermediul lui k_R (a se vedea paragraful 3.2) acordarea fuzzy a tuturor parametrilor specifici RG-F-PI standard, și anume:

- pentru cazul RG-F-PI-IE în varianta standard: $\{B_e, B_{\Delta e}, B_{\Delta u}\}$;
- pentru cazul RG-F-PI-II în varianta standard: $\{B_e, B_{e1}, B_u\}$.

Pentru simplificarea prezentării (reducerea volumului de calcule), se consideră că blocul de acordare fuzzy admite o singură intrare (eroarea de reglare e_k); prin urmare, BA-F este similar blocului cu același nume discutat în paragraful 4.3.1.

Tabelul 4.3.2.1. Tabelul de decizie aferent BA-F din cadrul RG-F-PI standard cu acordare fuzzy a parametrului k_R în funcție de e_k .

| | | | | | | | |
|-------|----|----|----|----|----|----|----|
| e_k | NB | NM | NS | ZE | PS | PM | PB |
| k_R | PM | PB | PM | PS | PM | PB | PM |

Tabelul de decizie (dedicat conducerii SFN) aferent blocului BA-F este prezentat în tabelul 4.3.2.1.

Observație: Extinderea regulatorului prin introducerea unei

a doua intrări (incrementul erorii de reglare Δe_k) pentru blocul BA-F nu ridică probleme deosebite în faza de

dezvoltare (a se vedea paragrafele 4.2.1 și 4.2.3).

Parametrii de acordare specifici reguletoarelor astfel constituite sunt:

- pentru nivelul ierarhic superior: B_e^{AF} (corespunzător funcțiilor de apartenență aferente termenilor lingvistici ai intrării de tip triunghiular conform fig.3.7.2), B_{kR}^{PS} , B_{kR}^{PM} , B_{kR}^{PB} (corespunzatori funcțiilor de apartenență aferente termenilor lingvistici ai ieșirii de tip singleton conform fig.4.2.1.2);
- pentru nivelul ierarhic inferior (RG-F-PI standard):
 - pentru cazul RG-F-PI-IE: $\{B_e, B_{\Delta e}, B_{\Delta u}\}$,
 - pentru cazul RG-F-PI-II: $\{B_e, B_{e_i}, B_u\}$ (a se vedea fig.3.2.2 și fig.3.2.3).

Dezvoltarea variantelor propuse de RG-F-PI se desfășoară astfel:

- se determina constanta de timp de integrare T_i aferenta RG-PI convențional prin una din metodele clasice de proiectare algoritmică prezentate în capitolul II;
- se impune valoarea perioadei de eșantionare T_e și se calculează conform paragrafului 3.2 parametrii α respectiv α^* aferenți ARN-PI;
- se aleg parametrii (cu valori strict pozitive) $\{B_e, B_e^{AF}, B_{kR}^{PS}, B_{kR}^{PM}, B_{kR}^{PB}\}$ (cei alți parametri, adică $\{K_p, K_i, B_{\Delta e}, B_{\Delta u}\}$ în cazul RG-F-PI-IE respectiv $\{K_p^*, K_i^*, B_{e_i}, B_u\}$ în cazul RG-F-PI-II se calculează on-line după formulele din paragraful 3.2).

După cunoștințele autorului, cele două variante de RG-F-PI standard cu acordare fuzzy a parametrului k_R în funcție de e_k sunt originale; a fost publicată anterior în (Precup, 1995a) și (Precup, 1995b) doar varianta de RG-F-PI-IE. Originalitatea rezidă în flexibilitatea mare de a modifica formele tuturor funcțiilor de apartenență aferente termenilor lingvistici ai intrării și ieșirii, deși numărul de parametri este relativ mic.

Dezvoltarea celor două variante de reguletoare propuse cu acordare fuzzy a coeficientului de transfer al unui RG-F-PI standard în funcție de valoarea actuală a erorii de reglare pentru studiul de caz acceptat conduce la următoarele rezultate:

$$T_i = 6.8 \text{ sec}, T_e = 0.05 \text{ sec}; \quad (4.3.2.1)$$

$$\alpha = 0.0074, \alpha^* = 135.5, B_e = 0.5; \quad (4.3.2.2)$$

a) pentru cazul RG-F-PI-IE cu acordare fuzzy a parametrului k_R :

$$B_e^{AF} = 0.5, B_{kR}^{PS} = 1.1, B_{kR}^{PM} = 1.5, B_{kR}^{PB} = 3; \quad (4.3.2.3)$$

b) în cazul RG-F-PI-II cu acordare fuzzy a parametrului k_R :

$$B_e^{AF} = 0.5, B_{kR}^{PS} = 0.8, B_{kR}^{PM} = 1, B_{kR}^{PB} = 1.25. \quad (4.3.2.4)$$

Rezultatele de simulare numerică a comportării în raport cu referința a celor două SRA sunt ilustrate în tabelele 4.3.2.2 și 4.3.2.3.

Tabelul 4.3.2.2. Performanțele SRA cu RG-F-PI-IE cu acordare fuzzy a parametrului k_R în funcție de valoarea actuala a erorii de reglare definite în răspunsul indicial în raport cu w .

| Nr. crt. | Parametri PC | Tip de răspuns | Indicatori de calitate | | |
|----------|--|----------------|------------------------|-------------------|-------------|
| | | | $t_{.1}$ [sec] | $\sigma_{.1}$ [%] | t_o [sec] |
| 1 | $\alpha_y = K_{qh}^* = \alpha_w = 1$ | C | 2.78 | 7.57 | 3.85 |
| 2 | $\alpha_y = 1.25$ $K_{qh}^* = \alpha_w = 1$ | B | 2.62 | 7.51 | 3.8 |
| 3 | $\alpha_y = 0.75$ $K_{qh}^* = \alpha_w = 1$ | A | 3.2 | 7.48 | 4.1 |
| 4 | $K_{qh}^* = 1.25$ $\alpha_y = \alpha_w = 1$ | B | 3.15 | 11.52 | 4.4 |
| 5 | $K_{qh}^* = 0.75$ $\alpha_y = \alpha_w = 1$ | C | 2 | 4.66 | 2.85 |
| 6 | $\alpha_w = 0.5$ $\alpha_y = K_{qh}^* = 1$ | B | 3.15 | 11.92 | 4.15 |
| 7 | $\alpha_w = 0$ $\alpha_y = K_{qh}^* = 1$ | B | 3.68 | 15.41 | 4.9 |

Tabelul 4.3.2.2. Continuare.

| Nr. crt. | Indicatori de calitate | | | | | |
|----------|------------------------|----------------|-------------|-------------|----------------|-------------|
| | t_n [sec] | σ_1 [%] | t_1 [sec] | t_m [sec] | σ_2 [%] | t_r [sec] |
| 1 | - | - | - | - | - | 17.4 |
| 2 | 9.65 | 10.68 | 7.2 | 16.75 | 2.23 | 18.9 |
| 3 | 15.5 | 12.21 | 9.45 | - | - | 30.95 |
| 4 | 13.95 | 14.27 | 9.8 | 24.9 | 2.88 | 29.75 |
| 5 | - | - | - | - | - | 23.6 |
| 6 | 14.8 | 22.08 | 9.7 | 29.05 | 4.85 | 34.65 |
| 7 | 15.3 | 43.65 | 11.2 | 28.35 | 20.25 | 78.2 |

Tabelul 4.3.2.3. Performanțele SRA cu RG-F-PI-II cu acordare fuzzy a parametrului k_R în funcție de valoarea actuală a erorii de reglare definite în răspunsul indicial în raport cu w .

| Nr. crt. | Parametri PC | Tip de răspuns | Indicatori de calitate | | |
|----------|--|----------------|------------------------|-------------------|-------------|
| | | | $t_{,1}$ [sec] | $\sigma_{,1}$ [%] | t_0 [sec] |
| 1 | $\alpha_y = K_{qh}^* = \alpha_w = 1$ | C | 1.29 | 8.01 | 2.85 |
| 2 | $\alpha_y = 1.25$ $K_{qh}^* = \alpha_w = 1$ | B | 1.27 | 9.77 | 2.85 |
| 3 | $\alpha_y = 0.75$ $K_{qh}^* = \alpha_w = 1$ | D | 1.75 | 10.49 | 2.85 |
| 4 | $K_{qh}^* = 1.25$ $\alpha_y = \alpha_w = 1$ | C | 1.73 | 13.54 | 3.2 |
| 5 | $K_{qh}^* = 0.75$ $\alpha_y = \alpha_w = 1$ | D | 1.05 | 8.38 | 2.2 |
| 6 | $\alpha_w = 0.5$ $\alpha_y = K_{qh}^* = 1$ | A | 1.35 | 11.19 | 2.75 |
| 7 | $\alpha_w = 0$ $\alpha_y = K_{qh}^* = 1$ | B | 1.43 | 12.59 | 3.15 |

Tabelul 4.3.2.3. Continuare.

| Nr. crt. | Indicatori de calitate | | | | | |
|----------|------------------------|----------------|-------------|-------------|----------------|-------------|
| | t_w [sec] | σ_1 [%] | t_1 [sec] | t_m [sec] | σ_2 [%] | t_r [sec] |
| 1 | - | - | - | - | - | 16.35 |
| 2 | 10.55 | 11.08 | 8 | 15.6 | 5.13 | 21.65 |
| 3 | - | - | - | 20.4 | 3.39 | 30.85 |
| 4 | 13.9 | 14.04 | 10.8 | 21.65 | 5.37 | 32.2 |
| 5 | - | - | - | - | - | 31.1 |
| 6 | 12.9 | 18.22 | 8.3 | - | - | 34.8 |
| 7 | 14.75 | 41.56 | 7.6 | 29.6 | 18.08 | 62.15 |

Referitor la răspunsul indicial în raport cu perturbația al celor două SRA se obțin rezultatele:

a) pentru cazul RG-F-PI-IE cu acordare fuzzy a parametrului k_R în funcție de e_t : răspuns de tip a,

$t_M^y = 5.35 \text{ sec}$, $\sigma_1^y = 46.5 \%$, $t_r^y = 21.6 \text{ sec}$;

b) pentru cazul RG-F-PI-II cu acordare fuzzy a parametrului k_R în funcție de e_r : raspuns de tip a,
 $t_M^y = 5.15 \text{ sec}$, $\sigma_1^y = 45.11 \%$, $t_r^y = 27.55 \text{ sec}$.

Se observa ca structurile de RG-F-PI cu acordare fuzzy a coeficientului de transfer în funcție de valoarea actuala a erorii de reglare asigura sistemului de reglare automata performanțe mai bune în raport cu modificarile referinței și perturbației și mai puțin bune în raport cu modificarile parametrilor procesului condus în comparație cu RG-F-PI cu modificarea valorii parametrului B_R în funcție de valoarea actuala a erorii de reglare.

4.4. Concluzii

În cadrul capitolului au fost dezvoltate urmatoarele opt variante de structuri de regatoare cu acordare fuzzy a parametrilor unor regatoare convenționale și fuzzy:

- regulatorul cu acordare fuzzy a parametrilor unui ARN-PI în varianta cvasicontinuala incrementală în funcție de valoarea actuala a erorii de reglare și de valoarea actuala a incrementului erorii de reglare (paragraful 4.2.1);
- regulatorul cu acordare fuzzy a parametrilor unui ARN-PI în varianta cvasicontinuala incrementală în funcție de parametrii primari ai PC (paragraful 4.2.2);
- doua variante de regatoare cu acordare fuzzy a parametrilor unui ARN în varianta cvasicontinuala bazat pe urmarirea unui MM de referința al PC în funcție de valoarea actuala a erorii de reglare și de valoarea actuala a incrementului erorii de reglare (paragraful 4.2.3):
 - regulatorul cu acordare fuzzy a doi parametri (q_0 și q_1) ai unui ARN în varianta cvasicontinuala bazat pe urmarirea unui MM de referința al PC în funcție de valoarea actuala a erorii de reglare și de valoarea actuala a incrementului erorii de reglare,
 - regulatorul cu acordare fuzzy a parametrilor unui ARN-PI în varianta cvasicontinuala incrementală în funcție de valoarea actuala a erorii de reglare și de valoarea actuala a incrementului erorii de reglare și filtrare a comenzii;
- regulatorul cu acordare fuzzy a formelor funcțiilor de apartenența aferente termenilor lingvistici ai intrarilor și ieșirii unui RG-F-PI-IE standard în funcție de valoarea actuala a erorii de reglare (paragraful 4.3.1);
- regulatorul cu acordare fuzzy a formelor funcțiilor de apartenența aferente termenilor lingvistici ai intrarilor și ieșirii unui RG-F-PI-II standard în funcție de valoarea actuala a erorii de reglare (paragraful 4.3.1);
- regulatorul cu acordare fuzzy a coeficientului de transfer al unui RG-F-PI-IE standard în funcție de valoarea actuala a erorii de reglare (paragraful 4.3.2);
- regulatorul cu acordare fuzzy a coeficientului de transfer al unui RG-F-PI-II standard în funcție

de valoarea actuala a erorii de reglare (paragraful 4.3.2).

Studiul efectuat privind dezvoltarea reguletoarelor menționate și rezultatele obținute au scos în evidență următoarele aspecte:

1) Datorită prezenței componente I în structura reguletoarelor, toate variantele de reguletoare cu acordare fuzzy a parametrilor (adaptive) propuse conduc la SRA astatice.

2) Performanțele realizate de SRA cu reguletoarele cu acordare fuzzy a parametrilor dezvoltate în cadrul acestui capitol pot fi analizate comparativ între ele și cu performanțele realizate de SRA cu reguletoarele dezvoltate în capitolele II și III. Pentru aceasta, în fig.4.4.1 se prezintă sintetic principalii indicatori de calitate empirici realizați de SRA.

Notațiile utilizate în fig.4.4.1 se refera la variantele dezvoltate de RG cu acordare fuzzy a parametrilor și au următoarea semnificație:

- △ - reguletorul cu acordare fuzzy a parametrilor unui ARN-PI în varianta cvasicontinuala incrementală în funcție de valoarea actuala a erorii de reglare și de valoarea actuala a incrementului erorii de reglare;
- ◇ - reguletorul cu acordare fuzzy a parametrilor unui ARN-PI în varianta cvasicontinuala incrementală în funcție de parametrii primari ai PC;
- ▽ - reguletorul cu acordare fuzzy a doi parametri ai unui ARN în varianta cvasicontinuala bazat pe urmărirea unui MM de referință al PC în funcție de valoarea actuala a erorii de reglare și de valoarea actuala a incrementului erorii de reglare;
- - reguletorul cu acordare fuzzy a parametrilor unui ARN-PI în varianta cvasicontinuala incrementală în funcție de valoarea actuala a erorii de reglare și de valoarea actuala a incrementului erorii de reglare și filtrare a comenzii;
- - reguletorul cu acordare fuzzy a formelor funcțiilor de apartenență aferente termenilor lingvistici ai intrărilor și ieșirii unui RG-F-PI-IE standard în funcție de valoarea actuala a erorii de reglare;
- × - reguletorul cu acordare fuzzy a formelor funcțiilor de apartenență aferente termenilor lingvistici ai intrărilor și ieșirii unui RG-F-PI-II standard în funcție de valoarea actuala a erorii de reglare;
- ⊗ - reguletorul cu acordare fuzzy a coeficientului de transfer al unui RG-F-PI-IE standard în funcție de valoarea actuala a erorii de reglare;
- - reguletorul cu acordare fuzzy a coeficientului de transfer al unui RG-F-PI-II standard în funcție de valoarea actuala a erorii de reglare.

Cu linie interrupta s-au marcat în fig.4.4.1 domeniile de valori în care se încadrează principalii indicatori de calitate empirici realizați de SRA cu RG convenționale și de SRA cu RG-F (fără acordare fuzzy a parametrilor).

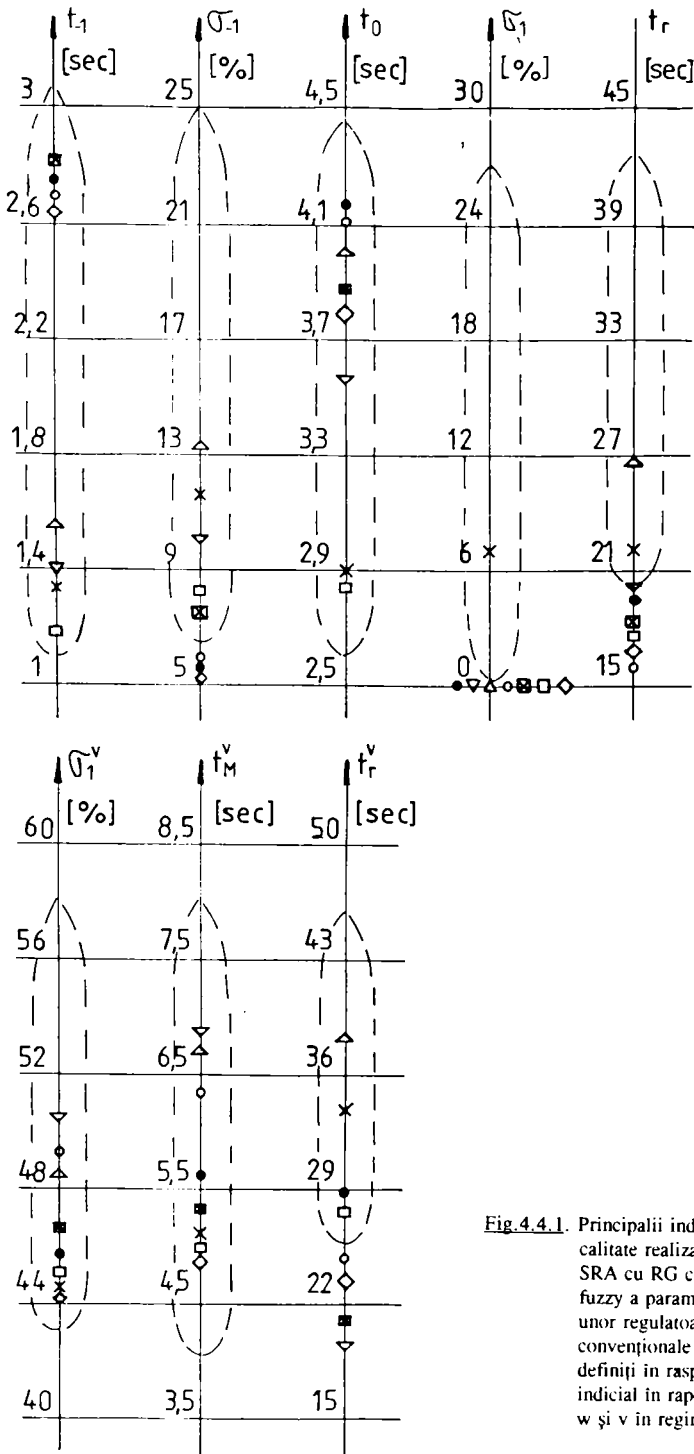


Fig. 4.4.1. Principali indicatori de calitate realizați de SRA cu RG cu acordare fuzzy a parametrilor unor reglatoare convenționale și fuzzy definiți în răspuns indicial în raport cu w și v în regim "nominal".

Comparând indicatorii de calitate ilustrați în fig.4.4.1 se poate construi tabelul 4.4.1 referitor la recomandări privind ordinea preferențială de alegere a reguletoarelor cu acordare fuzzy a parametrilor unor RG convenționale și a parametrilor unor RG-F din punct de vedere al realizării celei mai bune valori a unui anumit indicator de calitate (conform celor acceptate în paragraful 2.1).

Tabelul 4.4.1. Ordinea de alegere a RG cu acordare fuzzy a parametrilor unor reguletoare convenționale și fuzzy pe baza indicatorilor de calitate empirici realizați de SRA în regim "nominal".

| Varianta de RG | Ordine alegere indicator de calitate | | | | | | | | |
|----------------------|--------------------------------------|-------|-------|------------|-------|--------------|---------|---------|--|
| | σ_1 | t_1 | t_c | σ_1 | t_r | σ_1^v | t_m^v | t_r^v | |
| Δ | 4 | 8 | 6 | 1-7 | 8 | 6 | 7 | 8 | |
| \diamond | 5 | 1 | 4 | 1-7 | 2 | 1 | 1 | 3 | |
| ∇ | 3 | 6 | 3 | 1-7 | 6 | 8 | 8 | 1 | |
| \circ | 6 | 3 | 7 | 1-7 | 1 | 7 | 6 | 4 | |
| \bullet | 7 | 2 | 8 | 1-7 | 5 | 4 | 5 | 6 | |
| \times | 2 | 7 | 2 | 8 | 7 | 2 | 3 | 7 | |
| \boxtimes | 8 | 4 | 5 | 1-7 | 4 | 5 | 4 | 2 | |
| \square | 1 | 5 | 1 | 1-7 | 3 | 3 | 2 | 5 | |

Pe baza datelor cuprinse în fig.4.4.1, tabelul 4.4.1 și paragrafele 4.2 și 4.3 se pot evidenția următoarele aspecte:

- toate variantele de SRA cu reguletoare cu acordare fuzzy a parametrilor unor reguletoare convenționale și fuzzy realizează un comportament mai bun în comparație cu cel realizat de SRA cu RG-F (fără acordare fuzzy a parametrilor) și cu SRA cu RG proiectate algoritmic prin metode clasice;
- "cel mai bun" comportament îl realizează:
 - în raport cu referința: SRA cu RG cu acordare fuzzy a coeficientului de transfer al unui RG-F-PI-IE standard în funcție de e_t (\ominus), urmat de SRA cu RG cu acordare fuzzy a parametrilor unui ARN-PI în varianta cvasicontinuala incrementală în funcție de parametrii primari ai PC (\odot) și de SRA cu RG cu acordare fuzzy a doi parametri ai ARN în varianta cvasicontinuala bazat pe urmărirea unui MM de referință al PC în funcție de $\{e_t, \Delta e_t\}$ (\heartsuit);
 - în raport cu perturbajul: SRA cu RG cu acordare fuzzy a parametrilor unui ARN-PI în varianta cvasicontinuala incrementală în funcție de parametrii primari ai PC (\odot), urmat de

SRA cu RG cu acordare fuzzy a doi parametri ai ARN în varianta cvasicontinuala bazat pe urmărirea unui MM de referință al PC în funcție de $\{e_k, \Delta e_k\}$ (\heartsuit) și de SRA cu RG cu acordare fuzzy a coeficientului de transfer al unui RG-F-PI-IE standard în funcție de e_k (\heartsuit);

- în raport cu modificările parametrilor PC: SRA cu RG cu acordare fuzzy a parametrilor unui ARN în varianta cvasicontinuala incrementală în funcție de parametrii primari ai PC (\diamond), urmat de SRA cu RG cu acordare fuzzy a formei funcțiilor de apartenență aferente termenilor lingvistici ai intrărilor și ieșirii unui RG-F-PI-IE standard în funcție de e_k (\bullet) și de SRA cu RG cu acordare fuzzy a coeficientului de transfer al unui RG-F-PI-IE standard în funcție de e_k (\heartsuit).

