

Prezentare

Universitatea Tehnică din Cluj Napoca
Facultatea de Automatică și Calculatoare
Specializarea Automatică și Informatică Aplicată

Proiect de semestrul I la disciplina Conducerea Proceselor Industriale

Proiectul este realizat în cadrul unei lucrări de cercetare și dezvoltare.

Scopul proiectului este să se analizeze și se optimizeze un sistem electro-energetic radial.

Scopul final este să se obțină un sistem de generare și transmisie de energie mai eficient și mai sigur.

Scopul specific este să se analizeze și se optimizeze un sistem electro-energetic radial.

Proiect de semestrul I

Scopul general al proiectului este să se analizeze și se optimizeze un sistem electro-energetic radial.

Scopul specific este să se analizeze și se optimizeze un sistem electro-energetic radial.

Scopul final este să se obțină un sistem de generare și transmisie de energie mai eficient și mai sigur.

Scopul specific este să se analizeze și se optimizeze un sistem electro-energetic radial.

Scopul final este să se obțină un sistem de generare și transmisie de energie mai eficient și mai sigur.

Scopul general al proiectului este să se analizeze și se optimizeze un sistem electro-energetic radial.

Scopul specific este să se analizeze și se optimizeze un sistem electro-energetic radial.

Scopul final este să se obțină un sistem de generare și transmisie de energie mai eficient și mai sigur.

Scopul general al proiectului este să se analizeze și se optimizeze un sistem electro-energetic radial.

Scopul specific este să se analizeze și se optimizeze un sistem electro-energetic radial.

Scopul final este să se obțină un sistem de generare și transmisie de energie mai eficient și mai sigur.

Scopul general al proiectului este să se analizeze și se optimizeze un sistem electro-energetic radial.

Scopul specific este să se analizeze și se optimizeze un sistem electro-energetic radial.

Scopul final este să se obțină un sistem de generare și transmisie de energie mai eficient și mai sigur.

Coordonator: Prof. Dr. Ing. Vlad Horeșan

Student: Diana Crisan

Cuprins

Capitolul 1: Prezentarea procesului. Tema de proiectare.....	3
Capitolul 2: Sisteme de reglare asociate cazașului	6
Capitolul 3: Date de proiectare.....	12
A. Partea termică.....	12
B. Partea electrică.....	15
Capitolul 4: Modelele proceselor tehnologice aferente cazașului. Identificarea sub formă simplificată a cazașului cu abur (în jurul punctului static de funcționare).....	17
Capitolul 5: Acordarea regulatoarelor pentru principalele bucle de reglare (a presiunii aburului viu și a debitului de abur viu).....	27
A. Reglarea presiunii aburului viu.....	27
B. Acordarea regulatorului din bucla de reglare a debitului de abur viu....	31
Capitolul 6: Reglarea frecvenței și a puterii active.....	34
Capitolul 7: Reglarea tensiunii și a puterii reactive.....	46
Capitolul 8: Modelarea analogică a regulatoarelor.....	56
Capitolul 9: Cerințe și observații.....	58

Capitolul 1. Prezentarea procesului

Tema de proiectare

Proiectarea într-o formă simplificată a principalelor circuite de reglare pentru un sistem cazan – turbină – generator (sistem electro – energetic radial) și analiza unor răspunsuri indiciale semnificative.

Date preliminare:

Puterea grupului $P = 445 \text{ [MW]}$

Presiunea aburului viu $p = 150 \text{ [bar]}$

Consumul specific $1/\eta_0 = 2262 \text{ [Mcal/MWh]}$

Entalpia aburului viu $i_2 = 349 \text{ [Mcal/to]}$

Se vor proiecta într-o formă simplificată principalele circuite de reglare automată și se vor analiza răspunsuri semnificative la perturbații pentru un sistem **cazan** al grupului (C) - **turbină** (T) - **generator** sincron (G) și un **sistem energetic radial** (S). Detalierea circuitului de reglare într-o formă simplificată este următoarea:

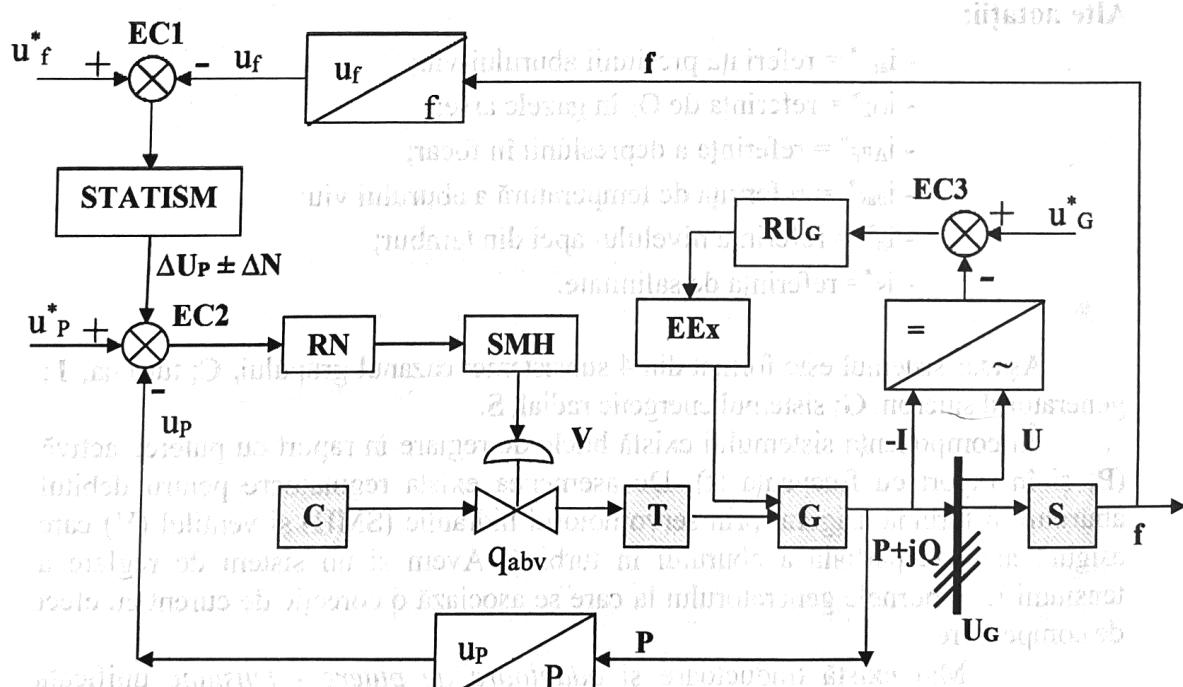


Figura 1: Sistemul electro – energetic radial (circuit de reglare)

Denumirile principale (în lată)

Notății:	RN:	regulator de putere activă;
	SMH:	servomotor hidraulic de acționare a ventilului de admisie parțială V a debitului de abur q_{ab} la intrarea în turbină.
	C:	cazan;
	T:	turbină;
	G:	generator sincron;
	S:	sistem energetic radial
	P/Up:	traductoare și adaptoare de putere-tensiune unificată;
	f/Uf:	adaptoare de frecvență – tensiune unificată;
	Statism:	bloc corector format dintr-un quadripol activ care asigură o dependență liniară cu o anumită pantă predeterminată pentru panta $f(p)$;
		bloc de redresare a tensiunii; RUG: regulatorul tensiunii la bornele generatorului; EEx: element de excitație a generatorului;

Alte notății:

- i_{apv}^* = referința presiunii aburului-viu;
- $i_{O_2}^*$ = referința de O_2 în gazele arse;
- $i_{\Delta PP}^*$ = referința a depresiunii în focar;
- $i_{\theta av}^*$ = referința de temperatură a aburului viu;
- i_h^* = referința nivelului apei din tambur;
- i_s^* = referința de salinitate.

Așadar sistemul este format din 4 subsisteme: cazonul grupului, C; turbina, T; generatorul sincron, G; sistemul energetic radial, S.

În componența sistemului există bucle de reglare în raport cu puterea activă (P) și în raport cu frecvența (f). De asemenea există regulatoare pentru debitul aburului în turbină asigurat prin servomotorul hidraulic (SMH) și ventilul (V) care asigură admisia parțială a aburului în turbină. Avem și un sistem de reglare a tensiunii U la bornele generatorului la care se asociază o corecție de curent cu efect de compensare.

Mai există traductoare și *adaptoare de putere - tensiune* unificată (P/Up), *adaptoare de frecvență - tensiune* unificată (f/U), un bloc de statism, un bloc de redresare din circuitul de reglare a tensiunii la bornele generatorului ($\sim/=$),

etaje de amplificare în putere (EEx), reprezentând excitatricea generatorului și altele. Schema de ansamblu a sistemului este:

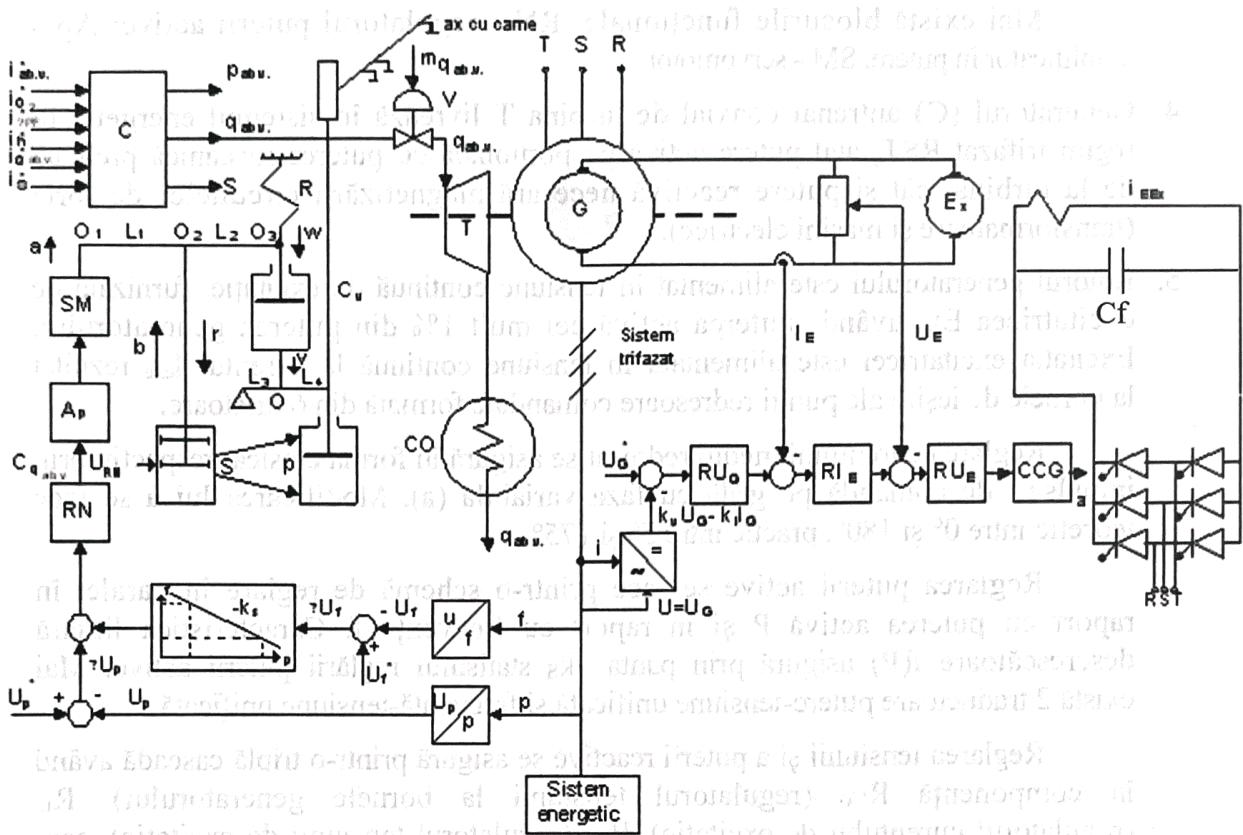


Figura 2: Schema de ansamblu a sistemului de aburire

În componenta schemei de mai sus intră:

1. Cazanul (C) pentru care numărul minim al semnalelor de intrare este 6. Sub forma simplificată se consideră un singur semnal de ieșire, q_{abv} , care este reglat prin strangulare cu ventilul (V) echivalent de admisie a aburului în turbină.
 2. Turbina (T) antrenează generatorul G. Aburul viu destins în turbine trece în condensatorul CO, rezultând datorită răcirii, același debit masic de apă condensată, q_{abv} .
 3. Elementul de execuție SMH e format dintr-o cremalieră care e antrenată printr-un sistem hidraulic de tip sertăraș - piston având în componență sertărașul S și pistonul P. Suplimentar mai există o reacție negativă mecanică de tip pozitioner prin intermediul pârghiei L1, L2. Prin această reacție negativă se obțin două avantaje:
 - a) micșorarea inerției mecanice echivalente;
 - b) îmbunătățirea comportării liniare prin micșorarea distorsiunilor

neliniare de tip frecare uscată, jocuri și dereglați mecanice.

Deoarece uleiul este incompresibil se cumulează numeroase avantaje: inerție mecanică foarte mică, forțe în regim tranzitoriu neatenuate, precizie ridicată.

Mai există blocurile funcționale: RN - regulatorul puterii active; Ap - amplificator în putere; SM - servomotor

- Generatorul (G) antrenat coaxial de turbina T livrează în sistemul energetic în regim trifazat RST, atât putere activă proporțională cu puterea mecanică preluată de la turbină, cât și putere reactivă necesară magnetizării circuitelor de forță (transformatoare și mașini electrice).
 - Rotorul generatorului este alimentat în tensiune continuă de excitație, furnizată de excitatricea E_x , având puterea activă cel mult 1% din puterea generatorului. Excitația excitatricei este alimentată în tensiune continuă la curentul I_{exc} rezultat la bornele de ieșire ale punții redresoare comandate formată din 6 tiristoare.

Reglarea curentului mediu redresat se asigură în forma clasică, respectiv prin impulsuri de comandă pe grilă cu fază variabilă (a). Modificarea lui a se face teoretic între 0° și 180° , practic între 5° și 175° .

Reglarea puterii active se face printr-o schemă de reglare în paralel în raport cu puterea activă P și în raport cu frecvența f . Caracteristica liniară descrescătoare $f(P)$ asigură prin panta $-ks$ statismul reglării puterii active. Mai există 2 traducătoare putere-tensiune unificată și frecvență-tensiune unificată.

Reglarea tensiunii și a puterii reactive se asigură printr-o triplă cascadă având în componență R_{UG} (regulatorul tensiunii la bornele generatorului), R_{IE} (regulatorul curentului de excitație), R_{UE} (regulatorul tensiunii de excitație), care comandă blocul CCG (complexul de comandă pe grilă). La ieșirea CCG se obțin defazajele variabile în limite largi pentru comanda pe grilă a celor 6 tiristoare. Această buclă echivalentă în triplă cascadă posedă o reacție pozitivă de curent cu o pondere mult mai mică, de câteva procente (reactie de compundare, max 5%).

Capitolul 2. Sisteme de reglare asociate cazanului

Cele 6 bucle de reglare (într-o formă destul de generală) pentru un cazan de abur se prezintă în figura de mai jos:

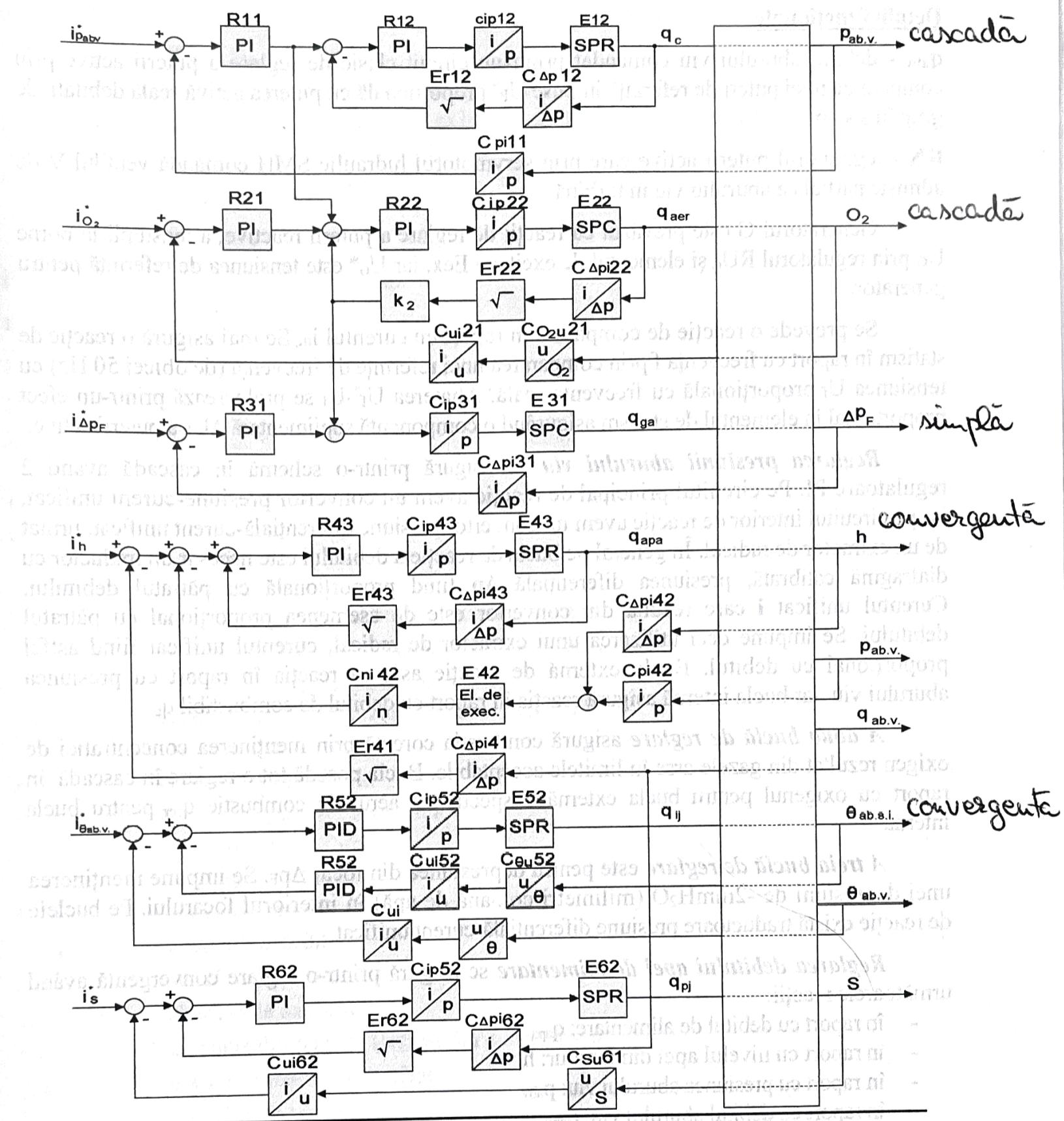


Figura 3: Bule de reglare (forma generală) pentru un cazan de abur

Detalii funcționale

q_{abv} - debitul aburului viu comandat printr-un circuit clasic de reglare a puterii active prin compararea unei puteri de referință impuse U_P^* proporțională cu puterea activă reală debitată de grup în sistem

RN - regulatorul puterii active care prin servomotorul hidraulic SMH comandă ventilul V de admisie parțială a aburului viu în turbină

Generatorul G este prevăzut cu reacții de reglare a puterii reactive, a tensiunii la borne U_G prin regulatorul RU_G și elementul de excitație Eex, iar U_G^* este tensiunea de referință pentru generator.

Se prevede o reacție de comparare în raport cu curentul i_0 . Se mai asigură o reacție de statism în raport cu frecvența f prin compararea unei referințe de frecvență (de obicei 50 Hz) cu tensiunea U_f proporțională cu frecvența reală. Abaterea $U_f^* - U_f$ se prelucrează printr-un efect proporțional în elementul de statism asigurând o componentă suplimentară ΔU_P a puterii active.

Reglarea presiunii aburului viu se asigură printr-o schemă în cascadă având 2 regulatoare PI. Pe circuitul principal de reacție avem un convertor presiune-curent unificat, iar pe circuitul interior de reacție avem un convertor presiune diferențială-curent unificat, urmat de un extractor de radical. În general pe bucla de reacție a debitului este necesar un traductor cu diafragmă calibrată, presiunea diferențială Δp fiind proporțională cu pătratul debitului. Curentul unificat care rezultă din convertor este de asemenea proporțional cu pătratul debitului. Se impune deci utilizarea unui extractor de radical, curențul unificat fiind astfel proporțional cu debitul. Bucla externă de reacție asigură reacția în raport cu presiunea aburului viu, iar bucla internă asigură reacția în raport cu debitul de combustibil q_c .

A doua buclă de reglare asigură combustia corectă prin menținerea concentrației de oxigen rezultat din gazele arse în limitele acceptabile. Bucla posedă tot o reglare în cascadă, în raport cu oxigenul pentru bucla externă, respectiv cu aerul de combustie q_{aer} pentru bucla internă.

A treia buclă de reglare este pentru depresiunea din focar Δp_F . Se impune menținerea unei depresiuni de $-2 \text{ mmH}_2\text{O}$ (milimetri coloană de apă) în interiorul focarului. Pe buclele de reacție există traductoare presiune diferențială-curent unificat.

Reglarea debitului apei de alimentare se asigură printr-o reglare convergentă având următoarele reacții:

- în raport cu debitul de alimentare: q_{apa}
- în raport cu nivelul apei din tambur: h
- în raport cu presiunea aburului viu: p_{abv}
- în raport cu debitul aburului viu: q_{abv}

Tipul traductoarelor și convertoarelor în semnal unificat este același ca în schemele anterioare.