3) După cunoștințele autorului, în cadrul variantelor de reglatoare cu acordare fuzzy a parametrilor dezvoltate în acest capitol sunt în întregime originale următoarele cinci:

- regulatorul cu acordare fuzzy a parametrilor unui ARN-PI în varianta cvasicontinuala incrementală în funcție de parametrii primari ai PC,
- regulatorul cu acordare fuzzy a doi parametri ai unui ARN în varianta cvasicontinuala bazat pe urmărirea unui MM de referință al PC în funcție de valoarea actuală a erorii de reglare și de valoarea actuală a incrementului erorii de reglare,
- regulatorul cu acordare fuzzy a parametrilor unui ARN-PI în varianta cvasicontinuala incrementală în funcție de valoarea actuală a erorii de reglare și de valoarea actuală a incrementului erorii de reglare și filtrare a comenzii,
- regulatorul cu acordare fuzzy a coeficientului de transfer al unui RG-F-PI-IE standard în funcție de valoarea actuală a erorii de reglare,
- regulatorul cu acordare fuzzy a coeficientului de transfer al unui RG-F-PI-II standard în funcție de valoarea actuală a erorii de reglare.

Celelalte trei variante de reglatoare dezvoltate, adică:

- regulatorul cu acordare fuzzy a parametrilor unui ARN-PI în varianta cvasicontinuala incrementală în funcție de valoarea actuală a erorii de reglare și de valoarea actuală a incrementului erorii de reglare,
- regulatorul cu acordare fuzzy a formelor funcțiilor de apartenență aferente termenilor lingvistici ai intrărilor și ieșirii unui RG-F-PI-IE standard în funcție de valoarea actuală a erorii de reglare,
- regulatorul cu acordare fuzzy a formelor funcțiilor de apartenență aferente termenilor lingvistici ai intrărilor și ieșirii unui RG-F-PI-II standard în funcție de valoarea actuală a erorii de reglare,

sunt parțial originale în sensul că au fost dezvoltate prin preluarea unor principii din literatura de specialitate referitoare la conducerea sistemelor cu fază minimă și adaptate la specificul conducerii sistemelor cu fază neminimă.

Ca și în situațiile anterioare, trebuie menționat însă faptul ca, datorita comportamentului specific SFN, aceasta adaptare nu este imediata.

4) În cazul SRA cu RG cu acordare fuzzy a parametrilor unor regulatoare convenționale și fuzzy problema analizei și verificării stabilității se pune și mai accentuat în comparație cu situația SRA cu RG fara acordare fuzzy a parametrilor (de tipul celor prezentate în capitolul III) deoarece în condițiile conducerii unui SFN procesul de adaptare fuzzy poate conduce la puternice tendințe de evoluție spre instabilitate.

La alegerea parametrilor oricarei variante de regulator, pe lângă experiența proiectantului sau a unui expert, trebuie să se țină seama de condiția de asigurare în primul rând a stabilității SRA. Acești parametri sunt:

- pentru cazul RG cu acordare fuzzy a parametrilor unui ARN-PI în varianta cvasicontinuala incrementală în funcție de valoarea actuală a erorii de reglare și de valoarea actuală a incrementului erorii de reglare: $B_e^P, B_e^I, B_{KP}^{PS}, B_{KP}^{PM}, B_{KP}^{PB}, B_{KI}^{PS}, B_{KI}^{PM}, B_{KI}^{PB}$;
- pentru cazul RG cu acordare fuzzy a parametrilor unui ARN-PI în varianta cvasicontinuala incrementală în funcție de parametrii primari ai PC: $B_{\alpha}, B_K, B_{\omega}, B_{KP}^{PVS}, B_{KP}^{PS}, B_{KP}^{PM}, B_{KP}^{PB}, B_{KI}^{PVS}, B_{KI}^{PS}, B_{KI}^{PM}, B_{KI}^{PB}, B_{KI}^{PVB}$;
- pentru cazul RG cu acordare fuzzy a doi parametri ai unui ARN în varianta cvasicontinuala bazat pe urmărirea unui MM de referință al PC în funcție de valoarea actuală a erorii de reglare și de valoarea actuală a incrementului erorii de reglare: $B_e^O, B_e^I, B_{q0}^{PS}, B_{q0}^{PM}, B_{q0}^{PB}, B_{q1}^{PS}, B_{q1}^{PM}, B_{q1}^{PB}$;
- pentru cazul RG cu acordare fuzzy a parametrilor unui ARN-PI în varianta cvasicontinuala incrementală în funcție de valoarea actuală a erorii de reglare și de valoarea actuală a incrementului erorii de reglare și filtrare a comenzii: $B_e^P, B_e^I, B_{KP}^{PS}, B_{KP}^{PM}, B_{KP}^{PB}, B_{KI}^{PS}, B_{KI}^{PM}, B_{KI}^{PB}$;
- pentru cazurile ambelor variante de RG cu acordare fuzzy a formelor funcțiilor de apartenență aferente termenilor lingvistici ai intrărilor și ieșirii unui RG-F-PI standard în funcție de valoarea actuală a erorii de reglare: $B_e^{AF}, B_{Be}^{PS}, B_{Be}^{PM}, B_{Be}^{PB}$;
- pentru cazurile ambelor variante de RG cu acordare fuzzy a coeficientului de transfer al unui RG-F-PI standard în funcție de valoarea actuală a erorii de reglare: $B_e, B_e^{AF}, B_{KR}^{PS}, B_{KR}^{PM}, B_{KR}^{PB}$.

5) Fara a face un studiu dedicat problematicii volumului de calcule necesar la implementarea reguletoarelor fuzzy dezvoltate în acest capitol, respectiv timpului de calcul din cadrul algoritmilor de reglare numerica aferenți, pe baza programelor de simulare care au utilizat reguletoarele dezvoltate (a se vedea și anexa) se constata totuși creșterea sensibilă a volumului de calcule mergând chiar până la o dublare a acestui timp de calcul, care aduce după sine necesitatea utilizării unor echipamente numerice performante în faza de implementare a acestor reguletoare (Surmann ș.a., 1994).

Cap. V. DOUĂ PROCEDEE DE VERIFICARE A STABILITĂȚII SISTEMELOR DE REGLARE AUTOMATĂ CU REGULATOARE FUZZY

5.1. Considerații generale

Asigurarea stabilității sistemelor de reglare fuzzy (SRA cu RG-F) a proceselor cu faza neminimă este o problemă dificilă din cel puțin două motive:

- neliniaritatea regulatorului fuzzy,
- caracterul de sistem cu faza neminimă al procesului condus.

Studiul stabilității SRA cu RG-F dezvoltate în capitolele III și IV devine necesar deoarece numai în acest mod se pot furniza informațiile necesare proiectantului - sub forma unor margini pentru valorile parametrilor liberi ai RG-F - de care sa se țina seama atunci când acesta selectează conform experienței proprii (sau a unui expert) valorile parametrilor liberi ai RG-F. Pe de altă parte, doar un SRA stabil reduce riscul în faza de implementare a RG-F.

Literatura recomandă diferite metode de analiză și verificare a stabilității SRA cu RG-F, dezvoltate în domeniul timp sau în domeniul frecvență (Bretthauer și Opitz, 1994). În cadrul acestor metode cele mai cunoscute și mai frecvent utilizate sunt bazate pe:

- abordări în spațiul starilor (Garcia-Cerezo și Ollero, 1992), (Kang, 1993);
- teoria stabilității în sens Lyapunov (Böhm și Krebs, 1993), (Kiendl și Rüger, 1993), (Scheel, 1995);
- teoria hiperstabilității după Popov (Opitz, 1993), (Böhm și Bosch, 1995);
- teoria bifurcațiilor (statică, Hopf ș.a.) (Driankov ș.a., 1993);
- teoria grafurilor (Driankov ș.a., 1993);
- metoda balansului armonic (Kiendl, 1993), (Boll ș.a., 1994);
- criteriul cercului (Aracil ș.a., 1989).

Toate aceste abordări au apărut ca necesare întrucât analiza stabilității într-o manieră matematică bazată pe lingvistica fuzzy este extrem de dificilă.

Ținând seama de specificul caracterizării regulatorilor dezvoltate în capitolele III și IV, în acest capitol se prezintă două procedee de verificare a stabilității SRA cu RG-F-PI (cu integrare pe ieșire sau pe intrare) bazate pe utilizarea teoriei hiperstabilității (după Popov).

RG-F este un regulator discret și apare natural ca și procesul condus (extins cu elementul de reținere) să fie caracterizat prin modele matematice cu timp discret. În acest sens, în dezvoltările ulterioare pentru PC (extins cu elementul de reținere) se va utiliza un model matematic intrare-stare-ieșire (MM-ISI) cu timp discret. În același timp, PC este acceptat ca local (în jurul unui p.d.f.s.c.) liniar, în conformitate cu aspectele menționate în capitolul I.

Este de remarcat faptul că principial PC ar putea fi caracterizat și printr-un MM-ISI cu timp continuu și cu elementul de reținere corespunzător aproximativ; cum în cazul unei conduceri cvasicontinue perioada

de eșantionare are valoare mică, aceasta aproximare este frecvent utilizată.

Prezentările din cadrul capitoului de față se referă la:

- cele două procedee de verificare a stabilității sistemelor de reglare fuzzy a proceselor (în particular, cu faza neminimă) bazate pe utilizarea teoriei hiperstabilității și a unui MM-ISI cu timp discret aferent PC considerat local liniar;
- aplicarea celor două procedee la studiul de caz acceptat.

Ambele procedee oferă condiții suficiente - exprimate sub forma unor domenii ale valorilor parametrilor liberi ai reguletoarelor fuzzy - care garantează stabilitatea SRA cu RG-F.

5.2. Prezentarea a două procedee de verificare a stabilității sistemelor de reglare fuzzy a proceselor cu faza neminimă bazate pe utilizarea teoriei hiperstabilității și a unui model matematic intrare-stare-ieșire cu timp discret aferent procesului condus considerat local liniar

Teoria hiperstabilității, datorată lui V. M. Popov (Popov, 1973) și prezentată în literatură în numeroase lucrări (de exemplu, (Voicu, 1986)), se utilizează pentru analiza stabilității (eventual asimptotice) a unui sistem neliniar. Ca și în cazul SRA cu timp continuu, aplicarea teoriei hiperstabilității în studiul stabilității sistemelor cu timp discret necesită modificarea punerii problemei întrucât formal pentru partea liniară a sistemului numărul de intrări trebuie să fie egal cu numărul de ieșiri.

În acest context se pornește de la MM-ISI cu timp continuu aferent unui PC liniar de ordinul n :

$$\dot{\underline{x}}(t) = \underline{A}_{PC} \underline{x}(t) + \underline{b}_{PC} u(t), \quad (5.2.1)$$

$$y(t) = \underline{c}_{PC}^T \underline{x}(t), \quad (5.2.2)$$

în care: $u(t)$ - comanda; $y(t)$ - ieșirea reglata; $\underline{x}(t)$ - vectorul de stare cu dimensiunea $(n, 1)$; \underline{A}_{PC} , \underline{b}_{PC} , \underline{c}_{PC}^T - matrici cu dimensiunile următoare: $\dim \underline{A}_{PC} = (n, n)$, $\dim \underline{b}_{PC} = (n, 1)$, $\dim \underline{c}_{PC}^T = (1, n)$; T - indice superior utilizat pentru exprimarea transunerii unei matrici; t - variabila independentă timp.

Observație: Dacă s-ar lua în considerare și perturbația v , atunci în membrul drept al ecuațiilor de stare (5.2.1) ar apărea suplimentar termenul $\underline{b}_{PCv} v(t)$ ($\dim \underline{b}_{PCv} = (n, 1)$); acest lucru nu este însă esențial după (Opitz, 1993), deci termenul $\underline{b}_{PCv} v(t)$ se neglijează.

Sistemului cu faza neminimă studiat, de ordin $n = 2$ (a se vedea relația (2.1.1) și fig.2.1.1), i se poate atașa schema bloc informațională din fig.5.2.1; alegând variabilele de stare conform schemei, cuprinse în vectorul $\underline{x}(t)$:

$$\underline{x}(t) = [x_1(t) \quad x_2(t)]^T, \quad (5.2.3)$$

matricile din relațiile (5.2.1) și (5.2.2) vor avea expresiile:

$$\underline{A}_{PC} = \begin{bmatrix} -\alpha_3/T_3 & k_{PC} \\ 0 & -1/T_2 \end{bmatrix}, \quad \underline{b}_{PC} = \begin{bmatrix} -k_{PC} T_1/T_2/T_3 \\ (T_1 + T_2)/T_2^2 \end{bmatrix},$$

$$\underline{c}_{PC}^T = [1 \quad 0]^T, \quad (5.2.4)$$

Particularizând matricile din relația (5.2.4) pentru aplicația de reglare a turației unui hidrogenator,

rezulta:

$$\underline{A}_{PC} = \begin{bmatrix} -\alpha_w/T_m & \alpha_y/T_m \\ 0 & -2/K_{qh}^*/T_w \end{bmatrix}, \underline{b}_{PC} = \begin{bmatrix} -2 \alpha_y/T_m \\ 6/K_{qh}^*/T_w \end{bmatrix},$$

$$\underline{c}_{PC}^T = [1 \ 0]^T. \quad (5.2.5)$$

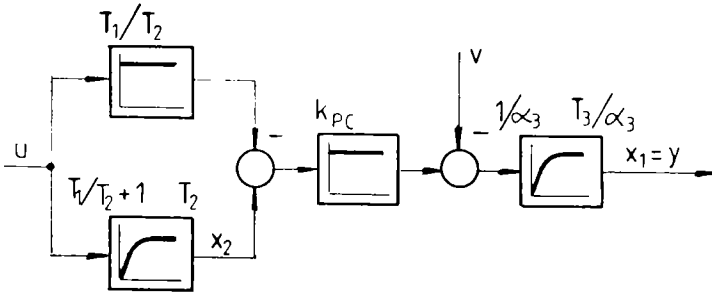


Fig.5.2.1. Schema bloc informațională aferentă PC.

Semnificația parametrilor din relațiile (5.2.4) și (5.2.5) este cunoscută (a se vedea capitolul I).

Discretizarea MM-ISI (5.2.1), (5.2.2) ca realizare invariantă la semnal treapta (se accepta existența unui element de reținere de tip extrapolator de ordinul zero) pentru o perioadă de eșantionare T_e conduce la MM-ISI cu timp discret aferent PC de forma:

$$\underline{x}_{k+1} = \underline{A}_d \underline{x}_k + \underline{b}_d u_k, \quad (5.2.6)$$

$$y_k = \underline{c}_{PC}^T \underline{x}_k, \quad (5.2.7)$$

unde marimile au semnificația anterior precizată, $\dim \underline{A}_d = (n, n)$, $\dim \underline{b}_d = (n, 1)$.

Expresiile matricilor \underline{A}_d și \underline{b}_d se pot explicita în forma:

- pentru SFN2-IZP în general:

$$\underline{A}_d = \begin{bmatrix} k_{PC} T_2 [\exp(-\alpha_3 T_e / T_3) - \exp(-T_e / T_2)] & \\ \exp(-\alpha_3 T_e / T_3) & \text{-----} \\ 0 & T_3 - \alpha_3 T_2 \\ & \exp(-T_e / T_2) \end{bmatrix}, \quad (5.2.8)$$

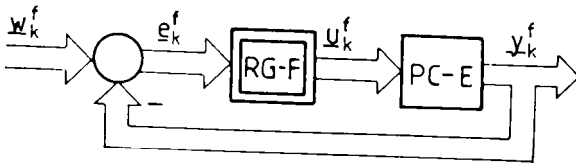
$$\underline{b}_d = \begin{bmatrix} k_{PC} (T_3 + \alpha_3 T_1) [1 - \exp(-\alpha_3 T_e / T_3)] - \alpha_3 k_{PC} [1 - \exp(-T_e / T_2)] & \\ \text{-----} & \\ & \alpha_3 (T_3 - \alpha_3 T_2) \\ & (T_1 + T_2) [1 - \exp(-T_e / T_2)] / T_2 \end{bmatrix};$$

- pentru reglarea turației unui hidrogenerator in particular:

$$\underline{A}_d = \begin{bmatrix} \alpha_\omega K_{qh} T_w [\exp(-\alpha_\omega T_e / T_m) - \exp(-2T_e / K_{qh} T_w)] & \\ \exp(-\alpha_\omega T_e / T_m) & \\ 0 & 2T_m - \alpha_\omega K_{qh} T_w \\ & \exp(-2T_e / K_{qh} T_w) \end{bmatrix}, \quad (5.2.9)$$

$$\underline{b}_d = \begin{bmatrix} 2\alpha_\gamma (T_m + \alpha_\omega K_{qh} T_w) [1 - \exp(-\alpha_\omega T_e / T_m)] - 3\alpha_\omega \alpha_\gamma K_{qh} T_w [1 - \exp(-2T_e / K_{qh} T_w)] & \\ & \\ & \alpha_\omega (2T_m - \alpha_\omega K_{qh} T_w) \\ & 3 [1 - \exp(-2T_e / K_{qh} T_w)] \end{bmatrix}.$$

În vederea efectuării analizei



stabilității sistemului de reglare automata cu RG-F cu dinamica, partea liniara ce caracterizeaza dinamica va fi transferata PC și, corespunzator, schema bloc informaționala va fi înlocuita la forma din fig.5.2.2.

Fig.5.2.2. Schema bloc informaționala aferenta unui sistem de reglare fuzzy.

Indicele superior $f \in \{II, IE\}$ care apare în fig.5.2.2 corespunde tipului de integrare utilizat la realizarea RG-F (a se vedea paragrafele 3.1 și 3.2): $f = II$ pentru integrare (introducerea dinamicii) pe intrarea RG-F; $f = IE$ pentru integrare (introducerea dinamicii) pe ieșirea RG-F; w_k^f reprezintă vectorul referinței și se particularizează după cum urmează:

$$w_k^{II} = [w_k \quad w_{ik}]^T, \quad w_k^{IE} = [w_k \quad \Delta w_k]^T = [w_k \quad w_k - w_{k-1}]^T, \quad (5.2.10)$$

în care: w_k - referința, w_{ik} - integrala referinței, Δw_k - incrementul referinței; e_k^f reprezintă vectorul erorii de reglare și se particularizează după cum urmează:

$$e_k^{II} = [e_k \quad e_{ik}]^T, \quad e_k^{IE} = [e_k \quad \Delta e_k]^T = [e_k \quad e_k - e_{k-1}]^T, \quad (5.2.11)$$

în care: e_k - eroarea de reglare, e_{ik} - integrala erorii de reglare, Δe_k - incrementul erorii de reglare; u_k^f și y_k^f reprezintă vectorul comenzii, respectiv vectorul ieșirii reglate (semnificația marimilor va fi detaliată pe parcursul prezentărilor); PC-E reprezintă procesul condus extins prin partea liniară a RG-F (cu dinamica regulatorului, adică partea de integrator).

Observație: În cadrul tezei nu au fost abordate și aspectele legate de efectul limitării comenzii; se menționează însă faptul că în cazul variantelor de RG-F-PI-II ele se tratează relativ ușor prin transferarea

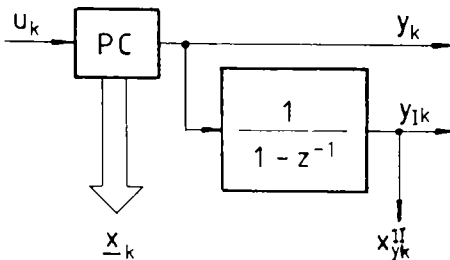
neliniarității de tip saturație (afereța EE) la RG-F propriu-zis (fara dinamica, așa cum RG-F apare pe schema bloc din fig.5.2.2).

Blocul RG-F, fig. 5.2.2, asigura o caracteristica statica (generalizata) neliniara descrisa de urmatoarea functie:

$$E: \mathbf{R}^2 \rightarrow \mathbf{R}^2, E(\mathbf{u}_k^f) = [F_1(\mathbf{u}_k^f) \quad 0]^T. \quad (5.2.12)$$

Pentru introducerea variabilelor de stare suplimentare aferente dinamicii reguletoarelor, modelul matematic aferent procesului condus extins (PC-E) se deduce dupa (Isermann, 1977).

a) Cazul in care integrarea se efectueaza pe intrarea RG-F. Schema bloc informationala aferenta



PC-E este prezentata in fig.5.2.3 și pune în evidența variabila de stare suplimentara x_k^{II} .

Vectorul ieșirii reglate poate fi exprimat sub urmatoarea forma:

$$y_k^{II} = [y_k \quad y_{1k}]^T, \quad (5.2.13)$$

in care y_k reprezinta ieșirea reglata și y_{1k} este integrala ieșirii reglate.

Fig.5.2.3. Schema bloc informationala aferenta PC-E în cazul integrării pe intrarea RG-F.

Ținând seama de faptul ca in teoria hiperstabilitații este necesar un numar egal de intrari și ieșiri, se introduce comanda fictiva u_n ; corespunzator, vectorul comenzii devine:

$$u_k^{II} = [u_k \quad u_n]^T. \quad (5.2.14)$$

În consecința, MM-ISI cu timp discret de ordinul $(n+1)$ al PC-E poate fi aranjat astfel:

$$x_{k+1}^{II} = A_d^{II} x_k^{II} + B_d^{II} u_k^{II}, \quad (5.2.15)$$

$$y_k^{II} = C_d^{II} x_k^{II}, \quad (5.2.16)$$

unde x_k^{II} reprezinta vectorul de stare extins:

$$x_k^{II} = [x_k^T \quad x_{1k}^{II}]^T, \quad (5.2.17)$$

iar matricile au urmatoarele expresii și dimensiuni:

$$A_d^{II} = \begin{bmatrix} A_d & 0 \\ C_{pc}^T A_d & 1 \end{bmatrix}, \quad \dim A_d^{II} = (n+1, n+1), \quad (5.2.18)$$

$$B_d^{II} = \begin{bmatrix} b_d & 1 \\ C_{pc}^T b_d & 1 \end{bmatrix}, \quad \dim B_d^{II} = (n+1, 2), \quad (5.2.19)$$

$$C_d^{II} = \begin{bmatrix} C_{pc}^T & 0 \\ 0 & 1 \end{bmatrix}, \quad \dim C_d^{II} = (2, n+1). \quad (5.2.20)$$

0 respectiv 1 reprezinta matrici-coloana conținând n elemente de zero, respectiv unu.