Reglarea temperaturii aburului viu este o reglare convergentă în raport cu 2 reacții: temperatura aburului viu Θ_{abv} , respectiv temperatura aburului viu dintr-un

supraîncălzitor intermediar Θ_{absi} . Pe circuitele de reacție există convertor temperatură-tensiune/curent unificat.

Reglarea salinității S a apei condensate din pâlnia rece a cazanului. Bucla principală este asigurată de salinitate, existând și o buclă suplimentară de corecție, dependentă liniar de debitul aburului viu. Există un traductor salinitate-tensiune, apoi tensiune-curent. Mai există de asemenea bucle suplimentare cu efect de corecție.

Notății:

i^*	-curent unificat de referință
u^*	-tensiune unificată de referință
t	-timpul
Θ	-temperatura
q_{ij}	-debitul de injecție între 2 trepte de supraîncălzitor pentru reglarea temperaturii aburului viu
i_{pabv}^*	-referință în curenț unificat pentru presiunea aburului viu
Q_{pj}	-debitul de purjă
q_{abv}	-debitul de abur viu care intră în turbină
i_{o2}^*	-referință în curenț unificat de oxigen pentru analizatorul gazelor arse
Θ_{absi}	-temperatura aburului în supraîncălzitorul intermediar
$i_{\Delta pF}^*$	-referință depresiunii din focar
Θ_{abv}	-temperatura aburului viu la intrarea în turbină
i_h^*	-referință nivelului apei în tambur
h	-nivelul apei în tambur
$i_{\Theta abv}^*$	-referință temperaturii aburului viu
Δp_F	-depresiunea din focar
i_s^*	-referință de salinitate
C_{lp}, C_{pl}	-convertor curent - presiune și invers
Q, q	-se referă la debite
P	-se referă la presiuni
E	-element de execuție
Δp	-presiune diferențială (ieșirea din diafragma calibrată)
p_{abt}	-presiunea aburului în tambur
E_r	-extractor de radical
SPR	-servomotor pneumatic cu robinet
SPC	-servomotor pneumatic cu clapetă
S	-salinitate
Q_c, q_c	-debit de combustibil
$q_{aer}, q_{apa}, q_{gaz}$	-debite de aer de combustie de apă de alimentare, respectiv de gaze arse

EC	-element de corecție;
O₂[%]	-concentrația procentuală de oxigen molecular;
SHR	-servomotor hidraulic cu robinet;
SHP	-servomotor hidraulic cu clapetă;
R	-regulator.

Explicații:

STATISM: bloc corector format dintr-un quadripol activ care asigură o dependență liniară cu o anumită pantă predeterminată pentru panta $f(p)$;

Pe barele de la bornele generatorului G se aplică cele două componente ale puterii (P, Q) formând S – puterea aparentă: $S = \sqrt{P^2 + Q^2} ; [MVA]$

Frecvența f din sistemul electro-energetic-radial (neinterconectat cu alt sistem) este introdusă în traductorul (u_f/f) iar semnalul unificat în tensiune ($-u_f$) liniar dependentă de frecvență se introduce elementul de comparare EC, unde u_f^* este semnalul unificat de tensiune în referință a frecvenței. Abaterea de reglaj la ieșire EC este corectată în elementul Statism și reprezintă un real semnal de reacție negativă care se aplică în EC2. Al 2-lea semnal unificat de referință este u_P^* - referința puterii active care se compară cu semnalul de reacție negativ $-u_P$ liniar dependent de puterea activă P , debitată în sistem de generatorul G (al doilea circuit de reacție negativă).

Abaterea de reglare de ieșire din EC2 este prelucrată de regulatorul puterii active RN iar semnalul de comandă acționează asupra unui element de execuție SMH. Semnalul de ieșire din SMH este deplasarea axială (forțe mari – de sute de kg) care acționează asupra ventilului V destinat reglării debitului aburului (q_{abv}).

Reglarea tensiunii a puterii reactive la bornele generatorului se realizează printr-o reacție dublă, cu efect de reacție negativă în raport cu U și de reacție pozitivă în raport cu I (cu o pondere mult mai mică). Cele două semnale (U și I) sunt redresate și se aplică semnalul unificat în tensiune continuă ca reacție echivalentă în EC3.

Abaterea de reglare la ieșire din EC3 este prelucrată în RUG, iar semnalul de comandă se aplică asupra unui element complex numit excitarea excitatricei. Ieșirea din acest element este curentul continuu de excitare a rotorului generatorului G pentru a realiza fluxul de excitare.

Observații:

- referințele de **curent** sunt notate cu i^* și se referă la **procese lente**: 2-10 sau 4-20 mA; Se evită zeroul natural (0 mA) pentru a atenua influența zgomotului din proces; deoarece procesele lente au cel puțin o constantă de timp mai mare de 10 s.
- referințele de **tensiune** sunt notate cu u^* și se referă la **procese rapide** 1-10V sau $\pm 10Vcc$; constanta de timp mai mică de 10 sec.

Toate debitele de fluide sunt notate cu q (Q), temperaturile cu θ , presiunile cu p , depresiunea cu Δp (presiune diferențială) și salinitatea cu S , ca urmare :

$$Q^2 = k * \Delta p; \quad Q = k^{\frac{1}{2}} * \sqrt{\Delta p}; \quad \Delta p = p_1 - p_2$$

Există două circuite de reglare distincte:

- 1) în raport cu puterea activă pentru reglarea frecvenței;
- 2) în raport cu tensiunea la bornele G pentru stabilizarea tensiunii și reglarea puterii reactive.

În schema de reglare a cazanului există următoarele circuite de reglare:

- 1) sarcina cazanului, regulatorul de sarcină, funcția de presiune acționând asupra combustibilului și aerului de combustie;
 - 2) reglarea de combustie urmărind calitatea arderii, respectiv reglarea de urmărire în proporție stoichiometrică a aerului de combustie în raport cu combustibilul;
 - 3) depresiunea în focar;
 - 4) alimentarea cu apă, funcție de nivelul apei din tambur, debitul de abur; o corecție în raport cu presiunea aburului din tambur;
 - 5) temperatura aburului de ieșire cu o corecție în raport cu temperatura aburului înainte de injecție;
 - 6) purjă continuă, funcție de debitul aburului și salinitatea apei din tambur
- Referințele pentru aceste șase circuite de reglare sunt: i_{apv}^* , i_{o2}^* , i_{DPF}^* , i_h^* , i_{qav}^* , i_s^* .

Capitolul 3. Date de proiectare

A. Partea termică

1) Parametrul principal: puterea nominală a generatorului:

$$P_{Gnom} = P = 445 [MW];$$

2) Presiunea nominală a aburului viu în cazan:

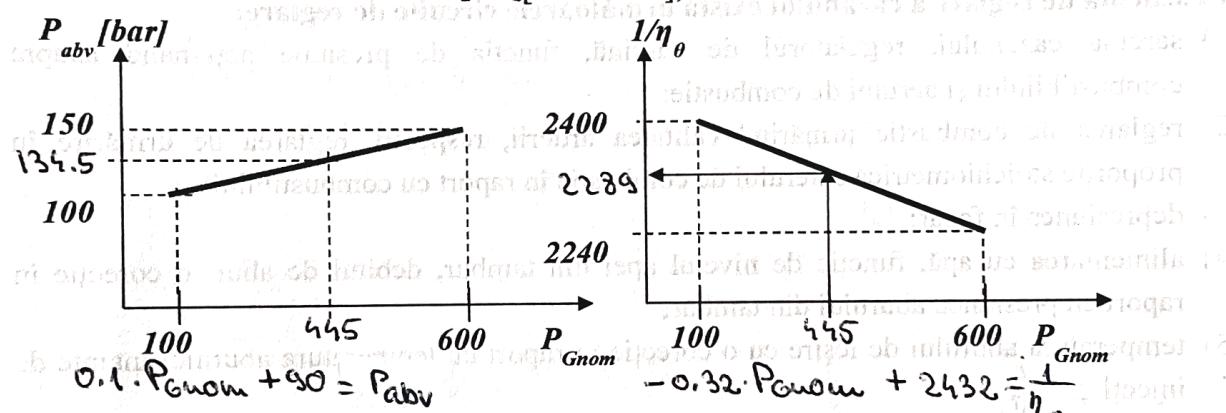
$$P_{abvnom} = p = 150 [bar];$$

3) Consumul termic specific:

$$\frac{1}{\eta_\theta} = 2262 \left[\frac{Mcal}{MWh} \right];$$

4) Entalpia aburului viu:

$$i_2 = 349 [Mcal/tona];$$



5) Puterea calorică a combustibilului: (gaz metan)

$$PC_{CH4} = 8.5 \left[\frac{MCal}{Nm^3} \right]$$

6) Debitul de combustibil nominal:

$$q_{Cnom} = q_{CH4nom} = \frac{\frac{1}{\eta_\theta} \left[\frac{MCal}{MWh} \right] \cdot P_{Gnom} [MW]}{PC_{CH4} \left[\frac{MCal}{Nm^3} \right]} = 118420 \left[\frac{Nm^3}{h} \right]$$

7) Temperatura nominală a aburului viu:

$$\theta_{abnom} = 530^{\circ}\text{C}$$

8) Conținutul de oxigen molecular în gazele arse:

$$\text{O}_2 (\%) = 5\%$$

9) Presiunea nominală a aburului în tambur:

$$p_{abvnom} = 1.1 \cdot p_{abvnom} = 1.1 \cdot 159 = 144.9 \text{ [bar]}$$

10) Temperatura nominală a aburului după primul supraîncălzitor

$$\theta_{absinom} = 480^{\circ}\text{C}$$

11) Debitul nominal de aer de combustie:

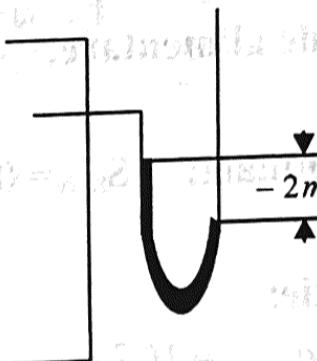
$$q_{aernom} = q_{combnom} \left[\frac{\text{Nm}^3}{\text{h}} \right] \cdot \alpha \cdot \left(a \frac{PC_{CH_4} \left[\frac{\text{Kcal}}{\text{Nm}^3} \right]}{1000 \left[\frac{\text{Kcal}}{\text{Nm}^3} \right]} + b \right) = 33773 \left[\frac{\text{Nm}^3}{\text{h}} \right]$$

α - coeficient de exces al aerului de combustie; $\alpha=1.1$;

$a=1.09$; și $b=0.25$; - coeficienți care depind de compoziția gazului

12) Depresiunea nominală în focar:

$$\Delta p_{Fnom} = -2 [\text{mm H}_2\text{O}]$$



13) Debitul de gaze arse:

$$q_{ganom} = q_{CH4nom} + q_{aernom} = 152200 \text{ [Nm}_3/\text{h}]$$

14) Debitul nominal al aburului viu:

$$q_{abvnom} = q_{abviu} = \frac{\frac{1}{\eta_\theta} \left[\frac{MCal}{MWh} \right] \cdot P_{Gnom} [MW]}{(i_2 - i_1) \left[\frac{MCal}{tona} \right]} = 1229 \left[\frac{tona}{h} \right]$$

Datorită entalpiei de la ieșirea din condensator și la aderarea la parametrii de la ieșirea din aburieră

i_1 : entalpia apei de alimentare la ieșirea din condensator la $30^\circ C$; *con antrenajul 101*

- energia termică conținută în apa condensată

$$i_1 = 30 \left[\frac{MCal}{Tonă} \right]$$

Datorită entalpiei de la ieșirea din condensator și la aderarea la parametrii de la ieșirea din aburieră

i_2 : entalpia aburului viu după supraîncălzitor (se consideră în limitele parametrilor aburului viu și se determină prin interpolare liniară).

$$p_{abvar} = 100 \text{ [bar]} \Rightarrow i_2 = 809 \text{ [Mcal/tonă]}$$

$$p_{abvar} = 210 \text{ [bar]} \Rightarrow i_2 = 781 \text{ [Mcal/tonă]}$$

$$i_2 = -0.25 \cdot p_{abvar} + 834$$

15) Debitul apei de alimentare: $q_{apanom} = q_{abvnom} = 1229 \text{ [tona/h]}$

16) Salinitate nominală: $S_{nom} = 0,01 \text{ [mg/tonă]} = 10^{-8} \text{ [kg/tona]}$

17) Debitul injecție:

$$q_{ijnom} = 10^{-2} \cdot q_{abvnom} = 0.01 \cdot 1229 = 12.29 \text{ [tona/h]}$$

18) Debitul de purjă:

$$q_{pjnom} = 10^{-3} \cdot q_{abvnom} = 0.001 \cdot 1229 = 1.229 \text{ [tona/h]}$$

B. Partea electrică

Parametrii circuitului de excitație și ai generatorului.

1. Factorul de putere:

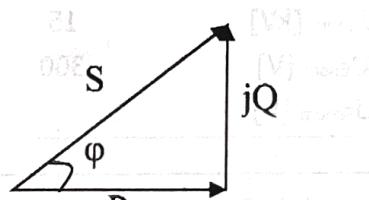
$$\cos \phi = \frac{P[W]}{S[VA]} = 0.825$$

Cu cât puterea activă este mai mare și cosφ este mai ridicat din motive economice. Se mai asigură o bună rezervă de stabilitate. De obicei nu se depășește cosφ = 0.91-0.92 pentru a asigura și o putere reactivă suficientă de mare pentru a putea forța în regimul de scurt circuit excitația generatorului.

$Q[Var]$ - puterea reactivă necesară magnetizării circuitelor magnetice din motoare, transformatoare, motoare electrice. Se urmărește compensarea puterii reactive.

2. Puterea aparentă: $P = UI\cos\phi$; $Q = UI\sin\phi$

$$S_{Gnom} = \frac{P_{Gnom} [MW]}{\cos\phi_{nom}} = 539.36 [MVA]$$



3. Puterea reactivă nominală:

$$Q_{Gnom}^2 = S_{Gnom}^2 [MVA] - P_{Gnom}^2 [MW] = 9292 [MVAr] \Rightarrow Q_{Gnom} = 92.92 [MVAr]$$

4. Tensiunea la bornele generatorului: $U_{Gnom} = 30 [kV]$

5. Tensiunea de excitație nominală: $U_{Enom} = 600 [V]$

6. Puterea nominală a excitatricei: $P_{Enom} = 0.0025 \cdot P_{Gnom} = 1.125 [MW]$

7. Puterea nominală a punții comandate: $P_{PCnom} = 0.01 \cdot P_{Enom} = 0.0111 [MW] = 11.1 [kW]$

8. Curent nominal de excitație: $i_{Enom} = \frac{P_{Enom} [MW]}{U_{Enom} [V]} = 1.85 [kA]$

9. Tensiune nominală a punții comandate: $U_{PCnom} = 360 [V]$

10. Constanta de timp a excitației excitatricei: $T_{EE} = 0.15 [sec]$

11. Constanta de timp a excitatricei generatorului: $T_E = 1$ [sec]

12. Constanta de timp a generatorului trifazat: $T_G = 6$ [sec]

13. Curentul punții comandate:

$$i_{PCnom} = \frac{P_{PCnom} [W]}{U_{PCnom} [V]} = 30.9 [A]$$

Mărimile nominale U_{Gnom} , U_{Enom} , U_{PCnom} , T_E , T_{EE} , T_G au fost luate conform tabelelor de mai jos:

(U_{PCnom} – tensiunea punții redresoare comandate)

P_{Gnom} [MW]	100÷200	201÷300	301÷400	>400
U_{Gnom} [kV]	15	20	25	30
U_{Enom} [V]	300	400	500	600
U_{PCnom} [V]	270		360	

P_{Gnom} [MW]	100 – 300	301 – 500	>500
T_{EE} [sec]	0.1	0.15	0.2
T_E [sec]	0.5	0.75	1
T_G [sec]	4	5	6

U_{Gnom} – tensiunea la bornele generatorului

U_{Enom} – tensiunea de excitație nominală

U_{PCnom} – tensiunea punții redresoare comandate

T_{EE} – constanta de timp a excitației excitatricei

T_E – constanta de timp a excitației generatorului

T_G – constanta de timp a generatorului trifazat

Capitolul 4. Modelele proceselor tehnologice aferente cazanului. Identificarea sub formă simplificată a cazanului cu abur (în jurul punctului static de funcționare)

Cazanul se consideră ca având 6 semnale de intrare și 9 semnale de ieșire. Teoretic există funcțiile de transfer de la fiecare intrare către fiecare ieșire. Practic majoritatea acestor funcții de transfer au ponderi neglijabile, rezultând 19 funcții de transfer mai importante dintre care unele au valori foarte mari față de altele.

Se operează grafic pentru a stabili acțiunea unor semnale asupra altor semnale.

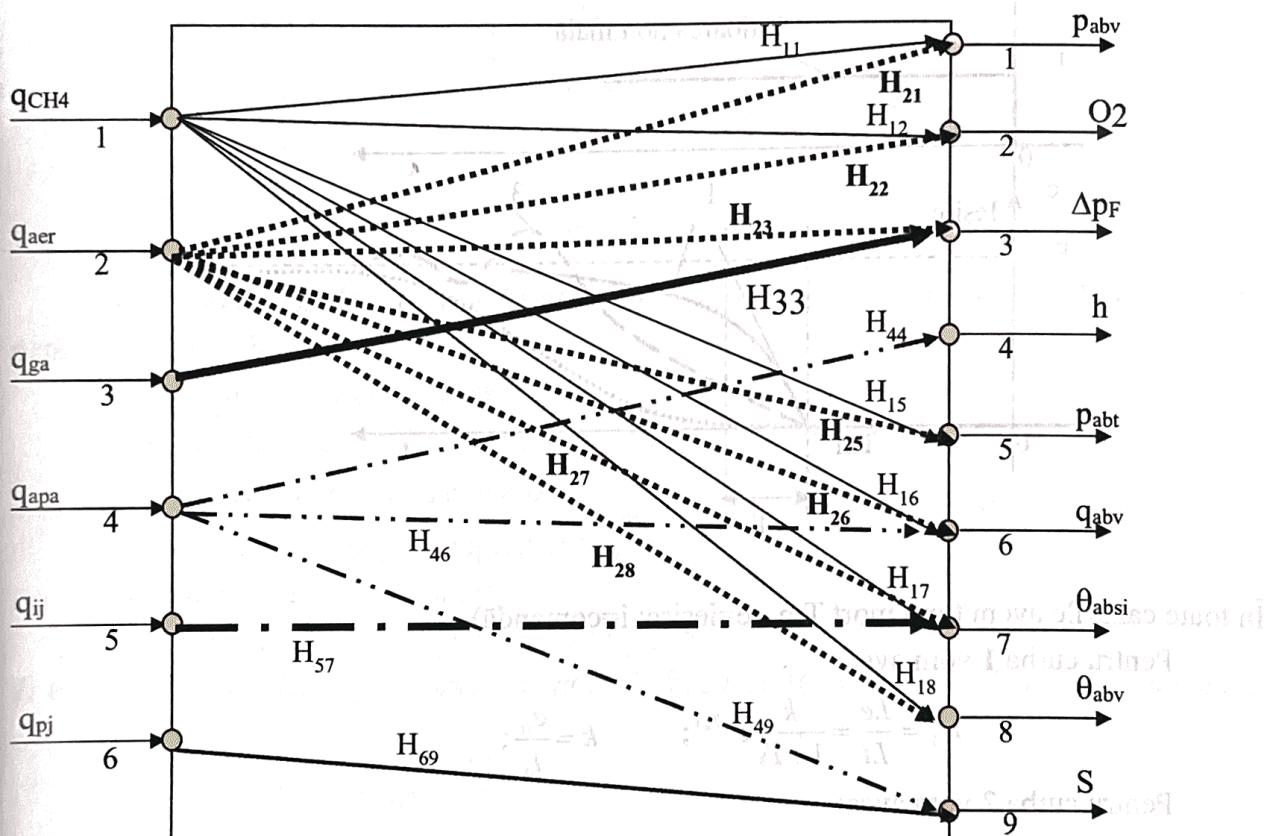


Figura 4: Reprezentarea legăturilor între funcțiile principale

Se va parcurge citirea răspunsurilor indiciale semnificative între aceste semnale pentru a aproxima funcțiile de transfer. Nu toate aceste funcții de transfer au interpretarea fenomenologică sau au o pondere suficientă pentru a putea fi luate în considerare.