Particularizarile matricilor din \underline{A}_d^{ii} ($\dim \underline{A}_d^{ii} = (3, 3)$), \underline{B}_d^{ii} ($\dim \underline{B}_d^{ii} = (3, 2)$) și \underline{C}_d^{ii} ($\dim \underline{C}_d^{ii} = (2, 3)$) se obțin în baza relațiilor (5.2.5), (5.2.8) și (5.2.9) sub forma:

- pentru cazul SFN2-IZP în general:

$$\underline{A}_d^{ii} = \begin{bmatrix} \exp(-\alpha_3 T_e / T_3) & k_{pc} T_2 [\exp(-\alpha_3 T_e / T_3) - \exp(-T_e / T_2)] & 0 \\ 0 & T_3 - \alpha_3 T_2 & 0 \\ \exp(-\alpha_3 T_e / T_3) & k_{pc} T_2 [\exp(-\alpha_3 T_e / T_3) - \exp(-T_e / T_2)] & 1 \\ & T_3 - \alpha_3 T_2 & \end{bmatrix},$$

$$\underline{B}_d^{ii} = \begin{bmatrix} k_{pc} (T_3 + \alpha_3 T_1) [1 - \exp(-\alpha_3 T_e / T_3)] - \alpha_3 k_{pc} [1 - \exp(-T_e / T_2)] \\ \alpha_3 (T_3 - \alpha_3 T_2) \\ (T_1 + T_2) [1 - \exp(-T_e / T_2)] / T_2 \\ k_{pc} (T_3 + \alpha_3 T_1) [1 - \exp(-\alpha_3 T_e / T_3)] - \alpha_3 k_{pc} [1 - \exp(-T_e / T_2)] \\ \alpha_3 (T_3 - \alpha_3 T_2) \end{bmatrix},$$

$$\underline{C}_d^{ii} = \begin{bmatrix} 1 & 0 & 0 \\ 0 & 0 & 1 \end{bmatrix}; \quad (5.2.21)$$

- pentru cazul reglării turajiei unui hidrogenerator:

$$\underline{A}_d^{ii} = \begin{bmatrix} \exp(-\alpha_w T_e / T_m) & \alpha_w K_{qh} T_w [\exp(-\alpha_w T_e / T_m) - \exp(-2T_e / K_{qh} T_w)] & 0 \\ 0 & 2T_m - \alpha_w K_{qh} T_w & 0 \\ \exp(-\alpha_w T_e / T_m) & \alpha_w K_{qh} T_w [\exp(-\alpha_w T_e / T_m) - \exp(-2T_e / K_{qh} T_w)] & 1 \\ & 2T_m - \alpha_w K_{qh} T_w & \end{bmatrix},$$

$$\underline{B}_d^{IE} = \begin{bmatrix} 2\alpha_y (T_m + \alpha_o K_{qh} \cdot T_w) [1 - \exp(-\alpha_o T_e / T_m)] - 3\alpha_o \alpha_y K_{qh} \cdot T_w [1 - \exp(-2T_e / K_{qh} \cdot T_w)] & & & \\ \hline & \alpha_o (2T_m - \alpha_o K_{qh} \cdot T_w) & & \\ & 3 [1 - \exp(-2T_e / K_{qh} \cdot T_w)] & & \\ & 2\alpha_y (T_m + \alpha_o K_{qh} \cdot T_w) [1 - \exp(-\alpha_o T_e / T_m)] - 3\alpha_o \alpha_y K_{qh} \cdot T_w [1 - \exp(-2T_e / K_{qh} \cdot T_w)] & & \\ \hline & & \alpha_o (2T_m - \alpha_o K_{qh} \cdot T_w) & \end{bmatrix} \begin{matrix} 1 \\ 1 \\ 1 \\ 1 \end{matrix},$$

$$\underline{C}_d^{IE} = \begin{bmatrix} 1 & 0 & 0 \\ 0 & 0 & 1 \end{bmatrix}. \quad (5.2.22)$$

b) Cazul în care integrarea se efectuează pe ieșirea RG-F. Schema bloc informațională aferentă PC-E care pune în evidență variabilele de stare suplimentare $\{x_{uk}, x_{yk}^{IE}\}$ este prezentată în fig.5.2.4.

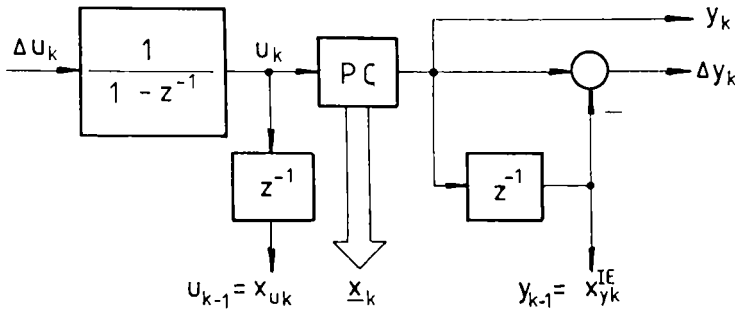


Fig.5.2.4. Schema bloc informațională aferentă PC-E în cazul integrării pe ieșirea RG-F.

Vectorul de stare extins poate fi exprimat în felul următor:

$$\underline{x}_k^{IE} = [\underline{x}_k^T \quad x_{uk} \quad x_{yk}^{IE}]^T. \quad (5.2.23)$$

Vectorul ieșirii reglate și vectorul comenzii sunt:

$$\underline{y}_k^{IE} = [y_k \quad \Delta y_k]^T = [y_k \quad y_k - y_{k-1}]^T, \quad \underline{u}_k^{IE} = [\Delta u_k \quad \Delta u_k]^T = [u_k - u_{k-1} \quad \Delta u_k]^T, \quad (5.2.24)$$

unde: Δy_k - incrementul ieșirii reglate; Δu_k - incrementul comenzii; Δu_k - incrementul comenzii suplimentare fictiv introduse pentru a avea număr egal de intrări și ieșiri ale PC-E.

În consecință, MM-ISI cu timp discret de ordinul $(n+2)$ aferent PC devine:

$$\underline{x}_{k+1}^{IE} = \underline{A}_d^{IE} \underline{x}_k^{IE} + \underline{B}_d^{IE} \underline{u}_k^{IE}, \quad (5.2.25)$$

$$\underline{y}_k^{IE} = \underline{C}_d^{IE} \underline{x}_k^{IE}, \quad (5.2.26)$$

in care matricile au urmatoarele expresii și dimensiuni:

$$\underline{A}_d^{IE} = \begin{bmatrix} \underline{A}_d & \underline{b}_d & \underline{0} \\ \underline{0}^T & 1 & 0 \\ \underline{c}^T & 0 & 0 \end{bmatrix}, \dim \underline{A}_d^{IE} = (n+2, n+2), \quad (5.2.27)$$

$$\underline{B}_d^{IE} = \begin{bmatrix} \underline{b}_d & \underline{1} \\ 1 & 1 \\ 0 & 1 \end{bmatrix}, \dim \underline{B}_d^{IE} = (n+2, 2), \quad (5.2.28)$$

$$\underline{C}_d^{IE} = \begin{bmatrix} \underline{c}_{pc}^T & 0 & 0 \\ \underline{c}_{pc}^T & 0 & -1 \end{bmatrix}, \dim \underline{C}_d^{IE} = (2, n+2). \quad (5.2.29)$$

Expresiile particulare ale matricilor \underline{A}_d^{IE} ($\dim \underline{A}_d^{IE} = (4, 4)$), \underline{B}_d^{IE} ($\dim \underline{B}_d^{IE} = (4, 2)$), \underline{C}_d^{IE} ($\dim \underline{C}_d^{IE} = (4, 2)$) sunt:

- pentru cazul SFN2-1ZP in general:

$$\underline{A}_d^{IE} = \begin{bmatrix} \frac{k_{pc} T_2 [\exp(-\alpha_s T_e / T_3) - \exp(-T_e / T_2)]}{\exp(-\alpha_s T_e / T_3)} & B_{d11}^{II} & 0 \\ 0 & \frac{T_3 - \alpha_s T_2}{\exp(-T_e / T_2)} & (T_1 + T_2) [1 - \exp(-T_e / T_2)] \\ 0 & 0 & 1 \\ 1 & 0 & 0 \end{bmatrix},$$

$$\underline{B}_d^{IE} = \begin{bmatrix} B_{d11}^{II} & 1 \\ (T_1 + T_2) [1 - \exp(-T_e / T_2)] / T_2 & 1 \\ 1 & 1 \\ 0 & 1 \end{bmatrix}, \quad (5.2.30)$$

$$\underline{C}_d^{IE} = \begin{bmatrix} 1 & 0 & 0 & 0 \\ 0 & 0 & 1 & -1 \end{bmatrix};$$

- pentru cazul reglării turajului unui hidrogenator:

$$\underline{A}_d^{IE} = \begin{bmatrix} \frac{\alpha_s K_{qh} T_v [\exp(-\alpha_s T_e / T_m) - \exp(-2T_e / K_{qh} T_v)]}{\exp(-\alpha_s T_e / T_m)} & B_{d11}^{II} & 0 \\ 0 & \frac{2T_m - \alpha_s K_{qh} T_v}{\exp(-2T_e / K_{qh} T_v)} & 3 [1 - \exp(-2T_e / K_{qh} T_v)] \\ 0 & 0 & 1 \\ 0 & 0 & 1 \end{bmatrix},$$

$$\underline{B}_d^{IE} = \begin{bmatrix} B_{d11}^{II} & & & & 1 \\ 3 [1 - \exp(-2T_e/K_{qh}^*/T_w)] & & & & 1 \\ & 1 & & & 1 \\ & 0 & & & 1 \end{bmatrix}, \quad (5.2.31)$$

$$\underline{C}_d^{IE} = \begin{bmatrix} 1 & 0 & 0 & 0 \\ 0 & 0 & 1 & -1 \end{bmatrix}.$$

În relațiile (5.2.30) și (5.2.31) prin B_{d11}^{II} s-a notat elementul de pe poziția (1, 1) a matricii \underline{B}_d^{II} (a se vedea relațiile (5.2.21) și (5.2.22)).

MM-ISI aferente celor doua cazuri prezentate în relațiile (5.2.15) și (5.2.16), respectiv (5.2.25) și (5.2.26) pot fi rescrise sub următoarea forma unitara:

$$\underline{x}_{k+1}^f = \underline{A}_d^f \underline{x}_k^f + \underline{B}_d^f \underline{u}_k^f, \quad (5.2.32)$$

$$\underline{y}_k^f = \underline{C}_d^f \underline{x}_k^f, \quad (5.2.33)$$

în care: $f \in \{II, IE\}$, $\dim \underline{A}_d^f = (n^f, n^f)$, $\dim \underline{B}_d^f = (n^f, 2)$, $\dim \underline{C}_d^f = (2, n^f)$, $n^{II} = n + 1$, $n^{IE} = n + 2$ (în particular $n^{II} = 3$, $n^{IE} = 4$).

Observație: S-a impus ca ultima coloana a matricii \underline{B}_d^f sa aiba numai elemente egale cu 1 pentru ca realizarea sistemica (5.2.32), (5.2.33) sa fie minimala din punct de vedere al proprietăților structurale (Ionescu, 1985). Ținând seama de faptul ca întrucât comenzile fictive \underline{u}_{ik} și $\Delta \underline{u}_{ik}$ nu intervin în continuare (cea de-a doua componenta a funcției E este întotdeauna zero, relația (5.2.12)), în aceasta ultima coloana se putea introduce orice set de valori finite.

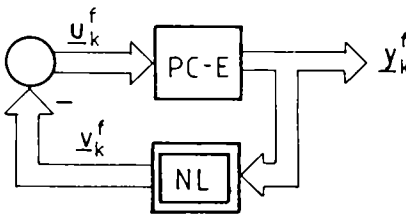


Fig.5.2.5. Schema bloc informaționala aferenta unui sistem neliniar.

Pentru aplicarea rezultatelor teoriei hiperstabilității la studiul stabilității unui SRA cu RG-F cu dinamica schema bloc informaționala din fig. 5.2.2 se transforma la forma schemei bloc informaționale din fig.5.2.5 (Voicu, 1986), specifica analizei stabilității sistemelor neliniare; NL reprezintă o neliniaritate statica specifica RG-F și definita prin relația (5.2.12).

Relațiile de legatura între elementele din fig.5.2.2 și fig.5.2.5 sunt (Opitz, 1993):

$$\text{la } \underline{e}_k^f \text{ din fig.5.2.2 corespunde } -\underline{y}_k^f \text{ din fig.5.2.5;} \quad (5.2.34)$$

$$\text{la } E(\underline{e}_k^f) \text{ din fig.5.2.2 corespunde } \underline{u}_k^f = -\underline{y}_k^f \text{ din fig.5.2.5.} \quad (5.2.35)$$

Relativ la stabilitatea unui sistem neliniar cu schema bloc informaționala conform fig.5.2.5 se

reamintește următoarea propoziție (Landau, 1979) (referita și în (Opitz, 1986a), (Opitz, 1986b)):

Propoziția 1: Sistemul neliniar cu schema bloc informațională conform fig. 5.2.5 și MM-ISI (5.2.32), (5.2.33) aferent PC-E (parții liniare) este global stabil dacă:

(i) matricea de transfer a părții liniare a sistemului:

$$H_d(z) = C_d(zI - A_d)^{-1} B_d \quad (5.2.36)$$

este real pozitivă;

(ii) neliniaritatea (NL) satisface inegalitatea de tip Popov:

$$S(k_1) = \sum_{k=0}^{k_1} y_k^T y_k \geq -\beta_0^2, \quad \forall k_1 \in \mathbb{N}, \quad (5.2.37)$$

unde β_0 este o constantă pozitivă arbitrară.

Se reamintește de asemenea că matricea de transfer $H_d(z)$ se numește real pozitivă dacă și numai dacă:

(a) nu are poli situați în afara cercului de rază unitate centrat în originea planului complex al rădăcinilor;

(b) eventualii poli situați pe circumferința cercului de rază unitate (pentru care $|z| = 1$) sunt simpli și matricile reziduurilor asociate acestor poli sunt hermitice pozitiv semidefinite;

(c) matricea:

$$Q_d(j\omega T_c) = H_d(e^{j\omega T}) + H_d^T(e^{j\omega T}) \quad (5.2.38)$$

este hermitică pozitiv semidefinită pentru toți $z = e^{j\omega T}$ cu $\omega \in [0; 2\pi/T_c]$, care nu sunt poli ai lui $H_d(z)$.

În continuare se formulează o condiție suficientă care face mai simplă verificarea inegalității (5.2.37).

Propoziția 2: Dacă există $\beta = \text{const} \geq 0$ astfel încât:

$$e_k(F_1(e_k^f) - \beta e_k) \geq 0, \quad \forall k \in \mathbb{N}, \quad (5.2.39)$$

atunci se verifică inegalitatea de tip Popov (5.2.37).

Demonstrație: Ținând seama de relația (5.2.12) și corespondențele (5.2.34) și (5.2.35), suma din membrul stâng al relației (5.2.37) se transformă în:

$$S(k_1) = \sum_{k=0}^{k_1} F_1(e_k^f) e_k. \quad (5.2.40)$$

Pentru $e_k \geq 0$, din (5.2.39) rezulta obligativitatea condiției $F_1(e_k^f) \geq \beta e_k$ și, în continuare, $F_1(e_k^f) e_k \geq \beta e_k^2$.

Pentru $e_k < 0$, din (5.2.39) rezulta obligativitatea condiției $F_1(e_k^f) \leq \beta e_k$ și, în continuare, $F_1(e_k^f) e_k \geq \beta e_k^2$.

Prin urmare, se obține:

$$F_1(e_k^f) e_k \geq \beta e_k^2, \quad \forall k \in \mathbb{N}. \quad (5.2.41)$$

și suma din (5.2.40) devine:

$$S(k_1) \geq \beta \sum_{k=0}^{k_1} c_k^2 \geq 0, \forall k_1 \in \mathbb{N}, \quad (5.2.42)$$

ceea ce înseamnă că se verifică inegalitatea de tip Popov (5.2.37).

Pe baza propozițiilor 1 și 2 prezentate mai sus se poate formula un *prim procedeu de verificare a stabilității sistemelor de reglare fuzzy a proceselor (în particular, cu faza neminimă)*.

Pentru aplicarea procedurii se parcurg următoarele etape:

I. Se determină MM-ISI cu timp discret (5.2.32), (5.2.33) aferent PC-E.

II. Se stabilesc valorile "critice" ale parametrilor PC, pentru care:

- polii matricii $\underline{H}_d^f(z)$ sunt cei mai apropiați de frontiera cercului de rază unitate centrat în originea planului complex;
- minorii principali ai matricilor reziduurilor aferente polilor de pe circumferința cercului de rază unitate au cele mai mici valori;
- minorii principali ai matricilor $\underline{G}_d^f(j\omega T_c)$ aferente lui $z = e^{j\omega T_c}$ care nu sunt poli ai matricii $\underline{H}_d^f(z)$ au cele mai mici valori (pentru procesele luate în considerare în cadrul tezei, aceste valori sunt întotdeauna reale și pozitive).

III. Pentru valorile "critice" ale parametrilor PC determinate în etapa a II-a și pentru fiecare variantă de RG-F cu dinamica supusă analizei se stabilesc domeniile de valori ale parametrilor liberi ai RG-F despre care se presupune că vor asigura stabilitatea SRA cu RG-F; apoi, pentru diverse valori ale parametrilor liberi se caută câte un $\beta = \text{const} \geq 0$ care să verifice inegalitatea (5.2.39) și rezulta, astfel, marginile pentru valorile parametrilor liberi ai RG-F care garantează stabilitatea SRA.

Maniera de abordare este justificată deoarece pentru procesul condus de tip SFN2-1ZP considerat - și, în particular, pentru PC aferent reglării turajului unui hidrogenerator - parametrii variaza continuu dependent de punctul de funcționare staționară constantă.

Condiția (i) din propoziția 1 reprezintă o cerință exprimată în domeniul pulsație (frecvență) (relația (5.2.38)), a cărei verificare este anevoioasă. Condiția (i) poate fi exprimată însă în spațiul starilor pe baza lemei lui Kalman-Szegő (referită de (Landau, 1979) și (Opitz, 1986a)), prezentată sub forma propoziției 3.

Propoziția 3: Matricea de transfer $\underline{H}_d^f(z)$ (relația (5.2.36)) este real pozitivă dacă următoarele trei ecuații matriciale:

$$\underline{A}_d^T \underline{P} \underline{A}_d^f - \underline{P} = - \underline{L} \underline{L}^T, \quad (5.2.43)$$

$$\underline{C}_d^f - \underline{B}_d^T \underline{P} \underline{A}_d^f = \underline{V}^T \underline{L}^T, \quad (5.2.44)$$

$$- \underline{B}_d^T \underline{P} \underline{B}_d^f = \underline{V}^T \underline{V} \quad (5.2.45)$$

admit ca soluții:

- matricea \underline{P} (dim $\underline{P} = (n^f, n^f)$) pozitiv definită și

- matricile \underline{L} ($\dim \underline{L} = (n^f, n^f)$) și \underline{V} ($\dim \underline{V} = (n^f, 2)$) oarecari.

În cele ce urmează se formulează o altă propoziție a cărei respectare asigură stabilitatea globală a sistemului nelinier; propoziția este formulată în maniera unei teoreme similare valabile pentru SRA cu timp continuu (Voicu, 1986).

Propoziția 4: Sistemul nelinier cu schema bloc informațională conform fig.5.2.5 și MM-ISI (5.2.32), (5.2.33) aferent PC-E este global stabil dacă matricile \underline{P} (simetrică și pozitiv definită, $\dim \underline{P} = (n^f, n^f)$), \underline{L} (oarecare, $\dim \underline{L} = (n^f, n^f)$) și \underline{V} (oarecare, $\dim \underline{V} = (n^f, 2)$) îndeplinesc următoarele cerințe:

(i) verifica ecuația:

$$\underline{A}_d^T \underline{P} \underline{A}_d^f - \underline{P} = - \underline{L} \underline{L}^T; \quad (5.2.46)$$

(ii) matricea \underline{M} ($\dim \underline{M} = (n^f+2, n^f+2)$) este pozitiv semidefinită:

$$\underline{M} = \begin{bmatrix} \underline{L} \underline{L}^T - \underline{P} & \underline{L} \underline{V} - (3/2) \underline{C}_d^{*T} \\ \underline{V}^T \underline{L}^T - (3/2) \underline{C}_d^* & \underline{V}^T \underline{V} \end{bmatrix}; \quad (5.2.47)$$

(iii) există $\beta = \text{const} \geq 0$ astfel încât:

$$e_k (F_1(\underline{x}_k^f) - \beta e_k) \geq 0, \forall k \in \mathbb{N}. \quad (5.2.48)$$

Demonstrație: Întrucât se presupun satisfăcute condițiile din propozițiile 1 ... 3, condiția (i) este verificată, ea reprezentând prima ecuație matricială a propoziției 3 (relația (5.2.43)).

Pentru verificarea condiției (ii) se rescrie suma din relația (5.2.37) ținând seama de relația (5.2.35):

$$S(k_1) = - \sum_{k=0}^{k_1} \underline{u}_k^T \underline{y}_k^f, \forall k_1 \in \mathbb{N}^+. \quad (5.2.49)$$

Înlocuind \underline{y}_k^f din ecuația ieșirii (5.2.33) în (5.2.49), adunând și scăzând sub semnul sumei termenul $\underline{x}_{k+1}^T \underline{P} \underline{x}_{k+1}^f$, se obține:

$$S(k_1) = - \sum_{k=0}^{k_1} (\underline{x}_k^T \underline{C}_d^T \underline{x}_k^f + \underline{x}_{k+1}^T \underline{P} \underline{x}_{k+1}^f - \underline{x}_{k+1}^T \underline{P} \underline{x}_{k+1}^f), \forall k_1 \in \mathbb{N}^+. \quad (5.2.50)$$

În continuare se substituie \underline{x}_{k+1}^f din ecuația de stare (5.2.32) în (5.2.50) rezultând:

$$S(k_1) = - \sum_{k=0}^{k_1} [- \underline{x}_k^T \underline{A}_d^T \underline{P} \underline{A}_d^f \underline{x}_k^f - \underline{u}_k^T (2 \underline{B}_d^T \underline{P} \underline{A}_d^f + \underline{C}_d^f) \underline{x}_k^f - \underline{u}_k^T \underline{B}_d^T \underline{B}_d^f \underline{u}_k^f + \underline{x}_{k+1}^T \underline{P} \underline{x}_{k+1}^f], \forall k_1 \in \mathbb{N}^+. \quad (5.2.51)$$

Prin înlocuirea expresiilor $\underline{A}_d^T \underline{P} \underline{A}_d^f$, $\underline{B}_d^T \underline{P} \underline{A}_d^f$ și $\underline{B}_d^T \underline{P} \underline{B}_d^f$ din ecuațiile (5.2.43), (5.2.44) și respectiv (5.2.45) în relația (5.2.51) se obține o altă expresie a sumei $S(k_1)$:

$$S(k_1) = - \sum_{k=0}^{k_1} [\underline{x}_k^T (\underline{L} \underline{L}^T - \underline{P}) \underline{x}_k^f + 2 \underline{x}_k^T (\underline{L} \underline{V} - 1.5 \underline{C}_d^{*T} + \underline{C}_d^f) \underline{u}_k^f +$$

$$+ \underline{u}_k^T \underline{V}^T \underline{V} \underline{u}_k + \underline{x}_{k+1}^T \underline{P} \underline{x}_{k+1}, \forall k_1 \in \mathbb{N}^* \quad (5.2.52)$$

Se observa ca suma din (5.2.53) poate fi aranjata sub urmatoarea forma:

$$S(k_1) = \sum_{k=0}^{k_1} \{ [\underline{x}_k^T \quad \underline{u}_k^T] \underline{M} \begin{bmatrix} \underline{x}_k \\ \underline{u}_k \end{bmatrix} + \underline{x}_{k+1}^T \underline{P} \underline{x}_{k+1} \}, \forall k_1 \in \mathbb{N}^* \quad (5.2.53)$$

Din (5.2.53) se constata ca este suficient ca matricile \underline{M} și \underline{P} sa fie pozitiv semidefinite pentru ca sa fie indeplinita inegalitatea de tip Popov (5.2.37). Deci, s-a verificat și condiția (ii).

Condiția (iii) din enunțul propoziției 4 este evident verificata deoarece este identica propoziției 2.