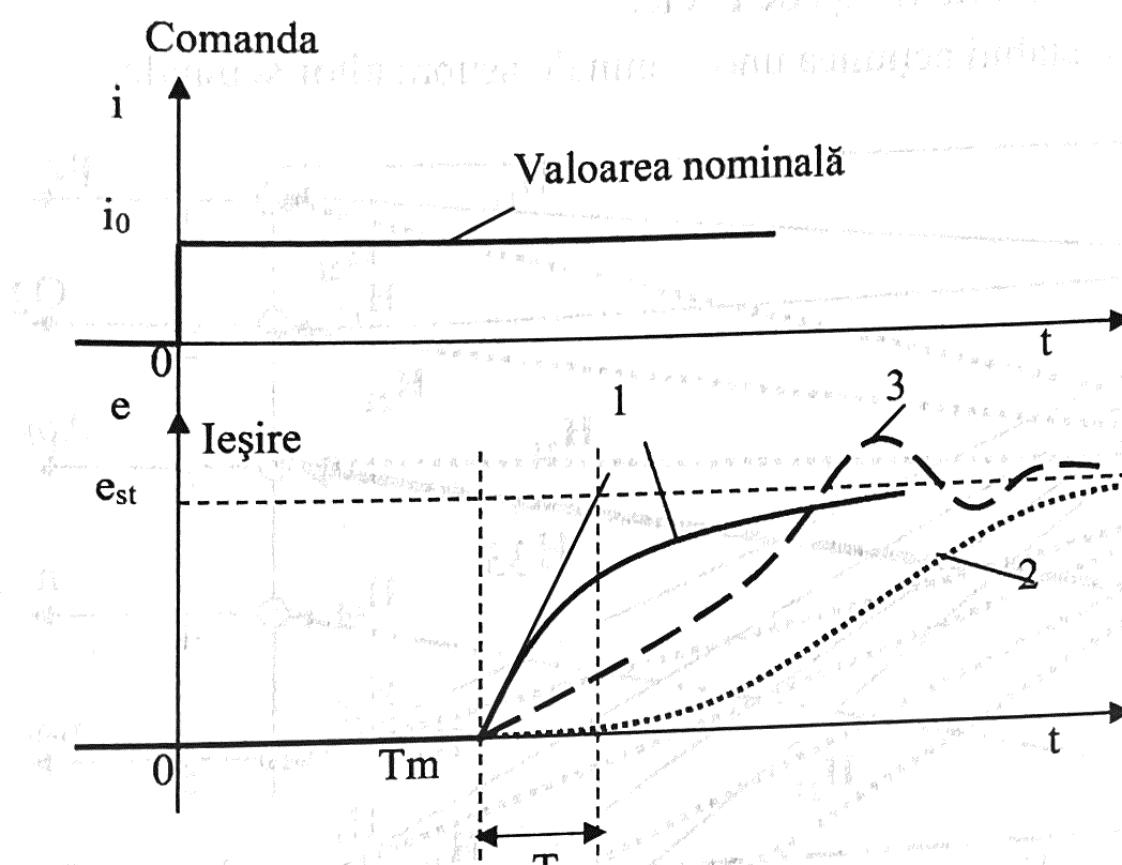
Se iau numai cele cu modul suficient de mare.

Funcții de transfer (reprezentative) pentru subprocese din cazanul de aburi

Având în vedere caracterul de filtru trece jos cu întârziere de fază a major subproceselor incluse în funcțiile de transfer, aproximările se pot face prin identificare pe unor răspunsuri indiciale. Cu toate că aproximarea funcțiilor de transfer prin forme proporționale de ordinul I și cu timp mort poate fi grosieră, în general se utilizează în proiectare și relativ rare utilizază funcții de transfer de ordinul II.

Se întâlnesc două cazuri:

A.



În toate cazurile avem timp mort T_m . (e =ieșire; i =comandă)

Pentru curba 1 vom avea:

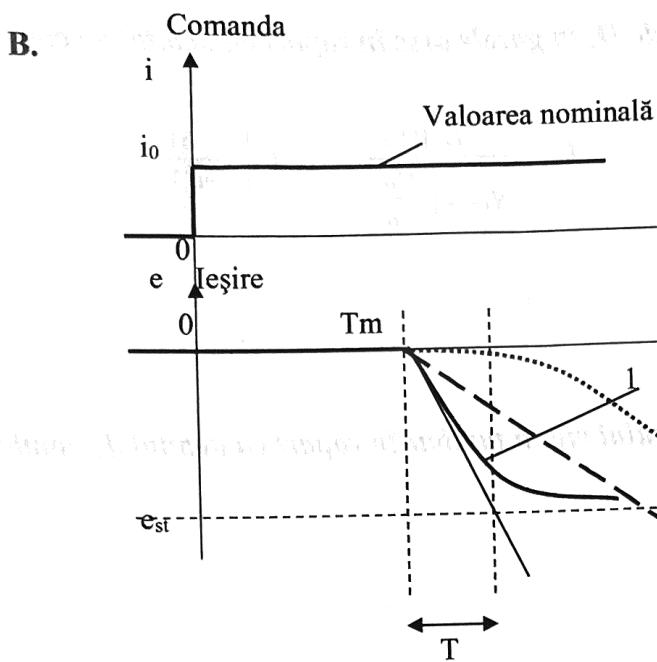
$$H_1 = \frac{Le}{Li} = \frac{k}{1+Ts} e^{-T_m s}; \quad k = \frac{e_{st}}{i_0};$$

Pentru curba 2 vom avea:

$$H_2 = \frac{Le}{Li} = \frac{k}{1+(T_1+T_2)s + T_1 T_2 s^2} e^{-T_m s};$$

Pentru curba 3 vom avea:

$$H_3 = \frac{Le}{Li} = \frac{k}{1+\frac{2\xi}{\omega_n}s + \frac{1}{\omega_n^2}s^2} e^{-T_m s}; \quad \omega_p = \omega_n \sqrt{1-\xi^2};$$



Pentru acest caz funcțiile de transfer vor fi opusele celor de la punctul A (corespunzătoare pentru fiecare curbă).

Am folosit următoarele notații:

e_{st} – valoarea staționară a ieșirii;

i_0 – valoarea staționară a comenzi;

T – constanta de timp a subprocesului;

T_m – constanta de timp mort.

Calculul funcțiilor de transfer principale*:

1. Funcția de transfer a presiunii aburului viu în cazan în raport cu debitul de combustibil:

$$H_{11}(s) = \frac{L\{p_{abv}\}}{L\{q_c\}} = \frac{k_{11}}{1 + T_{11}s} e^{-T_{m11}s};$$

$$k_{11} = \frac{p_{abvnom}[\text{bar}]}{q_{cnom}[\frac{\text{Nm}^3}{\text{h}}]} = 0,001343 \frac{\text{h} \cdot \text{bar}}{\text{N} \cdot \text{m}^3}$$

$$T_{m11} = 10[\text{min}] = 600[\text{sec}]; \quad T_{11} = 100[\text{min}] = 6000[\text{sec}];$$

$$H_{11}(s) = \frac{0,001343 \cdot e^{-600s}}{1 + 6000s};$$

* k – coeficient de proporționalitate în regim staționar; T_m – constanta de timp mort; T – constanta de timp

2. Funcția de transfer a conținutului de O_2 în gazele arse în raport cu debitul de combustibil

$$T_{m12} = 10[\text{sec}] ; T_{12} = 60[\text{sec}];$$

$$H_{12}(s) = \frac{L\{O_2\}}{L\{q_c\}} = \frac{k_{21}}{1+T_{12}s} e^{-T_{m12}s};$$

$$k_{12} = \frac{O_2[\%]}{q_{cnom} \left[\frac{Nm^3}{h} \right]} = 4.22 \cdot 10^{-5} \frac{[\% \cdot h]}{[Nm^3]}$$

$$H_{12}(s) = \frac{4.22 \cdot 10^{-5} \cdot e^{-10s}}{1+60s};$$

3. Funcția de transfer a presiunii aburului viu în tambur în raport cu debitul de combustibil

$$H_{15}(s) = \frac{L\{P_{abt}\}}{L\{q_c\}} = \frac{k_{15}}{1+T_{15}s} e^{-T_{m15}s};$$

$$T_{m15} = 9[\text{min}] = 540[\text{sec}];$$

$$T_{15} = 90[\text{min}] = 5400[\text{sec}];$$

$$k_{15} = \frac{p_{abvnom}[\text{bar}]}{q_{cnom} \left[\frac{Nm^3}{h} \right]} = 1.5 \cdot 10^{-3} \left[\frac{h \cdot \text{bar}}{Nm^3} \right]$$

$$H_{15}(s) = \frac{1.5 \cdot 10^{-3} \cdot e^{-540s}}{1+5400s};$$

4. Funcția de transfer a debitului de abur viu în raport cu debitul de combustibil:

$$H_{16}(s) = \frac{L\{q_{abv}\}}{L\{q_c\}} = \frac{k_{16}}{1+T_{16}s} e^{-T_{m16}s};$$

$$T_{m16} = 12[\text{min}] = 720[\text{sec}];$$

$$T_{16} = 120[\text{min}] = 7200[\text{sec}];$$

$$k_{16} = \frac{q_{abvnom} \left[\frac{\text{tonă}}{h} \right]}{q_{cnom} \left[\frac{Nm^3}{h} \right]} = 1.04 \cdot 10^{-2} \left[\frac{\text{tonă}}{Nm^3} \right]$$

$$H_{16}(s) = \frac{1.04 \cdot 10^{-2} \cdot e^{-720s}}{1+7200s};$$

5. Funcția de transfer a temperaturii aburului în supraîncalzitorul intermediar în raport cu debitul de combustibil:

$$H_{17}(s) = \frac{L\{\theta_{abvi}\}}{L\{q_c\}} = \frac{k_{17}}{1+T_{17}s} e^{-T_{17}s};$$

$T_{17} = 10[\text{min}] = 600[\text{sec}]$;

$T_{17} = 100[\text{min}] = 6000[\text{sec}]$;

$$k_{17} = \frac{\theta_{abvnom} [\text{°C}]}{q_{cnom} \left[\frac{\text{Nm}^3}{\text{h}} \right]} = \frac{480 [\text{°C}]}{1,18 \cdot 10^5 \left[\frac{\text{Nm}^3}{\text{h}} \right]} = 4,1 \cdot 10^{-3} \left[\frac{\text{h} \cdot \text{°C}}{\text{Nm}^3} \right]$$

$$H_{17}(s) = \frac{4,1 \cdot 10^{-3} \cdot e^{-600s}}{1+6000s};$$

6. Funcția de transfer a temperaturii aburului viu în raport cu debitul de combustibil:

$$H_{18}(s) = \frac{L\{\theta_{abv}\}}{L\{q_c\}} = \frac{k_{18}}{1+T_{18}s} e^{-T_{18}s};$$

$T_{18} = 12[\text{min}] = 720[\text{sec}]$;

$T_{18} = 120[\text{min}] = 7200[\text{sec}]$;

$$k_{18} = \frac{\theta_{abvnom} [\text{°C}]}{q_{cnom} \left[\frac{\text{Nm}^3}{\text{h}} \right]} = \frac{530 [\text{°C}]}{1,18 \cdot 10^5 \left[\frac{\text{Nm}^3}{\text{h}} \right]} = 4,5 \cdot 10^{-3} \left[\frac{\text{h} \cdot \text{°C}}{\text{Nm}^3} \right]$$

$$H_{18}(s) = \frac{4,5 \cdot 10^{-3} \cdot e^{-720s}}{1+7200s};$$

7. Funcția de transfer a presiunii aburului viu din cazan în raport cu debitul de aer de combustie

$$H_{21}(s) = \frac{L\{p_{abv}\}}{L\{q_{aer}\}} = \frac{k_{21}}{1+T_{21}s} e^{-T_{21}s};$$

$T_{21} = 10[\text{min}] = 600[\text{sec}]$;