În baza propoziției 4 se poate formula un *al doilea procedeu de verificare a stabilitații sistemelor de reglare fuzzy a proceselor (in particular, cu faza neminima)*. Acesta conține neschimbate prima și a treia etapa de la primul procedeu, iar cea de-a doua obține urmatoarea forma:

II. Se alege matricea simetrica pozitiv definita \underline{P} și se gasește matricea \underline{L} rezolvând ecuația matriciala (de tip Lyapunov) (5.2.46), apoi se cauta o matrice \underline{V} care sa determine ca matricea \underline{M} din (5.2.47) sa fie pozitiv semidefinita.

Observația 1: Ambele procedee de verificare a stabilitații sistemelor de reglare fuzzy a proceselor cu faza neminima garanteaza stabilitatea globala a sistemului de reglare fuzzy și permit determinarea domeniilor de stabilitate ale parametrilor liberi aferenți reguletoarelor fuzzy (dezvoltate în capitolele III și IV).

În situațiile în care cerințele celor doua procedee nu se verifica, adica pentru valori ale parametrilor liberi care nu se încadreaza între marginile domeniilor, stabilitatea trebuie verificata prin simulare numerica.

Observația 2: După cunoștințele autorului, cele doua procedee propuse sunt originale; alte variante mai laborioase de verificare a stabilitații SRA cu RG-F - bazate pe teoria hiperstabilitații - au fost propuse în (Opitz, 1993), (Böhm și Bosch, 1995). Cel de-al doilea procedeu este prezentat și în (Precup, 1996).

Observația 3: Ambele procedee propuse de verificare a stabilitații SRA cu RG-F se pot utiliza pentru toate reguletoarele fuzzy cu dinamica dezvoltate în capitolele III și IV; excepție face doar RG cu acordare fuzzy a parametrilor unui ARN-PI în varianta cvasicontinuala incrementală în funcție de parametrii primari ai PC, la care se recomanda verificarea stabilitații prin simularea comportării SRA pe calculator numeric.

Observația 4: Modificarile valorilor parametrilor liberi ai reguletoarelor fuzzy aduc după sine modificari ale caracteristicilor statice (generalizate) care în anumite situații pot crea zone lacunare în domeniile de stabilitate.

5.3. Aplicarea celor doua procedee de verificare a stabilitații sistemelor de reglare fuzzy a proceselor cu faza neminima la studiul de caz considerat referitor la reglarea turatiei unui hidrogenerator al centralei hidroelectrice Porțile de Fier 1

În cadrul studiului de caz considerat se vor lua în considerare variantele de reguletoare fuzzy cu dinamica (de tip cvasi-PI) propuse în capitolele III și IV, mai puțin reguletorul cu acordare fuzzy a

parametrilor unui ARN-PI în varianta cvasicontinua incrementală în funcție de parametri primari ai PC.

I. Aplicarea primului procedeu de verificare a stabilității sistemelor de reglare fuzzy a proceselor cu faza neminiată.

Dependent de locul unde este plasat integratorul în structura regulatorului fuzzy cu dinamica se disting două cazuri numerotate cu a) și b).

a) Cazul reglatoarelor fuzzy de tip cvasi-PI cu integrare pe ieșire. Etapa I conduce la MM-ISI aferent PC-E exprimat sub forma relațiilor (5.2.25) și (5.2.26), în care matricile sunt exprimate conform relației (5.2.31).

La parcurgerea celei de-a II-a etape se calculează matricea de transfer aferentă părții liniare (PC-E)

$H_d^{IE}(z)$:

$$\underline{H}_d^{IE}(z) = \begin{bmatrix} H_{11}^{IE}(z) & H_{12}^{IE}(z) \\ H_{21}^{IE}(z) & H_{22}^{IE}(z) \end{bmatrix}, \quad (5.3.1)$$

în care funcțiile de transfer $H_{11}^{IE}(z)$, $H_{12}^{IE}(z)$, $H_{21}^{IE}(z)$ și $H_{22}^{IE}(z)$ au respectiv expresiile:

$$H_{11}^{IE}(z) = \frac{z(a_{13}^{IE} z + a_{12}^{IE} a_{23}^{IE} - a_{13}^{IE} a_{22}^{IE})}{(z-1)(z-a_{11}^{IE})(z-a_{22}^{IE})}, \quad (5.3.2)$$

$$H_{12}^{IE}(z) = \frac{z^2 + (a_{12}^{IE} + a_{13}^{IE} - a_{22}^{IE})z + a_{22}^{IE}(1 - a_{13}^{IE}) + a_{12}^{IE}(a_{23}^{IE} - 1)}{(z-a_{11}^{IE})(z-a_{22}^{IE})}, \quad (5.3.3)$$

$$H_{21}^{IE}(z) = \frac{a_{13}^{IE} z + a_{12}^{IE} a_{23}^{IE} - a_{13}^{IE} a_{22}^{IE}}{(z-a_{11}^{IE})(z-a_{22}^{IE})}, \quad (5.3.4)$$

$$H_{22}^{IE}(z) = \frac{(a_{13}^{IE} + a_{11}^{IE} + a_{12}^{IE} - 1)z + a_{12}^{IE}(a_{23}^{IE} - 1) + a_{22}^{IE}(1 - a_{11}^{IE} - a_{13}^{IE})}{z(z-a_{11}^{IE})(z-a_{22}^{IE})}. \quad (5.3.5)$$

Polinomul caracteristic aferent PC-E are expresia:

$$\mu^{IE}(z) = z(z-1)(z-a_{11}^{IE})(z-a_{22}^{IE}) = z^4 + d_3^{IE} z^3 + d_2^{IE} z^2 + d_1^{IE} z, \quad (5.3.6)$$

în care:

$$d_3^{IE} = -a_{11}^{IE} - a_{22}^{IE} - 1, \quad d_2^{IE} = a_{11}^{IE} + a_{22}^{IE} + a_{11}^{IE} a_{22}^{IE}, \quad d_1^{IE} = -a_{11}^{IE} a_{22}^{IE}. \quad (5.3.7)$$

Coefficienții care apar în relațiile anterioare reprezintă unele elemente ale matricii \underline{A}_d^{IE} cu următoarele expresii rezultate din (5.2.31):

$$a_{11}^{IE} = \exp(-\alpha_\omega T_e / T_m),$$

$$a_{12}^{IE} = \frac{\alpha_s K_{qh} T_w [\exp(-\alpha_\omega T_e / T_m) - \exp(-2T_e / K_{qh} T_w)]}{2T_m - \alpha_\omega K_{qh} T_w}$$

$$a_{13}^{IE} = \frac{2\alpha_y(T_m + \alpha_\omega K_{qh} T_w)[1 - \exp(-\alpha_\omega T_e/T_m)] - 3\alpha_\omega \alpha_y K_{qh} T_w [1 - \exp(-2T_e/K_{qh} T_w)]}{\alpha_\omega(2T_m - \alpha_\omega K_{qh} T_w)} \quad (5.3.8)$$

$$a_{22}^{IE} = \exp(-2T_e/K_{qh} T_w),$$

$$a_{23}^{IE} = 3[1 - \exp(-2T_e/K_{qh} T_w)].$$

Polii aferenți PC-E au expresiile:

$$p_1^{IE} = 0, p_2^{IE} = 1, p_3^{IE} = e^{-\alpha_\omega T_e/T_m}, p_4^{IE} = e^{-2T_e/K_{qh} T_w}. \quad (5.3.9)$$

În fig.5.3.1 și 5.3.2 se prezintă dependențele valorilor polilor p_3^{IE} și respectiv p_4^{IE} la modificări ale parametrilor PC, în speța α_ω și K_{qh} . MM a fost determinat și, corespunzător, dependențele menționate sunt reprezentate pentru:

- valorile cunoscute ale constantelor de timp T_w și T_m (relația (2.1.24)) și ale limitelor de variație ale parametrilor $\{\alpha_y, K_{qh}, \alpha_\omega\}$ (relațiile (1.2.2.1.24), (1.2.2.2.3) și (1.2.2.2.4));
- valoarea perioadei de eșantionare aleasă în conducerea numerică cvasicontinuală (a se vedea paragraful 3.2):

$$T_e = 0.05 \text{ sec.} \quad (5.3.10)$$

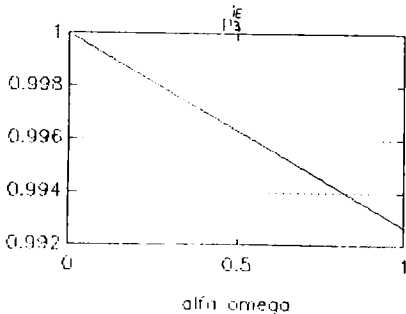


Fig.5.3.1. Dependența valorii polului p_3^{IE} în funcție de parametrul α_ω .

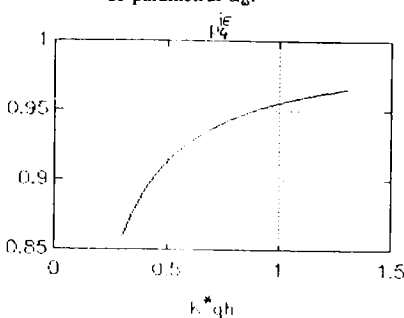


Fig.5.3.2. Dependența valorii polului p_4^{IE} în funcție de parametrul K_{qh} .

Din relația (5.3.9), fig.5.3.1 și fig.5.3.2

se constată ca:

- modificarea poziției fiecărui pol este afectată doar de parametrul corespunzător;
- valorile "critice" ale parametrilor PC care fac ca polii p_3^{IE} și p_4^{IE} să fie cel mai aproape de frontiera domeniului de stabilitate sunt:

$$\alpha_\omega = 0, K_{qh} = 1.3. \quad (5.3.11)$$

Pentru polul $p_2^{IE} = 1$ matricea

reziduurilor are următoarea expresie:

$$\underline{\text{Rez}}^{IE} = \begin{bmatrix} \text{Rez}_{11}^{IE} & 0 \\ \text{Rez}_{21}^{IE} & 0 \end{bmatrix}, \quad (5.3.12)$$

în care interesează doar elementul Rez_{11}^{IE} :

$$\text{Rez}_{11}^{IE} = \frac{2\alpha_y(T_m + \alpha_\omega K_{qh} T_w)}{\alpha_\omega(2T_m - \alpha_\omega K_{qh} T_w)} \quad (5.3.13)$$

Întrucât este evident că:

$$\det(\underline{\text{Rez}}^{\text{IE}}) = 0, \quad (5.3.14)$$

pentru ca matricea $\underline{\text{Rez}}^{\text{IE}}$ sa fie pozitiv semidefinita este necesar ca:

$$\text{Rez}_{11}^{\text{IE}} \geq 0. \quad (5.3.15)$$

Dependențele valorilor rezidului $\text{Rez}_{11}^{\text{IE}}$ în funcție de valorile parametrilor PC sunt prezentate în fig.5.3.3, după cum urmează:

- în fig.5.3.3a - dependența valorii lui $\text{Rez}_{11}^{\text{IE}}$ în funcție de α_y pentru $K_{qh}^* = \alpha_\omega = 1$;
- în fig.5.3.3b - dependența valorii lui $\text{Rez}_{11}^{\text{IE}}$ în funcție de K_{qh}^* pentru $\alpha_y = \alpha_\omega = 1$;
- în fig.5.3.3c și d - dependența valorii lui $\text{Rez}_{11}^{\text{IE}}$ în funcție de α_ω pentru $\alpha_y = K_{qh}^* = 1$.

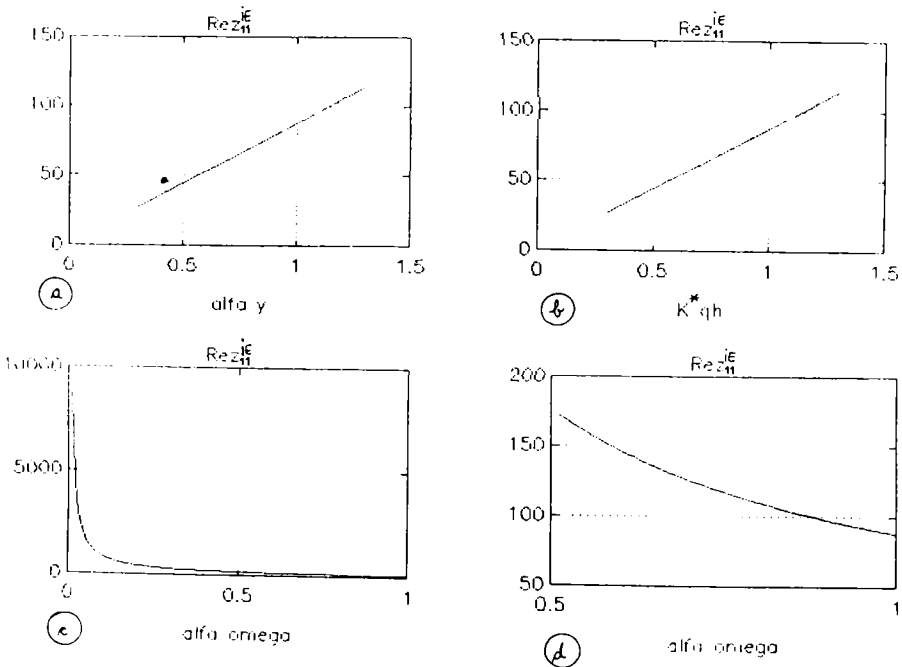


Fig.5.3.3. Dependențele valorilor rezidului $\text{Rez}_{11}^{\text{IE}}$ în funcție de parametrii PC.

Valorile "critice" ale parametrilor PC care determina cele mai mici valori (pozitive) ale rezidului $\text{Rez}_{11}^{\text{IE}}$ se citesc din graficele prezentate în fig.5.3.3:

$$\alpha_y = 0.3, K_{qh}^* = 0.3, \alpha_\omega = 1. \quad (5.3.16)$$

Matricea $\underline{G}_d^{\text{IE}}(j\omega T_0)$, relația (5.2.38), are următoarea expresie:

$$\underline{G}_d^{\text{IE}}(j\omega T_0) = \begin{bmatrix} G_{11}^{\text{IE}}(j\omega T_0) & G_{12}^{\text{IE}}(j\omega T_0) \\ G_{21}^{\text{IE}}(j\omega T_0) & G_{22}^{\text{IE}}(j\omega T_0) \end{bmatrix}, \quad (5.3.17)$$

cu elementele calculate pe baza urmatoarelor relatii:

$$G_{11}^{IE}(j\omega T_e) = \frac{\alpha^{IE}(\omega T_e)}{|p^{IE}(\omega T_e)|^2 + |q^{IE}(\omega T_e)|^2 + \beta^{IE}(\omega T_e) + j \gamma^{IE}(\omega T_e)}, \quad (5.3.18)$$

$$G_{12}^{IE}(j\omega T_e) = \frac{\alpha^{IE}(\omega T_e)}{|p^{IE}(\omega T_e)|^2 + |q^{IE}(\omega T_e)|^2 + \beta^{IE}(\omega T_e) - j \gamma^{IE}(\omega T_e)}, \quad (5.3.19)$$

$$G_{21}^{IE}(j\omega T_e) = \frac{\alpha^{IE}(\omega T_e)}{|p^{IE}(\omega T_e)|^2 + |q^{IE}(\omega T_e)|^2 + \delta^{IE}(\omega T_e)}, \quad (5.3.20)$$

$$G_{22}^{IE}(j\omega T_e) = \frac{\alpha^{IE}(\omega T_e)}{|p^{IE}(\omega T_e)|^2 + |q^{IE}(\omega T_e)|^2}, \quad (5.3.21)$$

in care:

$$\alpha^{IE}(\omega T_e) = 2\{p^{IE}(\omega T_e)[a_{13}^{IE}\cos(3\omega T_e) + (a_{12}^{IE}a_{23}^{IE} - a_{13}^{IE}a_{22}^{IE})\cos(2\omega T_e)] + q^{IE}(\omega T_e)[a_{13}^{IE}\sin(3\omega T_e) + (a_{12}^{IE}a_{23}^{IE} - a_{13}^{IE}a_{22}^{IE})\sin(2\omega T_e)]\}, \quad (5.3.22)$$

$$\beta^{IE}(\omega T_e) = p^{IE}(\omega T_e)\{(a_{13}^{IE} + 1)\cos(3\omega T_e) + [a_{12}^{IE}(1 + a_{23}^{IE}) - a_{22}^{IE}(1 + a_{13}^{IE}) - 1]\cos(2\omega T_e) + (a_{22}^{IE} - a_{11}^{IE})\cos(\omega T_e)\} + q^{IE}(\omega T_e)\{(a_{13}^{IE} + 1)\sin(3\omega T_e) + [a_{12}^{IE}(1 + a_{23}^{IE}) - a_{22}^{IE}(1 + a_{13}^{IE}) - 1]\sin(2\omega T_e) + (a_{22}^{IE} - a_{11}^{IE})\sin(\omega T_e)\}, \quad (5.3.23)$$

$$\gamma^{IE}(\omega T_e) = p^{IE}(\omega T_e)\{(1 - a_{13}^{IE})\sin(3\omega T_e) + [a_{12}^{IE}(1 - a_{23}^{IE}) + a_{13}^{IE}(2 - a_{22}^{IE}) - a_{22}^{IE} - 1]\sin(2\omega T_e) + [a_{22}^{IE}(1 - 2a_{23}^{IE}) + a_{12}^{IE}(2a_{23}^{IE} - 1)]\sin(\omega T_e)\} - q^{IE}(\omega T_e)\{(1 - a_{13}^{IE})\cos(3\omega T_e) + [a_{12}^{IE}(1 - a_{23}^{IE}) + a_{13}^{IE}(2 - a_{22}^{IE}) - a_{22}^{IE} - 1]\cos(2\omega T_e) + (1 - 2a_{23}^{IE})(a_{22}^{IE} - a_{12}^{IE})\cos(\omega T_e)\}, \quad (5.3.24)$$

$$\delta^{IE}(\omega T_e) = 2p^{IE}(\omega T_e)\{(a_{13}^{IE} + a_{11}^{IE} + a_{22}^{IE} - 1)\cos(2\omega T_e) + [a_{12}^{IE}(a_{23}^{IE} - 2) + (1 + a_{22}^{IE})(-a_{11}^{IE} + 1 - a_{13}^{IE})]\cos(\omega T_e)\} + 2q^{IE}(\omega T_e)\{(a_{13}^{IE} + a_{11}^{IE} + a_{22}^{IE} - 1)\sin(2\omega T_e) + [a_{12}^{IE}(a_{23}^{IE} - 2) + (1 + a_{22}^{IE})(-a_{11}^{IE} + 1 - a_{13}^{IE})]\sin(\omega T_e)\}, \quad (5.3.25)$$

$$p^{IE}(\omega T_e) = \cos(4\omega T_e) + d_3^{IE}\cos(3\omega T_e) + d_2^{IE}\cos(2\omega T_e) + d_1^{IE}\cos(\omega T_e), \quad (5.3.26)$$

$$q^{IE}(\omega T_e) = \sin(4\omega T_e) + d_3^{IE}\sin(3\omega T_e) + d_2^{IE}\sin(2\omega T_e) + d_1^{IE}\sin(\omega T_e). \quad (5.3.27)$$

Coefficientii care apar in relatiile (5.3.22) ... (5.3.27) au exprimarea conform relatiilor (5.3.7) si (5.3.8).

Din relatiile (5.3.17) ... (5.3.21) se observa imediat ca matricea $\underline{G}_d^{IE}(j\omega T_e)$ este hermitica, aceasta intrucât:

$$\underline{G}_d^{IE}(j\omega T_e) = \overline{\underline{G}_d^{IE}(j\omega T_e)}, \quad (5.3.28)$$

unde prin barare superioara s-a marcat operatia de conjugare.

Calculând $G_{11}^{IE}(j\omega T_e)$ (notat cu G_{11}^{IE}) si determinantul matricii $\underline{G}_d^{IE}(j\omega T_e)$ (notat cu $\det(\underline{G}^{IE})$), in

conformitate cu cea de-a II-a etapa din cadrul primului procedeu de verificare a stabilității, trebuie verificat dacă $\underline{G}^{iE}(j\omega T_s)$ este pozitiv definită, adică:

$$G_{11}^{iE} > 0, \quad \det(\underline{G}^{iE}) > 0, \quad (5.3.29)$$

pentru $\omega \in (0; 40\pi) \text{ sec}^{-1}$.

Dependențele valorilor lui G_{11}^{iE} și $\det(\underline{G}^{iE})$ în funcție de pulsația ω pentru diverse valori ale parametrilor PC sunt prezentate în fig. 5.3.4 ... 5.3.6, după cum urmează:

- în fig. 5.3.4a - pentru $\alpha_y = 0.3, K_{qh}^* = \alpha_\omega = 1$;
- în fig. 5.3.4b - pentru $\alpha_y = 1.3, K_{qh}^* = \alpha_\omega = 1$;
- în fig. 5.3.5a - pentru $K_{qh}^* = 0.3, \alpha_y = \alpha_\omega = 1$;
- în fig. 5.3.5b - pentru $K_{qh}^* = 1.3, \alpha_y = \alpha_\omega = 1$;
- în fig. 5.3.6a - pentru $\alpha_\omega = 0, \alpha_y = K_{qh}^* = 1$;
- în fig. 5.3.6b - pentru $\alpha_\omega = 1, \alpha_y = K_{qh}^* = 1$.

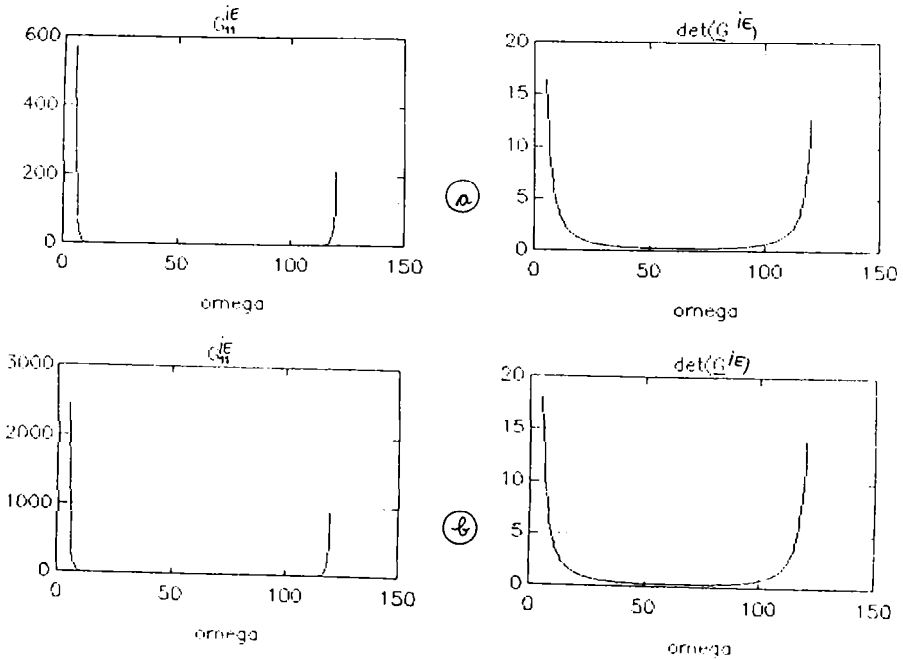
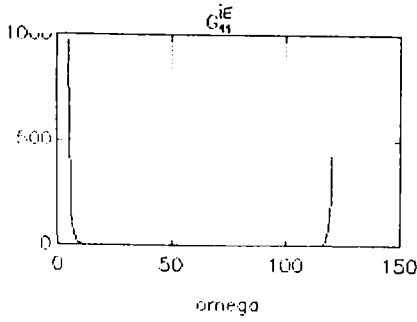
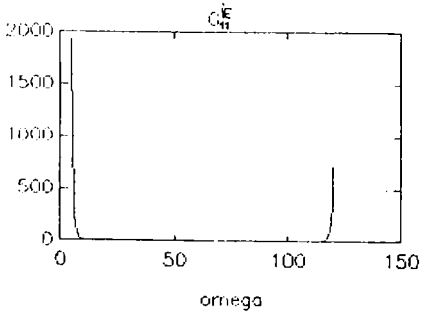
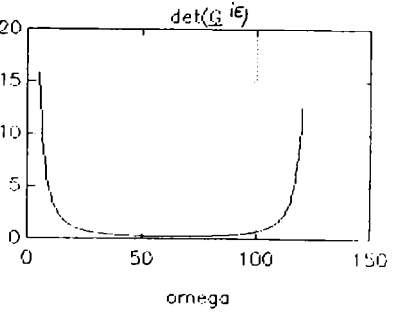


Fig. 5.3.4. Dependențele valorilor lui G_{11}^{iE} și $\det(\underline{G}^{iE})$ în funcție de ω pentru valorile limita ale parametrului α_y .



(a)



(a)

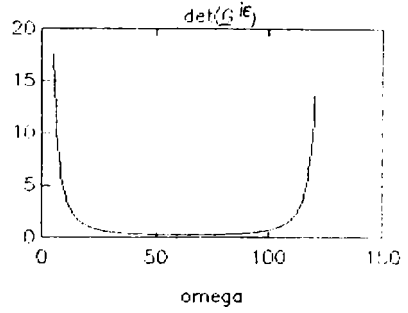
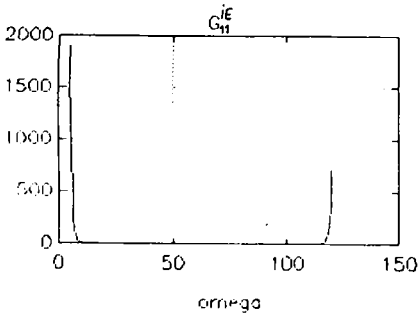
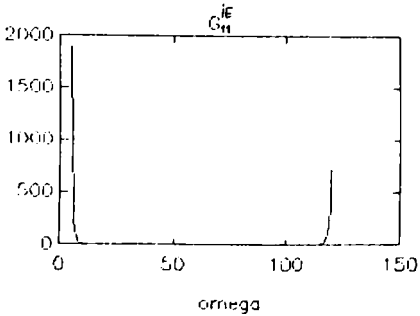
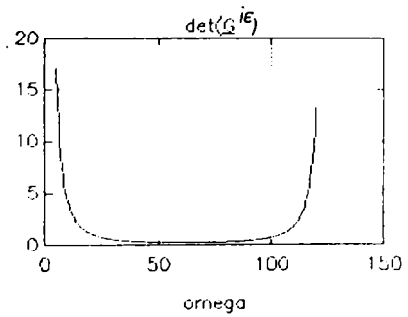


Fig.5.3.5. Dependențele valorilor lui G_{11}^{IE} și $\det(G^{IE})$ în funcție de ω pentru valorile limita ale parametrului K_{qb} .



(a)



(a)

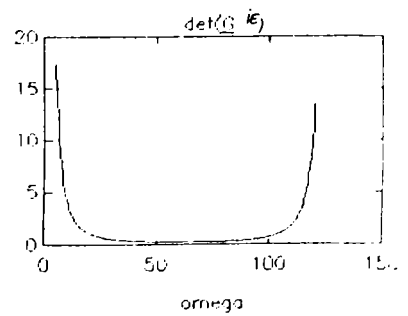


Fig.5.3.6. Dependențele valorilor lui G_{11}^{IE} și $\det(G^{IE})$ în funcție de ω pentru valorile limita ale parametrului α_s .

Pe baza fig.5.3.4 ... 5.3.6 rezulta valorile "critice" ale parametrilor PC care fac ca valorile (pozitive ale) lui G_{11}^{IE} și $\det(\underline{Q}^{IE})$ sa fie minime:

$$\alpha_y = 0.3, K_{qh}^* = 0.3. \quad (5.3.30)$$

Aplicarea celei de-a III-a etape a primului procedeu de verificare a stabilității depinde de varianta de regulator fuzzy de tip cvasi-PI cu integrare pe ieșire (RG-F-PI-IE) luata în considerare. Alegând relația (5.2.48) pentru studiul de caz considerat:

$$\beta = 0 \quad (5.3.31)$$

și verificând condiția (5.2.48) prin simularea numerică a comportării SRA pentru regimul (2.1.2) și valorile "critice" ale parametrilor PC conform relațiilor (5.3.11), (5.3.16) și (5.3.30), se obțin următoarele domenii de valori ale parametrilor liberi ai reguletoarelor care garantează stabilitatea SRA cu RG-F:

- pentru cazul *RG-F-PI-IE în varianta standard*: $B_e \in [0.17; 0.84]$;
- pentru cazul *RG-F-PI-IE cu baza de reguli modificata*: $B_e \in [0.2; 0.81]$;
- pentru cazul *RG-F-PI-IE cu baza de reguli modificata și distribuție modificata a funcțiilor de apartenență aferente termenilor lingvistici ai comenzii*: $B_e \in [0.18; 0.83]$; $m \in [0.09; 0.54]$, $n \in [0.28; 0.75]$, $p \in [0.81; 1.22]$;
- pentru cazul *RG-F-PI-IE cu structura variabila*: $B_e^{(1)} \in [0.16; 0.82]$, $B_e^{(2)} \in [0.19; 0.8]$;
- pentru cazul *RG-F-PI-IE cu viteza de integrare variabila în funcție de valoarea actuala a erorii de reglare și de valoarea actuala a incrementului erorii de reglare*: $B_e \in [0.15; 0.84]$, $B_e' \in [0.14; 0.48]$;
- pentru cazul *RG-F-PI-IE cu viteza de integrare variabila în funcție de valoarea actuala a erorii de reglare și de valoarea anterioara a comenzii*: $B_e \in [0.2; 0.81]$, $B_e' \in [0.16; 0.45]$;
- pentru cazul *RG cu acordare fuzzy a parametrilor unui algoritm de reglare numerica de tip PI în varianta cvasicontinuala incrementală în funcție de valoarea actuala a erorii de reglare și de valoarea actuala a incrementului erorii de reglare*: $B_e^p \in [0.12; 0.5]$, $B_e^l \in [0.15; 0.48]$, $B_{kp}^{ps} \in [0.36; 0.72]$, $B_{kp}^{pm} \in [0.94; 1.32]$, $B_{kp}^{pb} \in [1.78; 2.55]$, $B_{ki}^{ps} \in [0.0008; 0.0012]$, $B_{ki}^{pm} \in [0.007; 0.015]$, $B_{ki}^{pb} \in [0.015; 0.031]$;
- pentru cazul *RG cu acordare fuzzy a doi parametri ai unui algoritm de reglare numerica în varianta cvasicontinuala bazat pe urmărirea unui model matematic de referință al procesului condus în funcție de valoarea actuala a erorii de reglare și de valoarea actuala a incrementului erorii de reglare*: $B_e^0 \in [0.12; 0.51]$, $B_e^1 \in [0.14; 0.49]$, $B_{q0}^{ps} \in [0.81 \cdot 10^{-4}; 1.23 \cdot 10^{-4}]$, $B_{q0}^{pm} \in [1.05 \cdot 10^{-4}; 1.43 \cdot 10^{-4}]$, $B_{q0}^{pb} \in [2.12 \cdot 10^{-4}; 2.93 \cdot 10^{-4}]$, $B_{q1}^{ps} \in [0.09; 0.53]$, $B_{q1}^{pm} \in [0.25; 0.35]$, $B_{q1}^{pb} \in [0.31; 0.45]$;
- pentru cazul *RG cu acordare fuzzy a parametrilor unui algoritm de reglare numerica de tip PI în varianta cvasicontinuala în funcție de valoarea actuala a erorii de reglare și de valoarea actuala a incrementului erorii de reglare și filtrare a comenzii*: $B_e^p \in [0.08; 0.53]$, $B_e^l \in [0.11; 0.48]$,

$$B_{KP}^{PS} \in [2.1; 2.88], B_{KP}^{PM} \in [4.03; 5.98], B_{KP}^{PB} \in [8.2; 12.3], B_{KI}^{PS} \in [0.017; 0.023], \\ B_{KI}^{PM} \in [0.032; 0.048], B_{KI}^{PB} \in [0.072; 0.088];$$

- pentru cazul *RG* cu acordare fuzzy a formelor funcțiilor de apartenență aferente termenilor lingvistici ai intrarilor și țesirii unui *RG-F-PI-IE* standard în funcție de valoarea actuala a erorii de reglare: $B_e^{AF} \in [0.19; 0.83]$, $B_{Be}^{PS} \in [0.11; 0.45]$, $B_{Be}^{PM} \in [0.31; 0.74]$, $B_{Be}^{PB} \in [0.51; 0.96]$;

- pentru cazul *RG* cu acordare fuzzy a coeficientului de transfer al unui *RG-F-PI-IE* standard în funcție de valoarea actuala a erorii de reglare: $B_e \in [0.18; 0.84]$, $B_e^{AF} \in [0.25; 0.86]$, $B_{kR}^{PS} \in [0.91; 1.34]$, $B_{kR}^{PM} \in [1.33; 1.72]$, $B_{kR}^{PB} \in [2.48; 3.55]$.

b) **Cazul reguletoarelor fuzzy de tip cvasi-PI cu integrare pe intrare.** Etapa I de aplicare a primului procedeu de verificare a stabilității sistemelor de reglare fuzzy a proceselor cu faza neminima conduce la MM-ISI aferent PC-E sub forma relațiilor (5.2.15) și (5.2.16), în care matricile sunt exprimate conform relației (5.2.22).

La parcurgerea celei de-a II-a etape se calculeaza matricea de transfer aferenta PC-E, $H_d^{II}(z)$:

$$\underline{H}_d^{II}(z) = \begin{bmatrix} H_{11}^{II}(z) & H_{12}^{II}(z) \\ H_{21}^{II}(z) & H_{22}^{II}(z) \end{bmatrix}, \quad (5.3.32)$$

în care funcțiile de transfer $H_{11}^{II}(z)$, $H_{12}^{II}(z)$, $H_{21}^{II}(z)$ și $H_{22}^{II}(z)$ au respectiv expresiile:

$$H_{11}^{II}(z) = \frac{a_{13}^{IE} z + a_{12}^{IE} a_{23}^{IE} - a_{13}^{IE} a_{22}^{IE}}{(z - a_{11}^{IE})(z - a_{22}^{IE}) + z + a_{12}^{IE} - a_{22}^{IE}}, \quad (5.3.33)$$

$$H_{12}^{II}(z) = \frac{(z - a_{11}^{IE})(z - a_{22}^{IE})}{z(a_{13}^{IE} z + a_{12}^{IE} a_{23}^{IE} - a_{13}^{IE} a_{22}^{IE})}, \quad (5.3.34)$$

$$H_{21}^{II}(z) = \frac{(z - 1)(z - a_{11}^{IE})(z - a_{22}^{IE})}{z(a_{11}^{IE} z + a_{12}^{IE} - a_{22}^{IE})}, \quad (5.3.35)$$

$$H_{22}^{II}(z) = \frac{(z-1)(z - a_{11}^{IE})(z - a_{22}^{IE})}{z(a_{11}^{IE} z + a_{12}^{IE} - a_{22}^{IE})}, \quad (5.3.36)$$

Polinomul caracteristic aferent PC-E are expresia:

$$\mu^{II}(z) = (z - 1)(z - a_{11}^{IE})(z - a_{22}^{IE}) = z^3 + d_3^{IE} z^2 + d_2^{IE} z + d_1^{IE}. \quad (5.3.37)$$

Coefficienții care apar în relațiile (5.3.33) ... (5.3.37) au expresiile prezentate în relațiile (5.3.7) și (5.3.8).

Polii aferenți PC-E au expresiile:

$$p_1^{II} = 1, p_2^{II} = p_3^{IE} = e^{-\alpha \omega_c T_m}, p_4^{II} = p_4^{IE} = e^{-2T_e / K_{II}^* T_m}, \quad (5.3.38)$$

deci reprezinta trei dintre polii aferenți PC-E din cazul a) (al integrării pe ieșirea RG-F). Prin urmare, valorile "critice" ale parametrilor PC care determina cea mai accentuata apropiere a polilor p_2^{II} și p_3^{II} de frontiera domeniului de stabilitate sunt aceleași ca în cazul integrării pe intrarea RG-F:

$$\alpha_{\omega} = 0, K_{\text{ph}}^* = 1.3. \quad (5.3.39)$$

Pentru polul $p_1^{\text{II}} = 1$ matricea reziduurilor are expresia (5.3.40):

$$\underline{\text{Rez}}^{\text{II}} = \begin{bmatrix} 0 & \text{Rez}_{12}^{\text{II}} \\ 0 & \text{Rez}_{22}^{\text{II}} \end{bmatrix}, \quad (5.3.40)$$

de unde rezulta imediat ca matricea $\underline{\text{Rez}}^{\text{II}}$ este pozitiv semidefinita pentru orice valori acceptate ale parametrilor PC; deci, din acest punct de vedere nu apar valori "critice" ale parametrilor PC.

Matricea $\underline{G}_d^{\text{II}}(j\omega T_e)$, relația (5.2.38), are urmatoarea expresie:

$$\underline{G}_d^{\text{II}}(j\omega T_e) = \begin{bmatrix} G_{11}^{\text{II}}(j\omega T_e) & G_{12}^{\text{II}}(j\omega T_e) \\ G_{21}^{\text{II}}(j\omega T_e) & G_{22}^{\text{II}}(j\omega T_e) \end{bmatrix}, \quad (5.3.41)$$

cu elementele calculate pe baza relațiilor (5.3.42) ... (5.3.45):

$$G_{11}^{\text{II}}(j\omega T_e) = \frac{\alpha^{\text{II}}(\omega T_e)}{[p^{\text{II}}(\omega T_e)]^2 + [q^{\text{II}}(\omega T_e)]^2 + \beta^{\text{II}}(\omega T_e) + j \gamma^{\text{II}}(\omega T_e)}, \quad (5.3.43)$$

$$G_{12}^{\text{II}}(j\omega T_e) = \frac{\beta^{\text{II}}(\omega T_e) + j \gamma^{\text{II}}(\omega T_e)}{[p^{\text{II}}(\omega T_e)]^2 + [q^{\text{II}}(\omega T_e)]^2 + \beta^{\text{II}}(\omega T_e) - j \gamma^{\text{II}}(\omega T_e)}, \quad (5.3.44)$$

$$G_{21}^{\text{II}}(j\omega T_e) = \frac{\beta^{\text{II}}(\omega T_e) - j \gamma^{\text{II}}(\omega T_e)}{[p^{\text{II}}(\omega T_e)]^2 + [q^{\text{II}}(\omega T_e)]^2 + \delta^{\text{II}}(\omega T_e)}, \quad (5.3.45)$$

$$G_{22}^{\text{II}}(j\omega T_e) = \frac{\delta^{\text{II}}(\omega T_e)}{[p^{\text{II}}(\omega T_e)]^2 + [q^{\text{II}}(\omega T_e)]^2}, \quad (5.3.46)$$

in care:

$$\alpha^{\text{II}}(\omega T_e) = 2p^{\text{IE}}(\omega T_e)\{[a_{13}^{\text{IE}}\cos(2\omega T_e) + [a_{12}^{\text{IE}}a_{23}^{\text{IE}} - a_{13}^{\text{IE}}(1 + a_{22}^{\text{IE}})]\cos(\omega T_e) + a_{13}^{\text{IE}}a_{22}^{\text{IE}} - a_{12}^{\text{IE}}a_{23}^{\text{IE}}\} + 2q^{\text{IE}}(\omega T_e)\{a_{13}^{\text{IE}}\sin(2\omega T_e) + [a_{12}^{\text{IE}}a_{23}^{\text{IE}} - a_{13}^{\text{IE}}(1 + a_{22}^{\text{IE}})]\sin(\omega T_e)\}, \quad (5.3.46)$$

$$\beta^{\text{II}}(\omega T_e) = p^{\text{II}}(\omega T_e)\{(a_{13}^{\text{II}} + 1)\cos(2\omega T_e) + [a_{12}^{\text{IE}}(1 + a_{23}^{\text{IE}}) - a_{22}^{\text{IE}}(1 + a_{13}^{\text{IE}}) - 1]\cos(\omega T_e)\} + (a_{22}^{\text{IE}} - a_{11}^{\text{IE}}) + q^{\text{II}}(\omega T_e)\{(a_{13}^{\text{IE}} + 1)\sin(2\omega T_e) + [a_{12}^{\text{IE}}(1 + a_{23}^{\text{IE}}) - a_{22}^{\text{IE}}(1 + a_{13}^{\text{IE}}) - 1]\sin(\omega T_e)\}, \quad (5.3.47)$$

$$\gamma^{\text{II}}(\omega T_e) = p^{\text{II}}(\omega T_e)\{(1 - a_{13}^{\text{IE}})\sin(2\omega T_e) + [a_{12}^{\text{IE}}(1 - a_{23}^{\text{IE}}) + a_{13}^{\text{IE}}(2 - a_{22}^{\text{IE}}) - a_{22}^{\text{IE}} - 1]\sin(\omega T_e)\} - q^{\text{II}}(\omega T_e)\{(1 - a_{13}^{\text{IE}})\cos(2\omega T_e) + [a_{12}^{\text{IE}}(1 - a_{23}^{\text{IE}}) + a_{13}^{\text{IE}}(2 - a_{22}^{\text{IE}}) - a_{22}^{\text{IE}} - 1]\cos(\omega T_e)\} + a_{22}^{\text{IE}} - a_{11}^{\text{IE}}, \quad (5.3.48)$$

$$\delta^{II}(\omega T_e) = 2\{p^{II}(\omega T_e)[a_{11}^{IE}\cos(2\omega T_e) + (a_{12}^{IE}-a_{22}^{IE})\cos(\omega T_e)] + q^{II}(\omega T_e)[a_{11}^{IE}\sin(2\omega T_e) + (a_{12}^{IE}-a_{22}^{IE})\sin(\omega T_e)]\}, \quad (5.3.49)$$

$$p^{II}(\omega T_e) = \cos(3\omega T_e) + d_3^{IE}\cos(2\omega T_e) + d_2^{IE}\cos(\omega T_e) + d_1^{IE}, \quad (5.3.50)$$

$$q^{II}(\omega T_e) = \sin(3\omega T_e) + d_3^{IE}\sin(2\omega T_e) + d_2^{IE}\sin(\omega T_e). \quad (5.3.51)$$

Coefficienții din relațiile (5.3.46) ... (5.3.51) sunt exprimați detaliat conform relațiilor (5.3.7) și (5.3.8).

Și în acest caz se observa imediat (relațiile (5.3.41) ... (5.3.45)) ca matricea $\underline{G}_d^{II}(j\omega T_e)$ este hermitica și rămâne de verificat ca este pozitiv definita:

$$G_{11}^{II} > 0, \quad \det(\underline{G}^{II}) > 0, \quad (5.3.52)$$

pentru $\omega \in (0; 40\pi) \text{ sec}^{-1}$, unde cu G_{11}^{II} s-a notat elementul $G_{11}^{II}(j\omega T_e)$ al matricii $\underline{G}_d^{II}(j\omega T_e)$ și $\det(\underline{G}^{II})$ reprezintă determinantul lui $\underline{G}_d^{II}(j\omega T_e)$.

Dependențele valorilor lui G_{11}^{II} și $\det(\underline{G}^{II})$ în funcție de pulsația ω pentru diverse valori ale parametrilor PC se prezintă în fig.5.3.7 ... 5.3.9, după cum urmează:

- în fig.5.3.7a - pentru $\alpha_y = 0.3, K_{qh}^* = \alpha_\omega = 1$;
- în fig.5.3.7b - pentru $\alpha_y = 1.3, K_{qh}^* = \alpha_\omega = 1$;
- în fig.5.3.8a - pentru $K_{qh}^* = 0.3, \alpha_y = \alpha_\omega = 1$;
- în fig.5.3.8b - pentru $K_{qh}^* = 1.3, \alpha_y = \alpha_\omega = 1$;
- în fig.5.3.9a - pentru $\alpha_\omega = 0, \alpha_y = K_{qh}^* = 1$;
- în fig.5.2.9b - pentru $\alpha_\omega = 1, \alpha_y = K_{qh}^* = 1$.

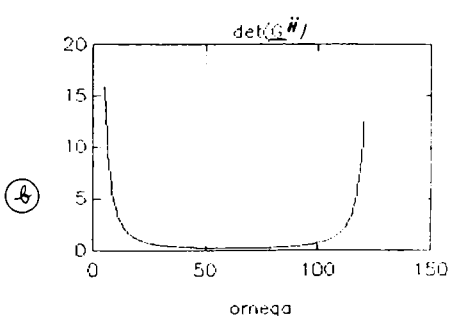
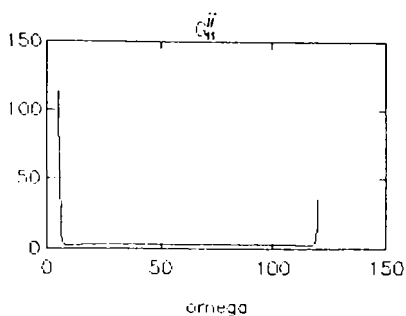
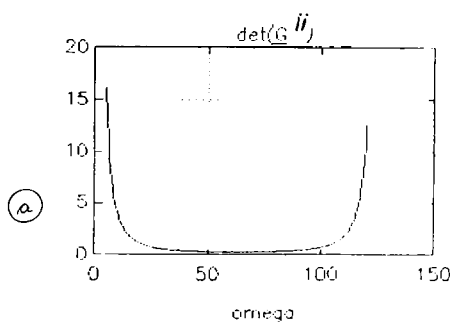
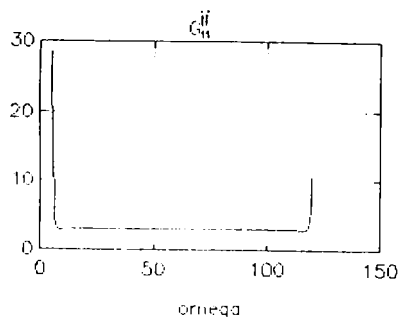


Fig.5.3.7. Dependențele valorilor lui G_{11}^{II} și $\det(\underline{G}^{II})$ în funcție de ω pentru valorile limita ale parametrului α_y .