$T_{21} = 100[\text{min}] = 6000[\text{sec}]$;

$$k_{21} = \frac{p_{abvnom} [\text{bar}]}{q_{aernom} \left[\frac{\text{Nm}^3}{\text{h}} \right]} = 4,7 \cdot 10^{-3} \left[\frac{\text{h} \cdot \text{bar}}{\text{Nm}^3} \right]$$

$$H_{21}(s) = \frac{4,7 \cdot 10^{-3} \cdot e^{-600s}}{1+6000s};$$

8. Funcția de transfer a conținutului de oxigen în gazele arse în raport cu debitul de aer de combustie :

$$H_{22}(s) = \frac{L\{O_2\}}{L\{q_{aer}\}} = \frac{k_{22}}{1+T_{22}s} e^{-T_{m22}s};$$

$$T_{m22} = 10[\text{sec}];$$

$$T_{22} = 60[\text{sec}];$$

$$k_{22} = \frac{O_{2nom}[\%]}{q_{aernom} \left[\frac{Nm^3}{h} \right]} = \frac{5[\%]}{3.34 \cdot 10^4 \left[\frac{Nm^3}{h} \right]} = 1.4 \cdot 10^{-4} \left[\frac{\% \cdot h}{Nm^3} \right]$$

$$H_{22}(s) = \frac{1.4 \cdot 10^{-4} \cdot e^{-10s}}{1+60s};$$

9. Funcția de transfer a depresiunii din focar în raport cu debitul de aer de combustie:

$$H_{23}(s) = \frac{L\{\Delta p_F\}}{L\{q_{aer}\}} = \frac{k_{23}}{1+T_{23}s} e^{-T_{m23}s};$$

$$T_{m23} = 10[\text{sec}];$$

$$T_{23} = 5[\text{sec}];$$

$$k_{23} = \frac{\Delta p_{Fnom}[\text{mmH}_2\text{O}]}{q_{aernom} \left[\frac{Nm^3}{h} \right]} = \frac{-2[\text{mmH}_2\text{O}]}{3.34 \cdot 10^4 \left[\frac{Nm^3}{h} \right]} = -5.9 \cdot 10^{-5} \left[\frac{h \cdot \text{mmH}_2\text{O}}{Nm^3} \right]$$

$$H_{23}(s) = -\frac{5.9 \cdot 10^{-5} \cdot e^{-10s}}{1+5s};$$

La creșterea debitului de aer depresiunea scade la valori negative.

10. Funcția de transfer a presiunii aburului din tambur în raport cu debitul de aer de combustie:

$$H_{25}(s) = \frac{L\{p_{abt}\}}{L\{q_{aer}\}} = \frac{k_{25}}{1+T_{25}s} e^{-T_{m25}s};$$

$$T_{m25} = 9[\text{min}] = 540[\text{sec}];$$

$$T_{25} = 90[\text{min}] = 5400[\text{sec}];$$

$$k_{25} = \frac{1.1 * p_{abvnom}[\text{bar}]}{q_{aernom} \left[\frac{Nm^3}{h} \right]} = 5.1 \cdot 10^{-3} \left[\frac{h \cdot \text{bar}}{Nm^3} \right]$$

$$H_{25}(s) = \frac{5.1 \cdot 10^{-3} \cdot e^{-540s}}{1+5400s};$$

11. Funcția de transfer a debitului de abur viu în raport cu debitul de aer de combustie:

$$H_{26}(s) = \frac{L\{q_{abv}\}}{L\{q_{aer}\}} = \frac{k_{26}}{1+T_{26}s} e^{-T_{26}s};$$

$$T_{26} = 12[\text{min}] = 720[\text{sec}];$$

$$T_{26} = 120[\text{min}] = 7200[\text{sec}];$$

$$k_{26} = \frac{\frac{q_{abvnom}}{h} \left[\frac{\text{tona}}{\text{Nm}^3} \right]}{\frac{q_{aernom}}{h} \left[\frac{\text{Nm}^3}{\text{h}} \right]} = 3.63 \cdot 10^{-2} \left[\frac{\text{tona}}{\text{Nm}^3} \right];$$

$$H_{26}(s) = \frac{3.63 \cdot 10^{-2} e^{-720s}}{1+7200s};$$

12. Funcția de transfer a temperaturii aburului viu în supraîncalzitorul intermediar în raport cu debitul de aer de combustie:

$$H_{27}(s) = \frac{L\{\theta_{absi}\}}{L\{q_{aer}\}} = \frac{k_{27}}{1+T_{27}s} e^{-T_{27}s};$$

$$T_{27} = 10[\text{min}] = 600[\text{sec}];$$

$$T_{27} = 100[\text{min}] = 6000[\text{sec}];$$

$$k_{27} = \frac{\frac{\theta_{absinom}}{h} \left[\frac{\text{h} \cdot ^\circ C}{\text{Nm}^3} \right]}{\frac{q_{aernom}}{h} \left[\frac{\text{Nm}^3}{\text{h}} \right]} = \frac{480 [\text{h} \cdot ^\circ C]}{3.34 \cdot 10^4 \left[\frac{\text{Nm}^3}{\text{h}} \right]} = 1.42 \cdot 10^{-2} \left[\frac{\text{h} \cdot ^\circ C}{\text{Nm}^3} \right];$$

$$H_{27}(s) = \frac{1.42 \cdot 10^{-2} \cdot e^{-600s}}{1+6000s};$$

13. Funcția de transfer a temperaturii aburului viu în raport cu debitul de aer de combustie:

$$H_{28}(s) = \frac{L\{\theta_{abv}\}}{L\{q_{aer}\}} = \frac{k_{28}}{1+T_{28}s} e^{-T_{28}s};$$

$$T_{28} = 12[\text{min}] = 720[\text{sec}];$$

$$T_{28} = 120[\text{min}] = 7200[\text{sec}];$$

$$k_{28} = \frac{\frac{\theta_{abvnom}}{h} \left[\frac{\text{h} \cdot ^\circ C}{\text{Nm}^3} \right]}{\frac{q_{aernom}}{h} \left[\frac{\text{Nm}^3}{\text{h}} \right]} = \frac{530 [\text{h} \cdot ^\circ C]}{3.34 \cdot 10^4 \left[\frac{\text{Nm}^3}{\text{h}} \right]} = 1.56 \cdot 10^{-2} \left[\frac{\text{h} \cdot ^\circ C}{\text{Nm}^3} \right]$$

$$H_{28}(s) = \frac{1.56 \cdot 10^{-2} \cdot e^{-720s}}{1+7200s};$$

14. Funcția de transfer a depresiunii în focar în raport cu debitul de gaze arse:

$$H_{33}(s) = \frac{L\{\Delta p_F\}}{L\{q_{ga}\}} = \frac{k_{33}}{1 + T_{33}s} e^{-T_{m33}s};$$

$$T_{m33} = 5[\text{sec}];$$

$$T_{33} = 10[\text{sec}];$$

$$k_{33} = \frac{\Delta p_{Fnom} [\text{mmH}_2\text{O}]}{q_{ganom} \left[\frac{\text{Nm}^3}{\text{h}} \right]} = \frac{-2[\text{mmH}_2\text{O}]}{1.52 \cdot 10^5 \left[\frac{\text{Nm}^3}{\text{h}} \right]} = -1.31 \cdot 10^{-5} \left[\frac{\text{h} \cdot \text{mmH}_2\text{O}}{\text{Nm}^3} \right]$$

$$H_{33}(s) = -\frac{1.31 \cdot 10^{-5} \cdot e^{-5s}}{1+10s};$$

În ipoteza $q_{aer} = 0$ și $q_{apa} = 0$ se consideră că presiunea în focar este egală cu cea din exterior. Dacă se pornesc exahaustoarele la q_{ganom} menținând în continuare $q_{aer} = 0$ în focar rezultă o depresiune care în regim staționar este $-2 [\text{mmH}_2\text{O}]$.

15. Funcția de transfer a nivelului apei din tambur în raport cu debitul apei de alimentare:

$$H_{44}(s) = \frac{L\{h\}}{L\{q_{apa}\}} = \frac{k_{44}}{1 + T_{44}s} e^{-T_{m44}s};$$

$$T_{m44} = 20[\text{sec}];$$

$$T_{44} = 20[\text{sec}]; h_{nom}=100[\text{mm}]=0.1 [\text{m}];$$

$$k_{44} = \frac{h_{nom} [\text{m}]}{q_{apanom} \left[\frac{\text{tona}}{\text{h}} \right]} = \frac{0.1[\text{m}]}{1.22 \cdot 10^3 \left[\frac{\text{tona}}{\text{h}} \right]} = 8.13 \cdot 10^{-5} \left[\frac{\text{h} \cdot \text{m}}{\text{tona}} \right]$$

$$H_{44}(s) = \frac{8.13 \cdot 10^{-5} \cdot e^{-20s}}{1+20s};$$

16. Funcția de transfer a debitului aburului viu în raport cu debitul apei de alimentare:

$$H_{46}(s) = \frac{L\{q_{abv}\}}{L\{q_{apa}\}} = \frac{k_{46}}{1 + T_{46}s} e^{-T_{m46}s};$$

$$T_{m46} = 12[\text{min}] = 720[\text{sec}]; T_{46} = 120[\text{min}] = 7200[\text{sec}];$$

$$k_{46} = \frac{q_{abvnom} \left[\frac{\text{tona}}{\text{h}} \right]}{q_{apanom} \left[\frac{\text{tona}}{\text{h}} \right]} = \frac{1.22 \cdot 10^3 \left[\frac{\text{tona}}{\text{h}} \right]}{1.22 \cdot 10^3 \left[\frac{\text{tona}}{\text{h}} \right]} = 1$$

$$H_{46}(s) = \frac{1 \cdot e^{-720s}}{1+7200s};$$

17. Funcția de transfer a salinității în raport cu debitul apei de alimentare:

$$H_{49}(s) = \frac{L\{S\}}{L\{q_{apa}\}} = \frac{k_{49}}{1 + T_{49}s} e^{-T_{49}s};$$

$$T_{49} = 60[\text{min}] = 3600[\text{sec}];$$

$$T_{49} = 600[\text{min}] = 36000[\text{sec}];$$

$$k_{49} = \frac{S_{nom}[\%]}{q_{apanom} \left[\frac{\text{tona}}{\text{h}} \right]} = \frac{1[\%]}{1.22 \cdot 10^3 \left[\frac{\text{tona}}{\text{h}} \right]} = 8.13 \cdot 10^{-4} \left[\frac{\text{h} \cdot \%}{\text{tona}} \right]$$

$$H_{49}(s) = \frac{8.13 \cdot 10^{-4} \cdot e^{-3600s}}{1 + 36000s};$$

18. Funcția de transfer a temperaturii aburului viu în supraîncălzitorul intermediar în raport cu debitul de injecție (apă sau abur)

$$H_{57}(s) = \frac{L\{\theta_{absi}\}}{L\{q_{ij}\}} = \frac{k_{57}}{1 + T_{57}s} e^{-T_{57}s};$$

$$T_{57} = 10[\text{sec}];$$

$$T_{57} = 10[\text{sec}];$$

$$\Delta\theta_{absinom} = 100^\circ\text{C};$$

$$k_{57} = -\frac{\Delta\theta_{absinom}[\text{°C}]}{q_{ijnom} \left[\frac{\text{tona}}{\text{h}} \right]} = -\frac{100[\text{°C}]}{1.22 \cdot 10^3 \left[\frac{\text{tona}}{\text{h}} \right]} = -8.136 \left[\frac{\text{h} \cdot \text{°C}}{\text{tona}} \right]$$