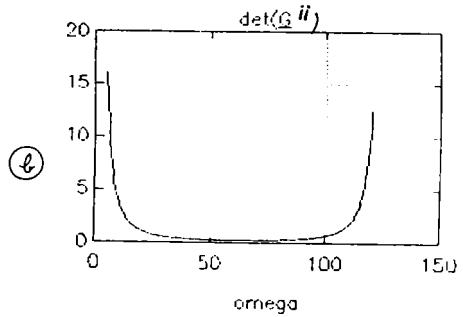
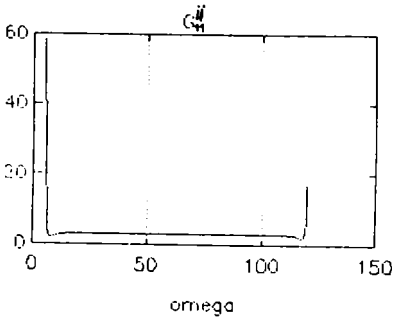
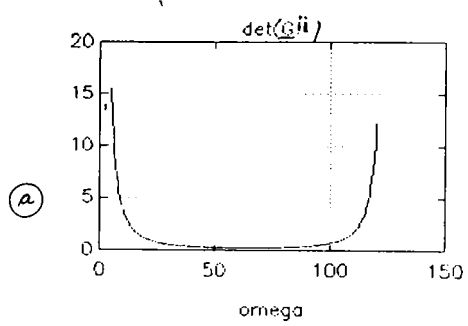
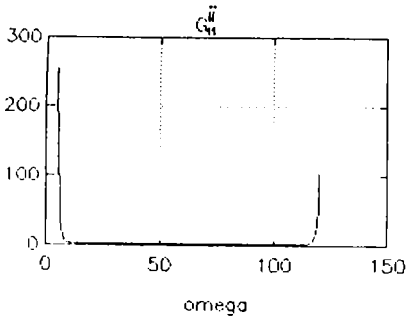


Fig. 5.3.8. Dependențele valorilor lui G_{11}^{ii} și $\det(G^{ii})$ în funcție de ω pentru valorile limita ale parametrului K_{qb} .

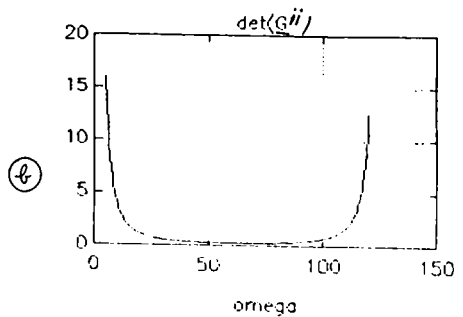
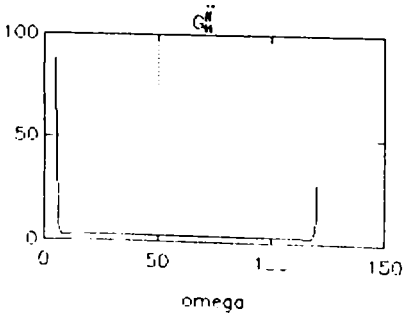
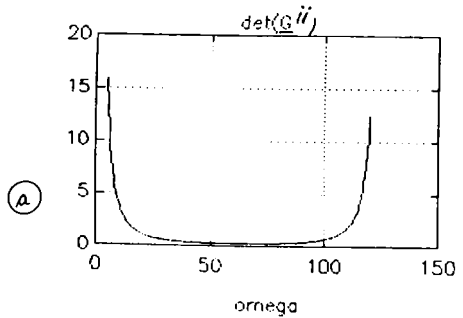
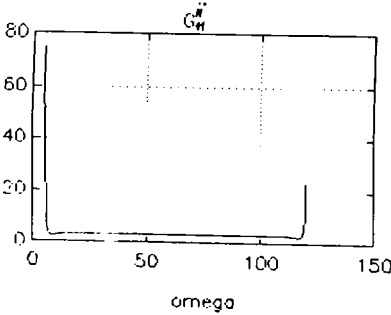


Fig. 5.3.9. Dependențele valorilor lui G_{11}^{ii} și $\det(G^{ii})$ în funcție de ω pentru valorile limita ale parametrului α_a .

Pe baza fig.5.3.7 ... 5.3.9 rezulta valorile "critice" ale parametrilor PC care determina valorile minime ale lui G_{11}^{II} și $\det(\underline{G}^{II})$:

$$\alpha_y = 0.3, K_{qh}^* = 1.3, \alpha_\omega = 0. \quad (5.3.53)$$

Aplicarea celei de-a III-a etape a primului procedeu de verificare a stabilității consta în alegerea valorii parametrului β conform relației (5.3.31). În continuare, pentru valorile critice ale parametrilor PC din relațiile (5.3.39) și (5.3.53) se verifica inegalitatea (5.2.48) prin simularea numerică a comportării SRA și se obțin următoarele domenii pentru parametrii liberi ai reguletoarelor fuzzy de tip cvasi-PI cu integrare pe intrare (RG-F-PI-II) care asigura stabilitatea SRA:

- pentru cazul *RG-F-PI-II în varianta standard*: $B_e \in [0.21; 0.78]$;
- pentru cazul *RG-F-PI-II cu baza de reguli modificata*: $B_e \in [0.23; 0.71]$;
- pentru cazul *RG-F-PI-II cu baza de reguli modificata și distribuție modificata a funcțiilor de apartenență aferente termenilor lingvistici ai comenzii*: $B_e \in [0.22; 0.79]$; $m^* \in [0.58; 1.04]$, $n^* \in [0.73; 1.15]$, $p^* \in [0.84; 1.2]$;
- pentru cazul *RG-F-PI-II cu structura variabila*: $B_e^{(1)} \in [0.24; 0.81]$, $B_e^{(2)} \in [0.25; 0.76]$;
- pentru cazul *RG cu acordare fuzzy a formelor funcțiilor de apartenență aferente termenilor lingvistici ai intrărilor și ieșirii unui RG-F-PI-II standard în funcție de valoarea actuala a erorii de reglare*: $B_e^{AF} \in [0.24; 0.85]$, $B_{bc}^{PS} \in [0.61; 0.95]$, $B_{bc}^{PM} \in [0.78; 1.11]$, $B_{bc}^{PB} \in [1.08; 1.47]$;
- pentru cazul *RG cu acordare fuzzy a coeficientului de transfer al unui RG-F-PI-II standard în funcție de valoarea actuala a erorii de reglare*: $B_e \in [0.19; 0.82]$, $B_e^{AF} \in [0.22; 0.74]$, $B_{kr}^{PS} \in [0.59; 1.07]$, $B_{kr}^{PM} \in [0.83; 1.05]$, $B_{kr}^{PB} \in [0.98; 1.37]$.

II. Aplicarea celui de-al doilea procedeu de verificare a stabilității sistemelor de reglare fuzzy a proceselor cu faza neminima.

Cel de-al doilea procedeu a fost prezentat și aplicat prin lucrarea (Preitl și Precup, 1996) obținându-se același rezultat ca în cazul aplicării primului procedeu.

Pentru a nu mari excesiv volumul tezei, se prezinta sintetic doar matricile care intervin în cadrul celei de-a II-a etape de aplicare a procedeuului; matricile corespund valorilor "nominale" ale parametrilor procesului condus (conform paragrafului 2.1).

a) Cazul reguletoarelor fuzzy de tip cvasi-PI cu integrare pe ieșire. Matricile care intervin în cea de-a II-a etapa de aplicare a procedeuului au următoarele expresii:

$$\underline{A}_s^{1B} = \begin{bmatrix} 0.9927 & 0.0072 & -0.0141 & 0 \\ 0 & 0.9555 & 0.1333 & 0 \\ 0 & 0 & 1 & 0 \\ 1 & 0 & 0 & 0 \end{bmatrix},$$

$$\underline{B}_a^{IR} = \begin{bmatrix} -0.0141 & 1 \\ 0.1333 & 1 \\ 1 & 1 \\ 0 & 1 \end{bmatrix}, \quad \underline{C}_a^{IR} = \begin{bmatrix} 1 & 0 & 0 & 0 \\ 1 & 0 & 0 & -1 \end{bmatrix}; \quad (5.3.54)$$

$$\underline{P} = \begin{bmatrix} 3 & -2 & -2 & -1 \\ -2 & 8 & -1 & -2 \\ -2 & -1 & 8 & -1 \\ -1 & -2 & -1 & 8 \end{bmatrix}, \quad (5.3.55)$$

cu valorile proprii :

$$\sigma(\underline{P}) = \{1.0139; 7; 8.8862; 10.0999\}; \quad (5.3.56)$$

$$\underline{L} = \begin{bmatrix} 0.0339 & 0.0995 & 0.0123 & -0.2959 \\ 0.0995 & 0.8301 & -0.5042 & -0.5947 \\ 0.0123 & -0.5042 & 0.5459 & -0.3775 \\ -0.2959 & -0.5947 & -0.3775 & 2.729 \end{bmatrix}, \quad (5.3.57)$$

$$\underline{V} = \begin{bmatrix} -10^4 & -10^3 \\ -10^4 & -10^3 \\ -10^3 & -10^4 \\ -10^3 & -10^4 \end{bmatrix};$$

$$\underline{M} = \begin{bmatrix} 0.0987 & 0.2556 & 0.0687 & -0.8813 & -1052.1 & 2700.3 \\ 0.2556 & 1.3069 & -0.4681 & -1.9556 & -8197 & 10059 \\ 0.0687 & -0.4681 & 0.6949 & -0.94 & 4750.4 & -1191.8 \\ -0.8813 & -1.9556 & -0.94 & 8.0309 & 6554.1 & -22622 \\ -1052.1 & -8197 & 4750.4 & 6554.1 & 2.02 \cdot 10^8 & 4 \cdot 10^7 \\ 2700.3 & 10059 & -1191.8 & -22622 & 4 \cdot 10^7 & 2.02 \cdot 10^8 \end{bmatrix}, \quad (5.3.58)$$

cu spectrul :

$$\sigma(\underline{M}) = \{1.81 \cdot 10^{-7}; 2.6 \cdot 10^{-7}; 0.4323; 5.3181; 1.62 \cdot 10^8; 2.42 \cdot 10^8\}. \quad (5.3.59)$$

b) Cazul reguletoarelor fuzzy de tip cvasi-PI cu integrare pe intrare. Matricile care intervin in cea

de-a II-a etapa de aplicare a procedurii au urmatoarele expresii:

$$\underline{A}_d^{II} = \begin{bmatrix} 0.9927 & 0.0072 & 0 \\ 0 & 0.9555 & 0 \\ 0.9927 & 0.0072 & 1 \end{bmatrix},$$

$$\underline{B}_d^{II} = \begin{bmatrix} -0.0141 & 1 \\ 0.1333 & 1 \\ -0.0141 & 1 \end{bmatrix}, \quad \underline{C}_d^{II} = \begin{bmatrix} 1 & 0 & 0 \\ 0 & 0 & 1 \end{bmatrix}; \quad (5.3.60)$$

$$\underline{P} = \begin{bmatrix} 3 & -2 & -1 \\ -2 & 8 & -1 \\ -1 & -1 & 8 \end{bmatrix}, \quad (5.3.61)$$

cu valorile proprii :

$$\sigma(\underline{P}) = \{2.024; 7.8512; 9.1248\}; \quad (5.3.62)$$

$$\underline{L} = \begin{bmatrix} 0.7728 & 0.1271 & -1.1018 \\ 0.1271 & 0.8569 & -0.1105 \\ -1.1018 & -0.1105 & 1.5769 \end{bmatrix}, \quad (5.3.63)$$

$$\underline{V} = \begin{bmatrix} -10^4 & -10^3 \\ -10^3 & -10^4 \\ -10^3 & -10^3 \end{bmatrix};$$

$$\underline{M} = \begin{bmatrix} 1.8274 & 0.3289 & -2.6031 & -6754.9 & -942.5 \\ 0.3289 & 0.7626 & -0.0409 & -2017.9 & -8585.4 \\ -2.6031 & -0.0409 & 3.713 & 9551.9 & 628.29 \\ -6754.9 & -2017.9 & 9551.9 & 1.02 \cdot 10^8 & 2.1 \cdot 10^7 \\ -942.5 & -8585.4 & 628.29 & 2.1 \cdot 10^7 & 1.2 \cdot 10^8 \end{bmatrix}, \quad (5.3.64)$$

cu spectrul :

$$\sigma(\underline{M}) = \{4.92 \cdot 10^{-5}; 7.65 \cdot 10^{-5}; 4.2176; 8.1 \cdot 10^7; 1.23 \cdot 10^8\}. \quad (5.3.65)$$

5.4. Concluzii

Plecând de la necesitatea ca încă din faza de proiectare trebuie alese anumite valori ale parametrilor liberi ai reguletoarelor fuzzy (cu dinamica) astfel încât să se asigure în primul rând stabilitatea sistemelor de reglare automata cu reguletoare fuzzy, în acest capitol s-au propus doua procedee de verificare a stabilității sistemelor de reglare fuzzy a proceselor (în particular, cu faza neminimă) bazate pe utilizarea teoriei hiperstabilității după Popov și a unui model matematic intrare-stare-ieșire cu timp discret aferent procesului condus considerat local liniar.

Cu referire la cele doua procedee prezentate se mai subliniază urmatoarele aspecte:

1) Cele doua procedee dau condiții suficiente care garantează stabilitatea SRA cu RG-F. Condițiile suficiente sunt exprimate sub forma unor domenii ale valorilor parametrilor liberi ai reguletoarelor fuzzy care asigură stabilitatea SRA. Pentru a determina domenii de valori ale parametrilor RG-F mai extinse se poate trece la simularea numerica a comportării SRA cu RG-F.

2) Fiind vorba despre o analiza calitativa a stabilității, prin cele doua procedee prezentate și testate în acest capitol nu se obțin indicații asupra performanțelor (de regim dinamic și de regim staționar) realizabile de SRA. Aceste indicații pot fi obținute numai pe baza experienței proiectantului referitoare la dezvoltarea reguletoarelor fuzzy.

3) Rezultatele obținute sunt confirmate de faptul ca la simularea numerica a comportării SRA pentru valori ale parametrilor RG-F situate în domeniile de stabilitate obținute rezulta comportamente care denota stabilitate.

Alegând de fapt și unele valori ale parametrilor RG-F în afara domeniilor obținute, simularile numerice efectuate dovedesc ca nu rezulta instabilitate.

4) Din cele cunoscute de autor, pentru SRA cu reguletor cu acordare fuzzy a parametrilor unui algoritim de reglare numerica de tip PI în varianta cvasicontinuala incrementală în funcție de parametrii primari ai PC stabilitatea se verifica numai experimental (prin simulare). În urma efectuării unui numar mare de simulări rezulta urmatoarele domenii de valori ale parametrilor liberi ai acestui reguletor care garantează stabilitatea SRA $B_{\omega} \in [0.21; 0.28]$, $B_k \in [0.25; 0.28]$, $B_{\omega\omega} \in [0.15; 0.23]$, $B_{KP}^{PVS} \in [0.013; 0.025]$, $B_{KP}^{PS} \in [0.12; 0.28]$, $B_{KP}^{PM} \in [0.33; 0.67]$, $B_{KP}^{PB} \in [0.7; 1.8]$, $B_{KP}^{PVB} \in [2.4; 5.7]$, $B_{KI}^{PVS} \in [0.00018; 0.00021]$, $B_{KI}^{PS} \in [0.0016; 0.0024]$, $B_{KI}^{PM} \in [0.0048; 0.0057]$, $B_{KI}^{PB} \in [0.006; 0.011]$, $B_{KI}^{PVB} \in [0.015; 0.042]$.

5) Prin aplicarea celor doua procedee propuse de verificare a stabilității se obțin practic aceleași margini ale valorilor parametrilor reguletoarelor fuzzy care garantează stabilitatea sistemelor de reglare automata din care fac parte aceste reguletoare.

6) Domeniile de valori obținute ale parametrilor liberi ai RG-F care garantează stabilitatea SRA cu RG-F sunt relativ largi. Aceasta se explica prin aceea ca toate RG luate în considerare sunt de tip cvasi-PI și au fost dezvoltate pornind de la un reguletor convențional (de tip PI) care a fost proiectat algoritmic în domeniul frecvența astfel încât să asigure o buna rezerva de faza (de $50^\circ \dots 55^\circ$) a sistemului de reglare

automata, mai mare decât cea uzuală recomandată în literatură (Pivovarov, 1973).

7) După cunoștințele autorului, cele două procedee propuse de verificare a stabilității sistemelor de reglare automata cu regulatoare fuzzy sunt originale; alte procedee mai laborioase de verificare a stabilității SRA cu RG-F - bazate pe teoria hiperstabilității după Popov - au fost propuse în (Opitz, 1993), (Böhm și Bosch, 1995). Cel de-al doilea procedeu este prezentat și în (Precup, 1996).

Cap. VI. CONCLUZII FINALE ȘI CONTRIBUȚII

6.1. Concluzii finale

Prin prezenta teza de doctorat se abordează domeniul de mare actualitate al implementării principiilor reglajului fuzzy în conducerea proceselor cu faza neminimă.

Dupa câte se cunoaște, aceste procese prezintă unele proprietăți care nu sunt avantajoase în conducere, ca de exemplu:

- faza caracteristicii faza-pulsație scade puternic la creșterea pulsației;
- comportarea în domeniul timp (explicitata, de exemplu, prin răspunsul indicial) se abate de la comportarea uzuală a proceselor cu faza minimă.

Actualitatea problematicii abordate rezidă în faptul că, pe de o parte, sistemele de conducere fuzzy constituie un domeniu relativ nou al conducerii (cu explozie științifică după 1985) într-o continuă dezvoltare și cu încă multe aspecte puțin studiate iar, pe de altă parte, din ce în ce mai multe firme oferă reglatoare fuzzy pentru aplicații din diferite domenii industriale sau neindustriale. Unul din aceste domenii este și cel al reglării turajului unui hidrogenator, la care modelul matematic aferent procesului condus poate fi redat cu bună aproximație printr-un sistem cu faza neminimă; în acest context, studiul aprofundat privind multiplele aspecte ale conducerii fuzzy a sistemelor cu faza neminimă este necesar și util atât din punct de vedere teoretic cât și din punct de vedere al unor implementări ulterioare în aplicații.

În literatura autorul nu a întâlnit o abordare sintetică a problemei conducerii fuzzy a sistemelor cu faza neminimă, aspectele specifice ale conducerii/dezvoltării regloatoarelor ce deriva din specificul comportării sistemelor cu faza neminimă nefiind sistematic studiate. Chiar și la congresele dedicate conducerii fuzzy, la care autorul a avut șansa să participe ((EUFIT, 1993), (EUFIT, 1994), (EUFIT, 1995)), problema este foarte puțin abordată, deși tehnica de conducere fuzzy a sistemelor cu faza neminimă nu decurge de la sine din conducerea fuzzy a sistemelor cu faza minimă.

Prin conținutul ei, teza dorește să clarifice cel puțin în parte aspectele esențiale ale conducerii fuzzy a sistemelor cu faza neminimă și să sugereze:

- principiile pentru dezvoltarea unor variante de reglatoare fuzzy performante, dedicate conducerii sistemelor cu faza neminimă,
- recomandări privind alegerea și utilizarea acestor reglatoare.

În acest sens, în capitolele III și IV au fost dezvoltate structuri de reglatoare fuzzy cu eficiența sporită în conducerea sistemelor cu faza neminimă.

Observație: Structurile de reglatoare fuzzy dezvoltate pot fi utilizate și la conducerea sistemelor cu faza minimă după efectuarea unor operații de adaptare adecvate.

Din studiul referitor la implementarea regloatoarelor care au fost dezvoltate (enumerare și în paragraful 6.2 referitor la contribuțiile originale ale autorului) au rezultat recomandări utile privind utilizarea

acestor regulatoare. În acest sens, bazat pe un criteriu de comparare introdus în paragraful 2.1, a fost inclusă și o ordonare a acestor regulatoare; astfel, se constată că în ansamblu (în raport cu modificările referinței, perturbației și parametrilor procesului condus) "cel mai bun" comportament al sistemului de reglare automată prezentat îl asigură regulatorul cu acordare fuzzy a parametrilor unui algoritm de reglare numerică de tip PI în varianta cvasicontinuală incrementală în funcție de parametrii primari ai procesului condus (paragraful 6.2, aliniatul 3.2).

Celelalte regulatoare fuzzy dezvoltate în cadrul tezei pot asigura comportamente bune ale sistemului de reglare automată oferind performanțe foarte bune relativ în special la anumiți indicatori de calitate. În sinteza, prin studii prezentate se pun în evidență regulatoarele care asigură cel mai bun comportament:

- în raport cu modificările referinței și perturbației:
 - regulatorul cu acordare fuzzy a coeficientului de transfer al unui regulator fuzzy de tip cvasi-PI cu integrare pe ieșire în varianta standard în funcție de valoarea actuală a erorii de reglare (paragraful 6.2, aliniatul 3.8),
 - regulatorul cu acordare fuzzy a doi parametri ai unui algoritm de reglare numerică în varianta cvasicontinuală bazat pe urmărirea unui model matematic de referință al procesului condus în funcție de valoarea actuală a erorii de reglare și de valoarea actuală a incrementului erorii de reglare (paragraful 6.2, aliniatul 3.3);
- în raport cu modificările parametrilor procesului condus:
 - regulatorul cu acordare fuzzy a coeficientului de transfer al unui regulator fuzzy de tip cvasi-PI cu integrare pe ieșire în varianta standard în funcție de valoarea actuală a erorii de reglare (paragraful 6.2, aliniatul 3.8),
 - regulatorul cu acordare fuzzy a formei funcțiilor de apartenență aferente termenilor lingvistici ai intrărilor și ieșirii unui regulator fuzzy de tip cvasi-PI cu integrare pe ieșire în varianta standard în funcție de valoarea actuală a erorii de reglare (paragraful 6.2, aliniatul 3.6).

Sintezele asupra recomandărilor privind ordinea preferențială sugerată de autor la alegerea regulatoarelor fuzzy care să asigure cele mai bune valori ale unor indicatori de calitate empirici ai sistemului de reglare automată (definiți în paragraful 2.1) au fost prezentate prin figura și tabelul din paragraful 4.4.

Dezvoltarea fiecărui regulator fuzzy a fost însoțită de verificarea stabilității sistemului de reglare automată care îl include. În acest sens, cele două procedee de verificare a stabilității sistemelor de reglare fuzzy a proceselor (în particular, cu faza neminimă) bazate pe utilizarea teoriei hiperstabilității (după Popov) și a unui model matematic intrare-stare-ieșire cu timp discret aferent procesului condus considerat local liniar dezvoltate în capitolul V pot constitui un suport util în dezvoltarea sistemelor de reglare automată cu regulatoare fuzzy.

Ca și concluzie generală a autorului - ce poate fi desprinsă din experiența dobândită pe parcursul elaborării tezei - este aceea că dezvoltarea reguletoarelor fuzzy destinate conducerii sistemelor cu fază neminimă necesită un volum mare de muncă legat de:

- definirea bazelor de reguli,
- alegerea valorilor parametrilor liberi ai reguletoarelor fuzzy,
- verificarea stabilității sistemelor de reglare automată cu reguletoare fuzzy.

Rezultatele obținute și experiența câștigată prin studiul efectuat pot constitui un suport real pentru o implementare facilă și rapidă a reglajului fuzzy în cazul conducerii sistemelor cu fază neminimă.

În cadrul tezei dezvoltarea reguletoarelor fuzzy, calculele și verificările au fost legate de un studiu de caz ce corespunde prin valorile numerice unei aplicații de proces cu fază neminimă, legat de reglarea turăției unui hidrogenator al centralei hidroelectrice Porțile de Fier I; modelul matematic simplificat adoptat corespunde modelelor matematice similare acceptate în literatură și utilizate - cel puțin în prima fază - în dezvoltarea structurilor de conducere. Rezultatele obținute pot fi aplicate și extinse relativ ușor și pentru alte amenajări hidroenergetice. Mai mult, în faza de dezvoltare se pot lua în considerare și modele matematice mai detaliate aferente procesului condus, care să surprindă pe lângă caracterul de sistem cu fază neminimă al procesului condus și alte aspecte legate de conducerea hidrogenatoarelor și de interconectarea hidrogenatoarelor cu sistemul energetic.

Rezultatele obținute pe calea simulării numerice demonstrează viabilitatea soluțiilor propuse și, în același timp, pot constitui un suport real pentru implementarea în aplicații a reguletoarelor fuzzy dezvoltate; algoritmi pot fi implementați efectiv fără probleme deosebite utilizând în prima fază modele de laborator mai mult sau mai puțin complexe (standuri de încercări); acest lucru necesită însă o dotare materială adecvată.

Eforturile de cercetare și de dotare materială adecvată pentru dezvoltarea unor structuri dedicate pot fi justificate prin aceea că:

- prin utilizarea reglajului fuzzy în variante mai mult sau mai puțin evaluate există posibilitatea îmbunătățirii performanțelor realizate de sistemele de reglare automată a proceselor cu fază neminimă;
- tendințele de ofertare de către firme a unor reguletoare prevăzute cu algoritmi fuzzy nu trebuie să surprindă în viitor beneficiarul intern.

Pași importanți ale tezei se bazează pe rezultatele unor cercetări prezentate în lucrări susținute și publicate în ultimii ani de autor - singur sau în colaborare - la manifestări științifice prestigioase din țară și de peste hotare. Lucrările elaborate și menționate deja pe parcursul tezei, alături de alte lucrări legate direct sau indirect de subiectul tezei (de exemplu, (Preitl și Precup, 1994b), (Precup și Preitl, 1995a), (Precup și Preitl, 1995b)) întregesc spectrul preocupărilor de cercetare ale autorului din ultimii patru ani.

6.2. Contribuții originale

Pornind de la prezentările din cadrul fiecărui capitol al tezei, în continuare se enumeră principalele contribuții originale aduse:

1. Elaborarea unei sinteze privind structurile "clasice" de conducere și metodele "clasice" de proiectare algoritmică a reguletoarelor, inclusiv de optimizare parametrică, dedicate conducerii proceselor cu faza neminimă; definirea, pe această bază, a cadrului în care se face ulterior compararea performanțelor realizate de sistemele de reglare automată cu variantele de reguletoare fuzzy dezvoltate în raport cu sistemele de reglare automată cu reguletoare în soluții "clasice" (capitolul II).

2. Dezvoltarea unor variante de reguletoare fuzzy care se dovedesc viabile pentru conducerea sistemelor cu faza neminimă:

- 2.1. *regulatorul fuzzy de tip cvasi-PI cu integrare pe intrare în varianta standard* (paragraful 3.2);
- 2.2. *regulatorul fuzzy de tip cvasi-PI cu integrare pe ieșire în varianta standard* (paragraful 3.2);
- 2.3. *regulatorul fuzzy de tip cvasi-PI cu integrare pe intrare cu baza de reguli modificată* (paragraful 3.3);
- 2.4. *regulatorul fuzzy de tip cvasi-PI cu integrare pe ieșire cu baza de reguli modificată* (paragraful 3.3);
- 2.5. *regulatorul fuzzy de tip cvasi-PI cu integrare pe intrare cu baza de reguli modificată și distribuție modificată a funcțiilor de apartenență aferente termenilor lingvistici ai comenzii* (paragraful 3.4);
- 2.6. *regulatorul fuzzy de tip cvasi-PI cu integrare pe ieșire cu baza de reguli modificată și distribuție modificată a funcțiilor de apartenență aferente termenilor lingvistici ai comenzii* (paragraful 3.4);
- 2.7. *regulatorul fuzzy de tip cvasi-PI cu integrare pe intrare cu structura variabilă* (paragraful 3.5);
- 2.8. *regulatorul fuzzy de tip cvasi-PI cu integrare pe ieșire cu structura variabilă* (paragraful 3.5);
- 2.9. *regulatorul fuzzy de tip cvasi-PI cu integrare pe ieșire cu viteza de integrare variabilă în funcție de valoarea actuală a erorii de reglare și de valoarea actuală a incrementului erorii de reglare* (paragraful 3.6);
- 2.10. *regulatorul fuzzy de tip cvasi-PI cu integrare pe ieșire cu viteza de integrare variabilă în funcție de valoarea actuală a erorii de reglare și de valoarea anterioară a comenzii* (paragraful 3.6).

Din cadrul acestora, variantele de reguletoare fuzzy din aliniatele 2.3, 2.4, 2.5, 2.6, 2.7 și 2.8 sunt - după cunoștințele autorului - originale.

Pentru reguletoarele din aliniatele 2.1, 2.2, 2.9 și 2.10 au fost preluate din literatura de specialitate

principiile generale de dezvoltare, autorul efectuând adaptarea lor la conducerea sistemelor cu faza neminimă. Ținând seama de comportarea specifică sistemelor cu faza neminimă, se menționează că această adaptare nu este însă imediată.

3. Dezvoltarea unor variante de structuri de reguloare cu acordare fuzzy a parametrilor unor reguloare convenționale și fuzzy dedicate conducerii sistemelor cu faza neminimă:

- 3.1. *regulatorul cu acordare fuzzy a parametrilor unui algoritm de reglare numerică de tip PI în varianta cvasicontinuuă incrementală în funcție de valoarea actuală a erorii de reglare și de valoarea actuală a incrementului erorii de reglare (paragraful 4.2.1);*
- 3.2. *regulatorul cu acordare fuzzy a parametrilor unui algoritm de reglare numerică de tip PI în varianta cvasicontinuuă incrementală în funcție de parametrii primari ai procesului condus (paragraful 4.2.2);*
- 3.3. *regulatorul cu acordare fuzzy a doi parametri ai unui algoritm de reglare numerică în varianta cvasicontinuuă bazat pe urmărirea unui model matematic de referință al procesului condus în funcție de valoarea actuală a erorii de reglare și de valoarea actuală a incrementului erorii de reglare (paragraful 4.2.3);*
- 3.4. *regulatorul cu acordare fuzzy a parametrilor unui algoritm de reglare numerică de tip PI în varianta cvasicontinuuă incrementală în funcție de valoarea actuală a erorii de reglare și de valoarea actuală a incrementului erorii de reglare și filtrare a comenzii (paragraful 4.2.3);*
- 3.5. *regulatorul cu acordare fuzzy a formelor funcțiilor de apartenență aferente termenilor lingvistici ai intrărilor și ieșirii unui regulator fuzzy de tip cvasi-PI cu integrare pe intrare în varianta standard în funcție de valoarea actuală a erorii de reglare (paragraful 4.3.1);*
- 3.6. *regulatorul cu acordare fuzzy a formelor funcțiilor de apartenență aferente termenilor lingvistici ai intrărilor și ieșirii unui regulator fuzzy de tip cvasi-PI cu integrare pe ieșire în varianta standard în funcție de valoarea actuală a erorii de reglare (paragraful 4.3.1);*
- 3.7. *regulatorul cu acordare fuzzy a coeficientului de transfer al unui regulator fuzzy de tip cvasi-PI cu integrare pe intrare în varianta standard în funcție de valoarea actuală a erorii de reglare (paragraful 4.3.2);*
- 3.8. *regulatorul cu acordare fuzzy a coeficientului de transfer al unui regulator fuzzy de tip cvasi-PI cu integrare pe ieșire în varianta standard în funcție de valoarea actuală a erorii de reglare (paragraful 4.3.2).*

După cunoștințele autorului, sunt în întregime originale reguloarele din aliniatele 3.2, 3.3, 3.4, 3.7 și 3.8.

Celelalte variante de reguloare propuse, aliniatele 3.1, 3.5 și 3.6, sunt parțial originale în sensul că au fost dezvoltate prin preluarea unor principii din literatura de specialitate referitoare la conducerea sistemelor cu faza minimă și adaptate (din nou, adaptarea nu este imediată) la specificul conducerii sistemelor

cu faza neminima.

4. Dezvoltarea a doua procedee de verificare a stabilității sistemelor de reglare automata prevazute cu regulatoare fuzzy bazate pe utilizarea teoriei hiperstabilității (dupa Popov) și a unui model matematic intrare-stare-ieșire cu timp discret aferent procesului condus considerat local liniar (paragraful 5.2).

Cele doua procedee formuleaza condiții suficiente care garanteaza stabilitatea sistemelor de reglare fuzzy. Drept rezultat se obțin domenii de valori pentru parametrii liberi ai regloatoarelor fuzzy care asigura stabilitatea sistemelor de reglare automata.

5. Exemplificarea variantelor de regulatoare și procedeeor de verificare a stabilității propuse pe un sistem cu faza neminima care poate fi considerat ca model matematic simplificat de ordin redus aferent reglării turajiei unui hidrogenator.

6. Realizarea de rutine și funcții specifice în mediul Matlab pentru:

- calculul legilor de reglare pentru toate variantele de regulatoare fuzzy dezvoltate;
- simularea comportarii tuturor sistemelor de reglare automata rezultate.

ANEXĂ. RUTINE ȘI FUNCȚII SPECIFICE MEDIULUI MATLAB UTILIZATE ÎN
SIMULAREA COMPORTĂRII SISTEMELOR DE REGLARE AUTOMATĂ
CU REGULATOARE FUZZY

Scopul acestei anexe îl constituie prezentarea cel puțin în parte a rutinelor și funcțiilor specifice mediului Matlab necesare simulării pe calculator numeric a comportării sistemelor de reglare automată cu regulatoare fuzzy și utilizate în cadrul tezei.

1. Funcția alful. Modelează un regulator fuzzy fără dinamica având ca intrări eroarea de reglare e_k (careia îi corespunde parametrul formal e) și incrementul erorii de reglare Δe_k (caruia îi corespunde parametrul formal de); ca ieșire se consideră incrementul comenzii Δu_k (notat în cele ce urmează cu du).

Fuzzificarea se realizează utilizând funcții de apartenență de tip triunghiular uniform distribuite cu grad de acoperire 1 pentru cele două intrări caracterizate prin parametrii B_e (caruia îi corespunde parametrul formal bae) și B_{de} (caruia îi corespunde parametrul formal $bade$) (a se vedea fig.3.2.2) și funcții de apartenență de tip singleton care trebuie definite în prealabil apelării funcției. Inferența se realizează pe baza metodei max-min a lui Mamdani asistată de o bază de reguli dată printr-un tabel de decizie caruia îi corespunde matricea ma (care trebuie furnizată funcției). Metoda de defuzzificare luată în considerare este cea a centrului de greutate pentru singletonuri.

Funcția poate fi utilizată la calculul legii de reglare în cazul tuturor legilor de reglare, urmând ca să se adauge liniile de program care corespund părții de dinamică a regulatorului.

Funcția `alful` poate fi descrisă prin următorul program:

```
function du=alful (ma,e,bae,de,bade)
%
%   Regulator fuzzy cu două intrări
%
n=2;
if e>0,
    for i=1:n,
        if e<=(n-i+1)*bae,
            mc1=-e/bae+n-i+1;
            ic1=2*n+1-i;
            mc2=e/bae-n+i;
            ic2=2*n+2-i;
        else
            end
    end
    if e>n*bae,
        mc1=1;
        ic1=2*n+1;
        mc2=1;
        ic2=2*n+1;
    else
        end
end
else
```

```
for i=1:n,
    if e<=(1-i)*bae,
        mc1=-e/bae-i+1;
        ic1=n+1-i;
        mc2=e/bae+i;
        ic2=n+2-i;
    else
        end
end
if e<=-n*bae,
mc1=1;
ic1=1;
mc2=1;
ic2=1;
else
end
end
if de>0,
    for i=1:n,
        if de<=(n-i+1)*bade,
            ml1=-de/bade+n-i+1;
            il1=i+1;
            ml2=de/bade-n+i;
            il2=i;
        else
            end
    end
    if de>n*bade,
ml1=1;
il1=1;
ml2=1;
il2=1;
else
end
else
    for i=1:n,
        if de<=(1-i)*bade,
            ml1=-de/bade-i+1;
            il1=2*n+i-1;
            ml2=de/bade+i;
            il2=2*n+i-2;
        else
            end
    end
    if de<-n*bade,
ml1=1;
il1=2*n+1;
ml2=1;
il2=2*n+1;
else
end
end
ml=min(ml1,mc1);
```

```
m2=min(m1,mc2);
m3=min(m1,mc1);
m4=min(m2,mc2);
sum=m1+m2+m3+m4;
du=m1*ma(il1,ic1)+m2*ma(il1,ic2)+m3*ma(il2,ic1)+m4*ma(il2,ic2);
du=du/sum;
end
```

2. Funcția alfu2. Este similară funcției alfu1, cu deosebirea că admite o singură intrare. Este utilizabilă la nivelul ierarhic superior al structurilor de reglare cu acordare fuzzy a parametrilor regloatoarelor convenționale și fuzzy și este caracterizată prin următorul program:

```
function du=alfu2(ma,e,bae)
%
%       Regulator fuzzy cu o intrare
%
n=2;
if e>0,
    for i=1:n,
        if e<=(n-i)*bae,
            mc1=-e/bae+n-i+1;
            ic1=2*n+1-i;
            mc2=e/bae-n+i;
            ic2=2*n+2-i;
        else
            end
    end
    if e>n*bae,
        mc1=1;
        ic1=2*n+1;
        mc2=1;
        ic2=2*n+1;
    else
        end
else
    for i=1:n,
        if e<=(1-i)*bae,
            mc1=-e/bae-i+1;
            ic1=n+1-i;
            mc2=e/bae+i;
            ic2=n+2-i;
        else
            end
    end
    if e<=-n*bae,
        mc1=1;
        ic1=1;
        mc2=1;
        ic2=1;
    else
        end
end
end
```

```
m1=min(1,mc1);
m3=min(1,mc2);
sum=m1+m3;
du=m1*ma(1,ic1)+m3*ma(1,ic2);
du=du/sum;
end
```

3. Funcția ec1. Calculeaza membrul drept al primei ecuații de stare aferente procesului condus (a se vedea relația (5.2.1)). Admite ca intrari comanda (parametrul formal u), perturbăția (parametrul formal v) și variabilele de stare x_1 (parametrul formal x1) și x_2 (parametrul formal x2). Ieșirea este dx1. Programul aferent este urmatorul:

```
function dx1=ec1(x1,x2,u,v);
%
% Prima ecuație de stare
%
% *** Parametrii procesului condus:
kqh=1;
alfo=1;
alfy=1;
Tm=6.8;
Tw=2.2;
dx1=-alfo*x1/Tm+alfy*x2/Tm-v/Tm-2*alfy*u/Tm;
end
```

4. Funcția ec2. Calculeaza membrul drept al celei de-a doua ecuații de stare aferente procesului condus. Este similara funcției ec2, admite ieșirea dx2 și îi corespunde programul:

```
function dx2=ec2(x1,x2,u,v);
%
% A doua ecuație de stare
%
% *** Parametrii procesului condus:
kqh=1;
alfo=1;
alfy=1;
Tm=6.8;
Tw=2.2;
dx2=-2*x2/kqh/Tw+6*u/kqh/Tw;
end
```

Pentru simularea comportării în ansamblu a sistemului de reglare automată se utilizează varianta de ordinul patru a metodei numerice Runge-Kutta pentru partea de proces. Pentru reducerea timpului de calcul se lucrează cu un pas de integrare fixat, deci fără corecție. Este de menționat faptul că procedând în acest mod nu se afectează precizia deoarece pasul de integrare egal cu perioada de eșantionare utilizată în conducerea evasicontinuala este suficient de mic.

În continuare se exemplifică doar două rutine considerate drept sugestive pentru simularea comportării

sistemelor de reglare automată cu regulatoare fuzzy.

1. Rutina de simulare numerică a comportării sistemului de reglare automată a unui proces cu fază neminimă cu regulator fuzzy de tip cvasi-PI cu integrare pe ieșire în varianta standard.

```
%
% *** Inițializări:
%
w=1;
v=0;
% v=0 și w=1 dacă se aplică perturbația
% v=1 și w=0 dacă se aplică referința
h=0.05;
% h ... perioada de eșantionare
n=1000;
% n ... număr de pași de simulare
alfo=1;
alfy=1;
ev=0;
% ev ... eroarea veche
uv=0;
% uv ... comanda veche
t(1)=0;
% t(i) ... vectorul timp
x1=0;
x2=0;
% s-a initializat vectorul de stare
y(1)=0;
% y(i) ... ieșirea reglată
m(1)=0;
% m(i) ... mărimea de execuție
% *** Parametri regulator:
kR=1.1;
Ti=6.8;
ki=kR*h/Ti;
kp=kR*(1-h/2/Ti);
ttt=ki/kp;
bae=0.5;
bade=ttt*bae;
bau=ki*bae;
% *** Baza de reguli:
ma=[0 bau 2*bau 3*bau 3*bau
-bau 0 bau 2*bau 3*bau
-2*bau -bau 0 bau 2*bau
-3*bau -2*bau -bau 0 bau
-3*bau -3*bau -2*bau -bau 0];
%
% *** Simulare:
for i=2:n,
en=w-y(i-1);
de=en-ev;
un=uv+alfo*(ma, en, bae, de, bade);
mm(i)=max(un, umin);
```



```
mm=m(i);
k11=h*ec1(x1,x2,mm,v);
k12=h*ec2(x1,x2,mm,v);
k21=h*ec1(x1+k11/2,x2+k12/2,mm,v);
k22=h*ec2(x1+k11/2,x2+k12/2,mm,v);
k31=h*ec1(x1+k21/2,x2+k22/2,mm,v);
k32=h*ec2(x1+k21/2,x2+k22/2,mm,v);
k41=h*ec1(x1+k31,x2+k32,mm,v);
k42=h*ec2(x1+k31,x2+k32,mm,v);
x1=x1+k11/6+k21/3+k31/3+k41/6;
x2=x2+k12/6+k22/3+k32/3+k42/6;
t(i)=(i-1)*h;
y(i)=x1;
ev=en;
uv=un;
end
% *** Afişare grafice:
pack
% plot(t,y,'w'),grid
subplot(211),plot(t,y,'w'),grid,title('ieşirea reglată
(y)'),xlabel('timp [sec]')
subplot(212),plot(t,m,'w'),grid,title('mărima de execuție
(m)'),xlabel('timp [sec]')
pause
end
```

2. Rutina de simulare numerică a comportării sistemului de reglare automată a unui proces cu fază neminimă cu regulator cu acordare fuzzy a formei funcțiilor de apartenență aferente termenilor lingvistici ai intrărilor și ieșirii unui regulator fuzzy de tip cvași-PI cu integrare pe ieșire în varianta standard.

```
%
% *** Inițializări:
%
w=0;
v=1;
% v=0 și w=1 dacă se aplică perturbația
% v=1 și w=0 dacă se aplică referința
h=0.05;
n=1000;
alfo=1;
alfy=1;
ev=0;
% ev ... eroarea veche
uv=0;
% uv ... comanda veche
t(1)=0;
% t(i) ... vectorul timp
x1=0;
x2=0;
% s-a inițializat vectorul de stare
y(1)=0;
% y(i) ... ieșirea reglată
```

```
m(1)=0;
% m(i) ... mărimea de execuție
% *** Parametri regulator:
kR=1.1;
Ti=6.8;
ki=kR*h/Ti;
kp=kR*(1-h/2/Ti);
ttt=ki/kp;
baer=0.5;
% *** Baza de reguli nivel supervizare:
mar=[0.3 0.5 0.7 0.5 0.3];
%
% *** Simulare:
for i=2:n,
en=w-y(i-1);
de=en-ev;
bae=alfu2(mar,en,baer);
bade=ttt*bae;
bau=ki*bae;
% *** Baza de reguli:
ma=[0 bau 2*bau 3*bau 3*bau
-bau 0 bau 2*bau 3*bau
-2*bau -bau 0 bau 2*bau
-3*bau -2*bau -bau 0 bau
-3*bau -3*bau -2*bau -bau 0];
un=uv+alfu1(ma,en,bae,de,bade);
m(i)=un;
mm=m(i);
k11=h*ec1(x1,x2,mm,v);
k12=h*ec2(x1,x2,mm,v);
k21=h*ec1(x1+k11/2,x2+k12/2,mm,v);
k22=h*ec2(x1+k11/2,x2+k12/2,mm,v);
k31=h*ec1(x1+k21/2,x2+k22/2,mm,v);
k32=h*ec2(x1+k21/2,x2+k22/2,mm,v);
k41=h*ec1(x1+k31,x2+k32,mm,v);
k42=h*ec2(x1+k31,x2+k32,mm,v);
x1=x1+k11/6+k21/3+k31/3+k41/6;
x2=x2+k12/6+k22/3+k32/3+k42/6;
t(i)=(i-1)*h;
y(i)=x1;
ev=en;
uv=un;
end
% *** Afișare grafice:
pack
% plot(t,y,'w'),grid
subplot(211),plot(t,y,'w'),grid,title('ieșirea reglată
(y)'),xlabel('timp [sec]')
subplot(212),plot(t,m,'w'),grid,title('mărimea de execuție
(m)'),xlabel('timp [sec]')
pause
end
```

Pe baza elementelor preluate din programele prezentate s-au realizat programele necesare simulării sistemelor de reglare automată ce includ toate variantele de reglatoare fuzzy dezvoltate. Aceste programe pot apela și două rutine - a căror prezentare nu prezintă interes - de calcul al indicatorilor de calitate empirici definiți în răspunsul indicial al sistemelor de reglare automată în raport cu referința respectiv în raport cu perturbația.