$$H_{57}(s) = \frac{-8.136 \cdot 10^{-4} \cdot e^{-10s}}{1 + 10s};$$

19. Funcția de transfer a salinității debitului de purjă :

$$H_{69}(s) = \frac{L\{S\}}{L\{q_{pj}\}} = \frac{k_{69}}{1 + T_{69}s} e^{-T_{69}s};$$

$$T_{69} = 60[\text{sec}];$$

$$T_{69} = 60[\text{sec}];$$

$$k_{69} = -\frac{\Delta S_{nom}[\%]}{q_{pjnom} \left[\frac{\text{tona}}{\text{h}} \right]} = -\frac{1[\%]}{1.22 \cdot 10^3 \left[\frac{\text{tona}}{\text{h}} \right]} = -0.8136 \left[\frac{\text{h} \cdot \%}{\text{tona}} \right]$$

$$H_{69}(s) = -\frac{0.8136 \cdot e^{-60s}}{1 + 60s};$$

Se poate reprezenta matricea de transfer a cazanului având dimensiunea (9x6) cu 19 funcții de transfer și restul 35 elementelor nule:

	q_c	q_{aer}	q_{ga}	q_{apa}	q_{ij}	q_{pj}
p_{abv}	H_{11}	H_{21}	0	0	0	0
O_2	H_{12}	H_{22}	0	0	0	0
Δp_F	0	H_{23}	H_{33}	0	0	0
h	0	0	0	H_{44}	0	0
p_{abt}	H_{15}	H_{25}	0	0	0	0
q_{abv}	H_{16}	H_{26}	0	H_{46}	0	0
θ_{absi}	H_{17}	H_{27}	0	0	H_{57}	0
θ_{abv}	H_{18}	H_{28}	0	0	0	0
S	0	0	0	H_{49}	0	H_{69}

Figura 5

Acest proces este un exemplu tipic de proces mare, având următoarele caracteristici importante: de la un semnal de intrare semnificativ (q_c) și celalalt semnal de ieșire semnificativ (q_{abv}) teoretic există relații complicate, dar care prin interpretarea unor răspunsuri tipice se pot approxima prin funcții de transfer care cumulează doar câțiva poli dominanti și un număr foarte mare de poli reziduali care se neglijă; în acest caz cu 1 până la 2 poli dominanti și cel puțin 6 până la 10 poli reziduali se justifică aceste aproximări simple ale funcțiilor de transfer.

Această observație este valabilă mai ales la procese puternic inertiale, la care primele 2 derive sunt semnificative, iar celelalte derive sunt puternic atenuate, deci se justifică neglijarea acestora.

(q – debit; θ - temperatură; h – nivel; Δp_F – depresiune; O_2 – concentrație; P – presiune

H_{26} – funcția de transfer a cazanului considerând ca intrare q_{aer} și ca ieșire q_{abv})

5. Acordarea regulatoarelor pentru principalele bucle de reglare (a presiunii aburului viu și a debitului de abur viu)

A. Reglarea presiunii aburului viu

Bucla de reglare este un sistem de urmărire în raport cu referința de comandă, având o comportare rapidă pentru că servomotorul pneumatic plus robinet SPR posedă inerție redusă.

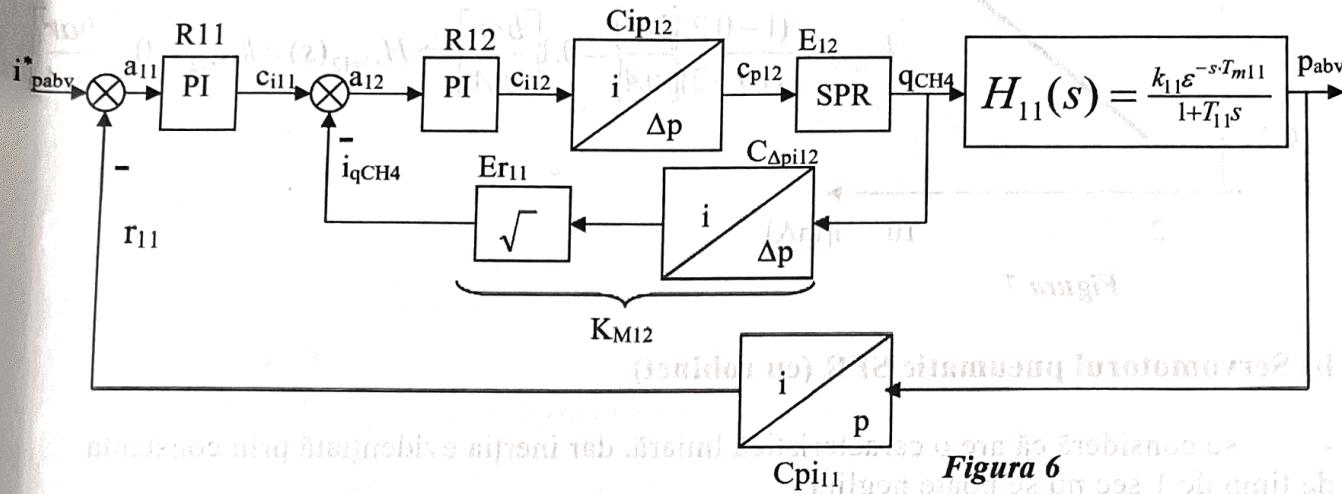


Figura 6

C_{ip12} — convertor curent unificat-presiune diferențială

SPR — servomotor pneumatic cu robinet

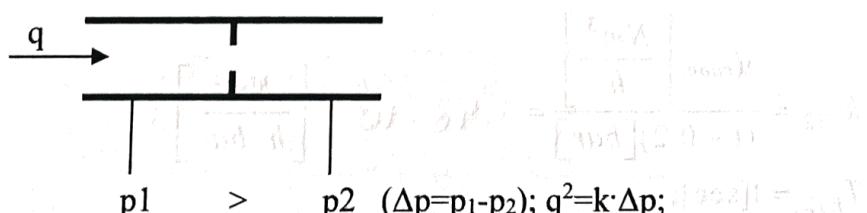
C_{pi11} — convertor presiune-curent unificat care asigură reacția exterioară (principală în regim staționar)

i^{*}_{pabv} — curent unificat de referință destinat stabilizării presiunii aburului viu

E_{r12} — extractor de radical

Bucla de reglare internă are un convertor Δp_{i12} și deoarece presiunea diferențială ca semnal de ieșire din diafragma calibrată este proporțională cu pătratul debitului, se impune extragerea de radical.

Diafragma calibrată:



Obs: - c_{i11} și c_{i12} sunt semnale de comandă în curent unificat iar c_{p12} este semnal de comandă în presiune unificată.

Se stabilesc funcțiile de transfer componente ale schemei de mai sus

a) Convertorul curent-presiune C_{ip12}

- se consideră neinerțial, cu factorul de proporționalitate care rezultă din caracteristica statică a generatorului

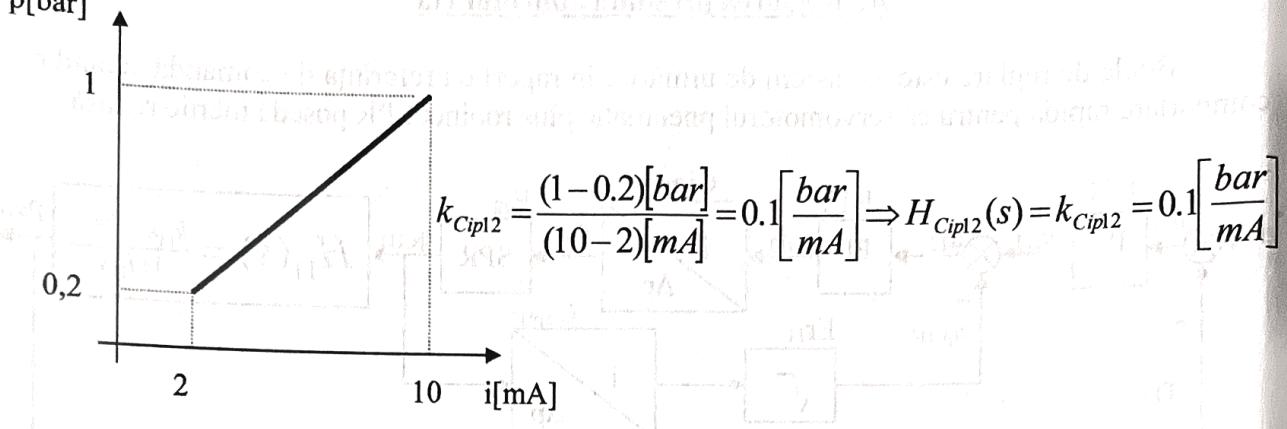


Figura 7

b) Servomotorul pneumatic SPR (cu robinet)

- se consideră că are o caracteristică liniară, dar inerția evidențiată prin constanta de timp de 1 sec nu se poate neglija

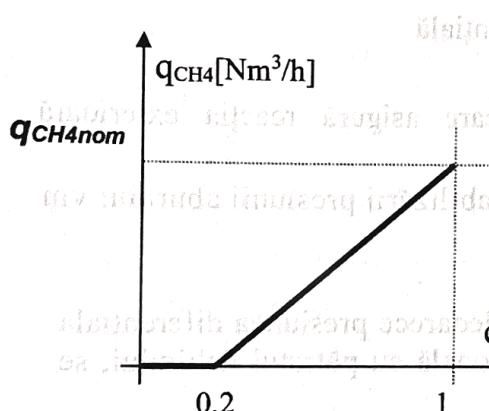


Figura 8

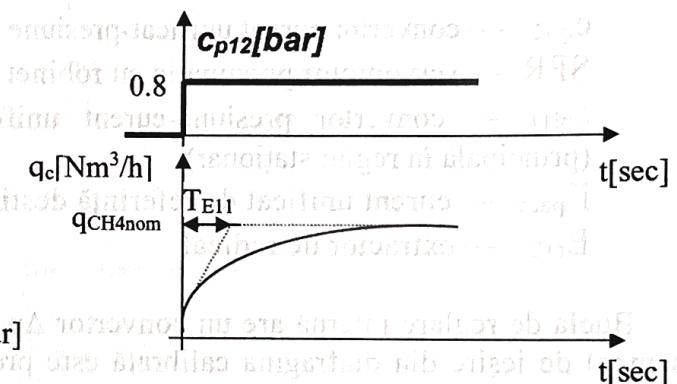


Figura 9: Răspunsul indicial al SPR

$$k_{E12} = \frac{q_{cnom} \left[\frac{\text{Nm}^3}{\text{h}} \right]}{(1 - 0,2) [\text{bar}]} = 1,48 \cdot 10^5 \left[\frac{\text{Nm}^3}{\text{h} \cdot \text{bar}} \right];$$

$$T_{E12} = 1 [\text{sec}];$$

$$H_{E12}(s) = \frac{L\{q_c\}}{L\{C_{p12}\}} = \frac{k_{E12}}{1 + T_{E12}s} = \frac{1,48 \cdot 10^5}{1 + s}$$

care este obiectivul de urmărit pe către acest servomotor?