BIBLIOGRAFIE

- ANDERSON, P.M. și FOUAD, A.A. (1993): *Power System Control and Stability*, IEEE Press, New York.
- ARACIL, J., OLLERO, A. și GARCIA-CEREZO, A. (1989): "Stability Indices for the Global Analysis of Expert Control Systems", *IEEE Transactions on Systems, Man, and Cybernetics*, vol. 19, no. 5, pp. 998 - 1007.
- ÅSTRÖM, K.J. și WITTENMARK, B. (1989): *Adaptive Control*, Addison-Wesley, Reading (MA), Menlo Park (CA), New York.
- BATUR, C. și KASPARIAN, V. (1991): "Adaptive Expert Control", *International Journal of Control*, vol. 54, no. 4, pp. 867-881.
- BEATER, P. (1987): *Zur Regelung nichtlinearer Systeme mit Hilfe bilinearer Modelle*, VDI Verlag, Dusseldorf.
- BERENJI, H.R. (1993): "Fuzzy Logic and Neural Networks for Control Systems", Tutorial Presentation at The First EUFIT'93 European Congress, Aachen.
- BERENJI, H.R., CHEN, Y.-Y., LEE, C.-C., MURUGESAN, S. și JANG, J.-S. (1991): "An Experiment-based Comparative Study of Fuzzy Logic Control", *Proceedings of The American Control Conference*, pp. 2751 - 2753.
- BERNARD, J.A. (1991): "Power Cutbacks as an Alternative to Scrams: an Application of the MIT-SNL Period-Generated Minimum Time Control Laws", *IEEE Transactions on Nuclear Science*, vol. 38, no. 2, pp. 516 - 524.
- BOLL, M., BORNEMANN, J. și DÖRRSCHEIDT, F. (1994): "Anwendung der harmonischen Balance auf Regelkreise mit unsymmetrischen Fuzzy-Komponenten und konstante Eingangsgrößen", *Workshop "Fuzzy Control" des GMA-UA 1.4.2, Dortmund, Forschungsbericht no. 0194*, pp. 70 - 84.
- BOVERIE, S., DEMAYA, B., KETATA, R. și TITLI, A. (1992): "Performance Evaluation of Fuzzy Controllers", *Proceedings of The SICICA'92 International Symposium, Malaga*, pp. 105 - 110.
- BOVERIE, S., DEMAYA, B. și TITLI, A. (1991): "Fuzzy Logic Control Compared with Other Automatic Control Approaches", *Proceedings of The 30th IEEE Conference on Decision and Control, Brighton*, pp. 1212 - 1216.
- BÖHM, R. și BOSCH, M. (1995): "Stabilitätsanalyse von Fuzzy-Mehrgrößenregelungen mit Hilfe der Hyperstabilitätstheorie". *Automatisierungstechnik*, vol. 43, no. 4, pp. 181 - 186.
- BÖHM, R. și KREBS, V. (1993): "Ein Ansatz zur Stabilitätsanalyse und Synthese von Fuzzy-Regelungen", *Automatisierungstechnik*, vol. 43, no. 8, pp. 288 - 293.
- BRETTHAUER, G. și OPITZ, H.-P. (1994): "Stability of Fuzzy Systems - a Survey", *Proceedings of The Second EUFIT'94 European Congress, Aachen*, vol. 1, pp. 283 - 290.
- BÜHLER, H. (1994): *Réglage par logique floue*, Presses Polytechniques et Universitaires Romandes, Lausanne.
- CĂLIN, S. și DUMITRACHE, I. (1985): *Regulatoare automate*. Editura Didactica și Pedagogica, București.

- CĂLIN, S., TERTIȘCO, M., DUMITRACHE, I., POPEEA, C. și POPESCU, D. (1979): *Optimizari în automatizari industriale*, Editura Tehnica, București.
- CHUNYU, H.T., TOGUCHI, K., SHENOI, S. și FAN, L.T. (1990): "A Technique for Designing and Implementing Fuzzy Logic Control", *Proceedings of The American Control Conference*, pp. 2754 - 2755.
- DANCEA, I. (1976): *Metode de optimizare. Algoritmi - programe*, Editura Dacia, Cluj.
- DE GEEST, D., REHWALD, W., FUTTERLIEB, E. și TITLI, A. (1993): "Comparison of Algorithmic, Fuzzy and Neural Controllers Based on Application to an Inverted Pendulum", *Proceedings of The First EUFIT'93 European Congress, Aachen*, vol. 1, pp. 443 - 449.
- DE NEYER, M. și GOREZ, R. (1993): "Fuzzy and Quantitative Model-based Control Systems for Robotic Manipulators", *International Journal of Systems Science*, vol. 24, no. 10, pp. 1863 - 1883.
- DE SILVA, C.W. (1991): "Simulation Studies of an Analytical Fuzzy Tuner for a PID Servo", *Proceedings of The American Control Conference*, pp. 2100 - 2105.
- DIETZ, U. (1988): *Nichtlineare Zustandsregler für elektrohydraulische Servoantriebe*, VDI Verlag, Düsseldorf.
- DRAGOMIR, T.-L. (1986): *Reglatoare automate, Curs*, vol. 1, Litografia I.P.T.V.T., Timișoara.
- DRAGOMIR, T.-L. (1987): *Tehnici de optimizare, vol. 1, Curs*, Litografia I.P.T.V.T., Timișoara.
- DRAGOMIR, T.-L. și PREITL, ST. (1978): *Teoria sistemelor și reglaj automat, Curs*, Litografia I.P.T.V.T., Timișoara.
- DRIANKOV, D., HELLENDORRN, H. și REINFRANK, M. (1993): *An Introduction to Fuzzy Control*, Springer Verlag, Berlin, Heidelberg, New York.
- DUMITRACHE, I. (1980): *Tehnica reglării automate*, Editura Didactica și Pedagogica, București.
- DUMITRACHE, I., CĂLIN, S., BOȚAN, C. și NITU, C. (1982): *Automatizări și echipamente electronice*, Editura Didactica și Pedagogica, București.
- EUFIT (1993): *The First European Congress on Fuzzy and Intelligent Techniques*, editor: H.-J. Zimmermann, *Proceedings*, vol. 1 - 3, Verlag der Augustinus Buchhandlung, Aachen.
- EUFIT (1994): *The Second European Congress on Intelligent Techniques and Soft Computing*, editor: H.-J. Zimmermann, *Proceedings*, vol. 1 - 3, Verlag der Augustinus Buchhandlung, Aachen.
- EUFIT (1995): *The Third European Congress on Intelligent Techniques and Soft Computing*, editor: H.-J. Zimmermann, *Proceedings*, vol. 1 -3, Verlag Mainz, Aachen.
- GALICHET, S. și FOULLOY, L. (1993): "Fuzzy Equivalence of Classical Controllers", *Proceedings of The First EUFIT'93 European Congress, Aachen*, vol. 3, pp. 1567 - 1573.
- GARCIA-CEREZO, A. și OLLERO, A. (1992): "Stability of Fuzzy Control Systems by using Nonlinear System Theory", *Proceedings of The IFAC/ IFIP/IMACS Symposium on AI in Real-Time Control, Delft*, pp. 171 - 176.
- GEC ALSTHOM (1992): "Digipid 1000 - regulator de turajie destinat hidrogeneratoarelor", Neyrpic.

- GUZUN, B., MUCICHESCU, C. și CHIRACU, A. (1995): Automatizari în hidroenergetică, Editura Tehnica, București.
- HOPPE, M. (1981): "Die Regelung von Systemen mit Allpasseigenschaften - Dargestellt durch theoretische und experimentelle Untersuchungen einer Wasserkraftanlage", Schriftenreihe des Lehrstuhls für Mess- und Regelungstechnik, Abt. Maschinenbau, Ruhr-Universität Bochum, Heft 16, Bochum.
- HOPPE, M. și TEŠNJAK, S. (1983): "Modellbildung und Simulation des dynamischen Verhaltens von Wasserkraftanlagen", Schriftenreihe des Lehrstuhls für Mess- und Regelungstechnik, Abt. Maschinenbau, Ruhr-Universität Bochum, Heft 20, Bochum.
- HSU, Y.-Y. și CHAN, W.-CH. (1984): "Optimal Variable Structure Controller for DC Motor Speed Control", IEE Proceedings, vol. 131, pt. D, no. 6, pp. 233 - 237.
- HUTAREW, G. (1979): Regelungstechnik, Springer Verlag, Berlin.
- IONESCU, VL. (1985): Teoria sistemelor. Sisteme liniare, Editura Didactica și Pedagogica, București.
- ISAKA, S. și SEBALD, A.V. (1990): "An Optimization Approach to Fuzzy Controller Design", Proceedings of The American Control Conference, pp. 1485 - 1490.
- ISERMANN, R. (1977): Digitale Regelungssysteme, Springer Verlag, Berlin.
- KANG, H. (1993): "Stability and Control of Fuzzy Dynamic Systems via Cell-State Transitions in Fuzzy Hypercubes", IEEE Transactions on Fuzzy Systems, vol. 1, no. 4, pp. 267 - 279.
- KAWAJI, S., MAEDA, T. și MATSUNAGA, N. (1991): "Design of Fuzzy Control System Based on PD Control Scheme", Proceedings of The IFSA'91 World Congress, Brussels, vol. Engineering, pp. 77 - 80.
- KIENDL, H. (1993): "Harmonic Balance for Fuzzy Control Systems", Proceedings of The First EUFIT'93 European Congress, Aachen, vol. 1, pp. 127 - 141.
- KIENDL, H. și RÜGER, J. (1993): "Verfahren zum Entwurf und Stabilitätsnachweis von Regelungssystemen mit Fuzzy-Reglern", Automatisierungstechnik, vol. 41, no. 5, pp. 138 - 144.
- KLEFENZ, G. (1973): Die Regelung von Dampfkraftwerken, Bibliographisches Institut AG, Mannheim.
- KNOF, R. (1993): "Ein Konzept für Entwurf und Optimierung von Fuzzy-Regelungssystemen", Schriftenreihe des Lehrstuhls für Regelungssysteme und Steuerungstechnik, Abt. Maschinenbau, Ruhr-Universität Bochum, Heft 40, Bochum.
- KORTMANN, P. (1995): "Fuzzy Controllers Compared to Conventional Controllers", Proceedings of The EURACO Workshop, Florence, pp. 252 - 268.
- KÖCKEMANN, A., KONNERTZ, J. și LAUSCH, H. (1991): "Regelung elektrohydraulischer Antriebe unter Berücksichtigung industrieller Randbedingungen", Automatisierungstechnik, vol. 39, no. 6, pp. 187 - 196.
- KRUSE, R., GEBHARDT, J. și KLAWONN, F. (1993): Fuzzy Systeme, Teubner Verlag, Stuttgart.
- KUHN, T. și WERNSTEDT, J. (1995): "Fuzzy Adaptive Controlled PID Controllers", Proceedings of The Third EUFIT'95 European Congress, Aachen, vol. 2, pp. 889 - 896.

KUNG, C.-C. și CHEN, J.-Y. (1992): "A Novel Approach of Fuzzy Control", Proceedings of The IEEE-SI International Conference, pp. 612 - 615.

LARIONESCU, D. (1989): Metode numerice, Editura Tehnica, București.

LANDAU, I.D. (1979): Adaptive Control, Marcel Dekker, New York.

LEE, C.C. (1990a): "Fuzzy Logic Control in Control Systems: Fuzzy Logic Controller - Part I", IEEE Transactions on Systems, Man, and Cybernetics, vol.20, no.2, pp. 404-418.

LEE, C.C. (1990b): "Fuzzy Logic Control in Control Systems: Fuzzy Logic Controller - Part II", IEEE Transactions on Systems, Man, and Cybernetics, vol.20, no.2, pp. 419-435.

LEE, J. (1993a): "A Velocity Type Fuzzy Logic Controller with Intelligent Integrator", Proceedings of The First EUFIT'93 European Congress, Aachen, vol. 2, pp. 856 - 860.

LEE, J. (1993b): "On Methods for Improving Performance of PI-Type Fuzzy Logic Controllers", IEEE Transactions on Fuzzy Systems, vol. 1, no. 4, pp. 298 - 301.

LING, C. și EDGAR, T.F. (1992): "A New Fuzzy Gain Scheduling Algorithm for Process Control", Proceedings of The American Control Conference, pp. 2284 - 2290.

MAKKONEN, A. și KOIVO, H.N. (1995): "Autotuner for Fuzzy Controller - Relay Based Approach", Proceedings of The International Joint Conference and Symposium FUZZ-IEEE/IFES'95, Yokohama, pp. 1987 - 1994.

MATKO, D. și ŠKRJANC, I. (1995): "Fuzzy Adaptive Control of Time-Varying Processes", Proceedings of The Third EUFIT'95 European Congress, Aachen, vol. 2, pp. 823 - 830.

MATLAB (1987): Control System Toolbox, Mathworks Inc.

MATLAB (1989): Optimization Toolbox, Mathworks Inc.

MORARI, M. și ZAFIRIOU, E. (1989): Robust Process Control, Prentice Hall, Englewood Cliffs, N.J., 1989.

MÜLLER, H.-W. (1982): "Überlegungen zur digitalen Drehzahlregelung von Wasserturbinen", Schriftenreihe des Lehrstuhls für Mess- und Regelungstechnik, Abt. Maschinenbau, Ruhr-Universität Bochum, Heft 18, Bochum.

MÜLLER, H.-W. (1984): "Algorithmen für die digitale Drehzahlregelung von Wasserturbinen", Schriftenreihe des Lehrstuhls für Mess- und Regelungstechnik, Abt. Maschinenbau, Ruhr-Universität Bochum, Heft 23, Bochum.

NEGOIȚĂ, C.V. și RALESCU, D.A. (1974): Mulțimi vagi și aplicațiile lor, Editura Tehnica, București.

NOURESCU, AL. și VASILIU, AL. (1974): "Valorificarea energetica a resurselor hidraulice din România", Energetica, vol. 22, nr. 6-7, pp. 224 - 240.

OPITZ, H.-P. (1986a): "Die Hyperstabilitätstheorie - eine systematische Methode zur Analyse und Synthese nichtlinearer Systeme", Automatisierungstechnik, vol. 34, no. 65, pp. 221 - 230.

OPITZ, H.-P. (1986b): "Robustness Properties of Discrete Variable Structure Controllers", International

- Journal of Control, vol. 43, no. 3, pp. 1003 - 1014.
- OPITZ, H.-P. (1993): "Fuzzy - Control and Stability Criteria", Proceedings of The First EUFIT'93 European Congress, Aachen, vol. 1, pp. 130 - 136.
- PFEIFFER, B.-M. și ISERMANN, R. (1993a): "Criteria for Successful Application of Fuzzy Control", Proceedings of The First EUFIT'93 European Congress, Aachen, vol. 3, pp. 1403 - 1409.
- PFEIFFER, B.-M. și ISERMANN, R. (1993b): "Self-tuning of Classical Controllers with Fuzzy Logic", Proceedings of The IMACS Symposium on Mathematical and Intelligent Models in System Simulation, Brussels, pp. 101 - 110.
- PIVOVAROV, V.A. (1973): Proiectivovanie i rasciet sistem regulirovania gidroturbin, Maşinstroenie, Leningrad.
- PLESSMANN, K. (1967): "Regelung von Strecken mit Allpassanteil", Regelungstechnik, no. 5, H2, pp. 60 - 66.
- POHL, M. (1988): "Digitale Regelung vom Maschinensätzen einer Wasserkraftanlage mit robusten und gesteuert-parameteradaptiven Algorithmen", Schriftenreihe des Lehrstuhls für Mess- und Regelungstechnik, Abt. Maschinenbau, Ruhr-Universität Bochum, Heft 30, Bochum.
- POSTLETHWAITE, B.E. (1994): "A Self-learning Model-based Fuzzy Controller", Proceedings of The Second EUFIT'94 European Congress, Aachen, vol. 2, pp. 757 - 761.
- PRECUP, R.-E. (1994): "Structuri moderne de reglare automata a turajiei hidrogenatoarelor. Modelarea matematica a proceselor", Referat de doctorat nr. 1, U.T.T., Timișoara.
- PRECUP, R.-E. (1995a): "Soluții de implementare a reguloarelor de turajie aferente hidrogenatoarelor", Referat de doctorat nr. 2, U.T.T., Timișoara.
- PRECUP, R.-E. (1995b): "On the Parameter Adaptation of a Fuzzy Controller Meant for the Speed Control of Hydrogenerators", Proceedings of The Third EUFIT'95 European Congress, Aachen, vol. 2, pp. 1105 - 1109.
- PRECUP, R.-E. (1996): "Stability Aspects Concerning Fuzzy Control Systems Containing Fuzzy Controllers with Dynamics", Proceedings of The Second ICAFS-96 International Conference, Siegen (lucrare acceptata, in curs de publicare).
- PRECUP, R.-E. și PREITL, ST. (1993): "Fuzzy Control of an Electrohydraulic Servosystem under Nonlinearity Constraints", Proceedings of The First EUFIT'93 European Congress, Aachen, vol. 3, pp. 1524 -1530.
- PRECUP, R.-E. și PREITL, ST. (1994a): "Fuzzy Control Algorithms Implementation for a Synchronous Generator Connected to a Power System", Preprints of The IFAC Conference on Integrated Systems Engineering, Baden-Baden, editor: G. Johanssen, Pergamon, pp. 83 - 92.
- PRECUP, R.-E. și PREITL, ST. (1994b): "Fuzzy Controller Equivalent to the Digital PID Predictor Controller", Proceedings of The Second EUFIT'94 European Congress, Aachen, vol. 2, pp. 968 - 971.
- PRECUP, R.-E. și PREITL, ST. (1994c): "Four Fuzzy Control Approaches to the Design of Speed Controllers for Hydrogenerators", Simpozionul Național SINTES-7, Craiova, vol. 1, pp. 90 - 97.

PRECUP, R.-E. și PREITL, ST. (1995a): "On the Fuzzy Tuning of a Hydrogenerator Conventional Speed Controller Based on Human Experience", Preprints of The Fifth IFAC Symposium on Automated Systems Based on Human Experience, Berlin, editor: D. Brandt, vol. 2, pp. 68 - 73.

PRECUP, R.-E. și PREITL, ST. (1995b): "On the Treatment of Predictive Component for PID Fuzzy Controllers", Proceedings of The Sixth IFSA World Congress, Sao Paolo, vol. 1, pp. 573 - 576.

PRECUP, R.-E. și PREITL, ST. (1995c): Sisteme de reglare avansata, Curs, vol. 1, Litografia U.P.T., Timișoara.

PREITL, ST. (1987): "Integral Indices Using in Speed Governors Parameters Adjustment", Buletinul Științific și Tehnic al I.P.T.V.T., Seria Electrotehnica, tom 32 (46), pp. 95 - 98.

PREITL, ST. (1988): "Aspecte ale modelării matematice a sistemelor de reglare automată a vitezei hidrogeneratoarelor", Simpozionul Național de Calculatoare și Conducere Automată a Proceselor, Timișoara, pp. 99 - 102.

PREITL, ST. (1992): Teoria sistemelor și reglaj automat, Curs, Partea I, Teoria sistemelor I, Litografia U.T.T., Timișoara.

PREITL, ST. și DADAY, H. (1987): "Complex Studies for Speed Governors Implementation in Water Power Stations", Proceedings of The 7th ICCS International Conference, București, pp. 290 - 294.

PREITL, ST., ONEA, D. și GRANDO, I. (1983): "Modele matematice pentru reglatoare de viteză electrohidraulice destinate echipării turbinelor hidraulice și posibilități de identificare în centrală", Construcția de mașini, vol. 35, nr. 11, pp. 558 - 565.

PREITL, ST. și PRECUP, R.-E. (1994a): "Trends in the Study and Practice of Fuzzy Control", Proceedings of The First ConTI'94 International Conference, Timișoara, vol. 3, pp. 90 - 95.

PREITL, ST. și PRECUP, R.-E. (1994b): "Comparison of Three State Feedback Controllers. Why Fuzzy Control?", Proceedings of The Second EUFIT'94 European Congress, Aachen, vol. 3, pp. 1383 - 1387.

PREITL, ST. și PRECUP, R.-E. (1995): "Approach to the Predictive Component Treatment for Fuzzy Controllers", Proceedings of The Third EUFIT'95 European Congress, Aachen, vol. 2, pp. 1082 - 1086.

PREITL, ST. și PRECUP, R.-E. (1996): "Control System Stability Analysis Based on Fuzzy Controller with Dynamics and Reduced Order Plant", Proceedings of The Second ICAFS-96 International Conference, Siegen (lucrare acceptata, în curs de publicare).

PREITL, ST., PRECUP, R.-E. și FOGARAȘI, A. (1993a): "Control Algorithms for the Electrohydraulic Servosystem of a Speed Governor", Proceedings of The 13th HYDROTURBO International Conference, Brno, vol. 2, pp. 321 - 330.

PREITL, ST., PRECUP, R.-E. și FOGARAȘI, A. (1993b): "State Control Algorithms for an Electrohydraulic Servosystem", Buletinul Științific și Tehnic al U.T.T., Seria Automatica și Calculatoare, tom 38 (52), pp. 67 - 76.

PREITL, ST., PRECUP, R.-E. și FOGARAȘI, A. (1993c): "Dezvoltarea unor algoritmi de reglare bazați pe teoria mulțimilor vagi", Raport de cercetare, Contract M.I. nr. 5004/C. Tema 34/1993, U.T.T., Timișoara.

PREITL, ST., PRECUP, R.-E. și PORUMB, A. (1996): Elemente de reglare automată, Curs, Vol. 1,

Litografia U.P.T., Timișoara.

PREUB, H.-P. (1992a): "Fuzzy Control - heuristische Regelung mittels unscharfer Logik - Teil 1", Automatisierungstechnische Praxis, vol. 34, no. 4, pp. 176 - 184.

PREUB, H.-P. (1992b): "Fuzzy Control - heuristische Regelung mittels unscharfer Logik - Teil 2", Automatisierungstechnische Praxis, vol. 34, no. 5, pp. 239 - 246.

RASVAN, VL. (1987): Teoria stabilității, Editura Științifică și Enciclopedică, București.

SHEEL, TH. (1995): "Verallgemeinerte Integrale Ljapunov Funktionen und ihre Anwendung zur Stabilitätsanalyse von Fuzzy-Systeme", Workshop "Fuzzy Control" des GMA-UA 1.4.2, Dortmund, Forschungsbericht no. 0295, pp. 99 - 113.

SIMA, V. și VARGA, A. (1986): Practica optimizării asistate de calculator, Editura Tehnica, București.

SOSA, J., BABUŠKA, R. și VERBRUGGEN, H.-B. (1995): "Adaptive Fuzzy Model-based Control", Proceedings of The Third EUFIT'95 European Congress, Aachen, vol. 2, pp. 865 - 869.

STEIN, T. (1972): "Die optimale Regelung von Wasserturbinen", Schweizerische Bauzeitung, no. 6, pp. 25 - 30.

SURMANN, H., UNGERING, A.P., KETTNER, T. și GOSER, K. (1994): "What Kind of Hardware is Necessary for a Fuzzy Rule Based System ?", Proceedings of The Third International Conference on Fuzzy Systems FUZZ-IEEE'94, Orlando, Florida, pp. 274 - 278.

SYDOW, A. (1974): Programmierungstechnik für elektronische Analogrechner, VEB Verlag Technik, Berlin.

TILLI, TH. (1991): Fuzzy-Logik, Franzis Verlag, München.

TZAFESTAS, S.G. și PAPANIKOLOPOULOS, N. (1990): "Incremental Fuzzy Expert PID Control", IEEE Transactions on Industrial Electronics, vol. 37, no. 5, pp. 365 - 371.

VOICU, M. (1986): Tehnici de analiza a stabilității sistemelor automate, Editura Tehnica, București.

WORKING GROUP ON PRIME MOVER AND ENERGY MODELS FOR SYSTEM DYNAMIC PERFORMANCE STUDIES (1992): "Hydraulic Turbine and Turbine Control Models for System Dynamic Studies", IEEE Transactions on Power Systems, vol. 7, no. 1, pp. 167 - 178.

WOSCHNI, E.G. (1973): Informationstechnik, VEB Verlag Technik, Berlin.

ZADEH, L.-A. (1963): "Fuzzy Sets", Information and Control", vol.8, no.6, pp. 338-353.

ZHAO, Z.-Y., TOMIZUKA, M. și ISAKA, S. (1993): "Fuzzy Gain Scheduling of PID Controllers", IEEE Transactions on Systems, Man, and Cybernetics, vol. 23, no. 5, pp. 1392 - 1398.

ZHAO, Z.-Y., TOMIZUKA, M. și SAGARA, S. (1992): "A Fuzzy Tuner for Fuzzy Logic Controllers", Proceedings of The American Control Conference, pp. 2268 - 2272.

ZIMERMANN, H.-J. (1985): Fuzzy Set Theory and Its Applications, Kluwer Academic Publishers, Boston.