c) Circuitul intern de reacție

- cuprinde traductorul de debit-presiune diferențială K_{M12} , convertorul de presiune diferențială-curent, extractorul de radical al căruia efect compensează efectul pătratic al traductorului; toate aceste elemente se consideră în ansamblu neinerțiale;
- coeficientul de proporționalitate rezultă din figura de mai jos:

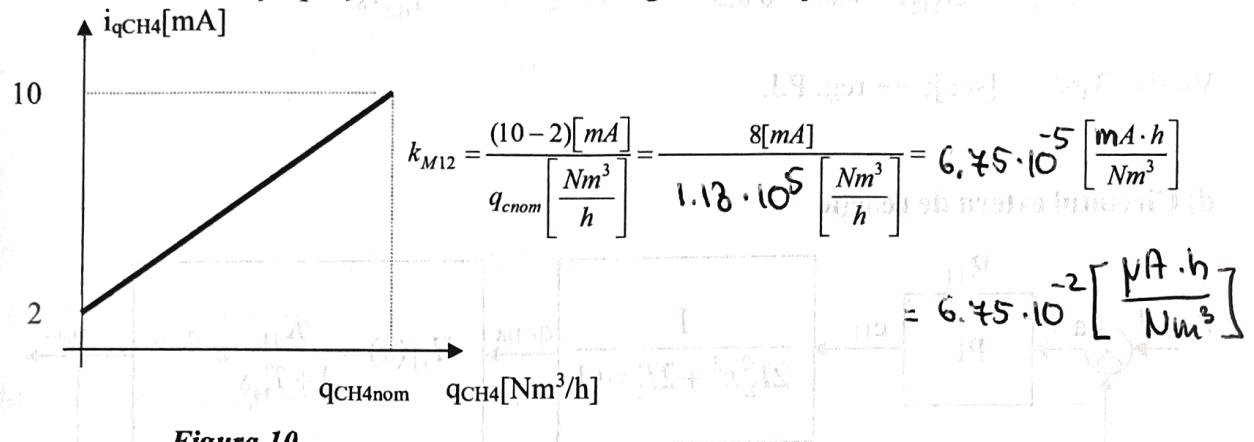
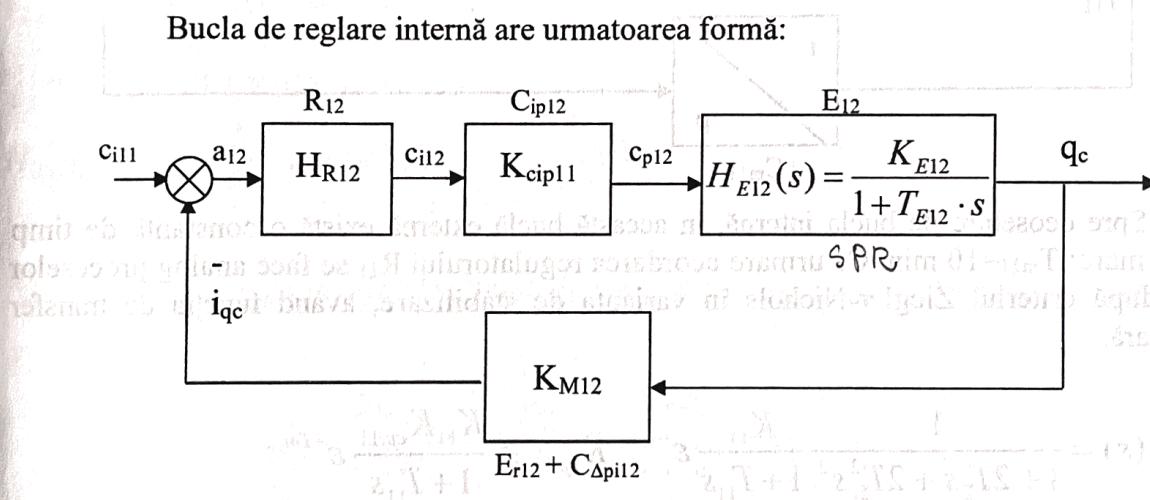


Figura 10

Bucla de reglare internă are urmatoarea formă:



Acest sistem fiind de inerție mică și de stabilizare, regulatorul R_{12} se va acorda după criteriul modulului, constanta de timp mort fiind neglijabilă (nu există T_m).

$$H_{R12}(s) = \frac{1}{2T_{\Sigma 12}s(1+T_{\Sigma 12}s)} \cdot \frac{1}{H_{EX12}(s)} = \frac{1}{0.02s(1+0.01s)} \cdot \frac{(1+s)(1+0.01s)}{1+T_{E12}s} = \frac{1}{0.02s}$$

$$H_{EX12}(s) = \frac{K_{cip11} \cdot K_{E12} \cdot K_{M12}}{1+T_{E12}s} = \frac{1}{1+T_{\Sigma 12}s} = \frac{K_{Ex12}}{(1+T_{E12}s)(1+T_{\Sigma 12}s)} = \frac{1}{(1+s)(1+0.01s)}$$

T_{Σ} – suma constantelor de timp necompensabile, comparabile ca mărime cu T_{R12} din H_{R12} (aici);

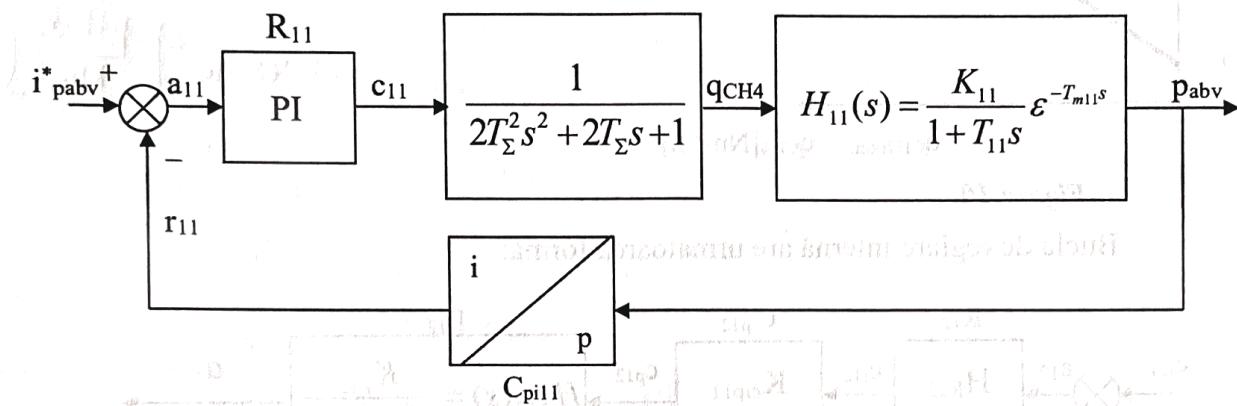
$$T_{\Sigma 12} = 10^{-2} \text{ [sec]} = 0.01 \text{ [sec]} \text{ și } T_{E12} = 1 \text{ [sec]}; K_{EX12}=1;$$

$$H_{R12}(s) = \frac{1}{2T_{\Sigma 12}s(1+T_{\Sigma 12}s)} \cdot \frac{(1+T_{\Sigma 12}s)(1+T_{E12}s)}{1+T_{E12}s} = \frac{1+T_{E12}s}{2 \cdot T_{\Sigma 12}s};$$

$$H_{R12}(s) = \frac{T_{E12} \cdot s}{2T_{\Sigma 12}s} + \frac{1}{2T_{\Sigma 12}s} = \frac{1}{0.02} + \frac{1}{0.02s} = 50 + \frac{1}{0.02s} = V_{R12} + \frac{1}{T_{i12} \cdot s};$$

$$V_R = 50, T_i = 0.02 \text{ [sec]}; \rightarrow \text{reg. P.I.}$$

d) Circuitul extern de reacție



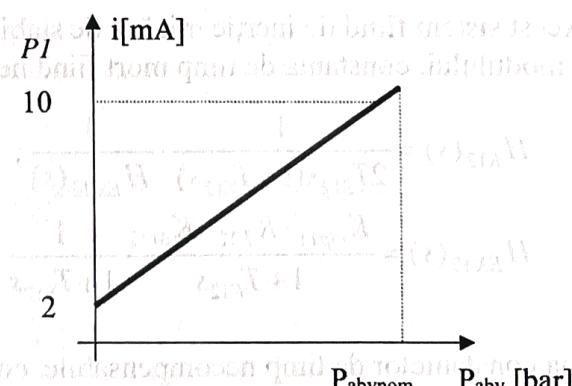
Spre deosebire de bucla internă, în această buclă exterană există o constantă de timp relativ mare: $T_{m11}=10$ min. Ca urmare acordarea regulatorului R_{11} se face analog proceselor lente după criteriul Ziegler-Nichols în varianta de stabilizare, având funcția de transfer exteroară.

$$H_{EX11}(s) = \frac{1}{1 + 2T_S s + 2T_S^2 s^2} \frac{K_{11}}{1 + T_{11}s} e^{-T_{m11}s} K_{cp11} \approx \frac{K_{11} K_{cp11}}{1 + T_{11}s} e^{-T_{m11}s}$$

Constanta de proporționalitate K_{cp11} rezultă din caracteristica statică din figura alăturată:

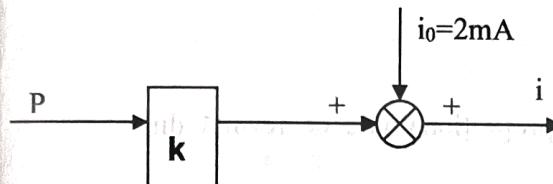
$$T_{11} = 100 \text{ min} (T_{\Sigma 12} \ll T_{11});$$

$$T_{m11} = 10 \text{ min} (T_{\Sigma 12} \ll T_{m11});$$



$$K_{cp11} = \frac{(10 - 2)[mA]}{P_{abvnom}[bar]} = \frac{8[mA]}{159 [bar]} = 0.0503 \left[\frac{mA}{bar} \right]$$

Se face modelarea pentru convertor:



$$K = \frac{(10 - 2)[mA]}{P_{abvnom}[bar]} = \frac{8[mA]}{159 [bar]} = 0.0503 \left[\frac{mA}{bar} \right];$$

$$i = i_0 + K \cdot p = 2[mA] + 8[mA] = 10[mA];$$

Folosind criteriul Ziegler-Nichols obținem:

$$V_{R11} = 0.8 \frac{T_{11}}{T_{m11}} = 0.8 \frac{6000[\sec]}{600[\sec]} = 8;$$

$$T_{i11} = 3T_{m11} = 30 [\text{min}] = 1800 [\text{sec}];$$

$$H_{R11}(s) = 8 + \frac{1}{1800s}; \Rightarrow \text{reg.P.I.}$$

$$P_i : H = V_{pi} + \frac{1}{T_{pi}s}$$

B. Acordarea regulatorului din bucla de reglare a debitului de abur viu (în tambur)

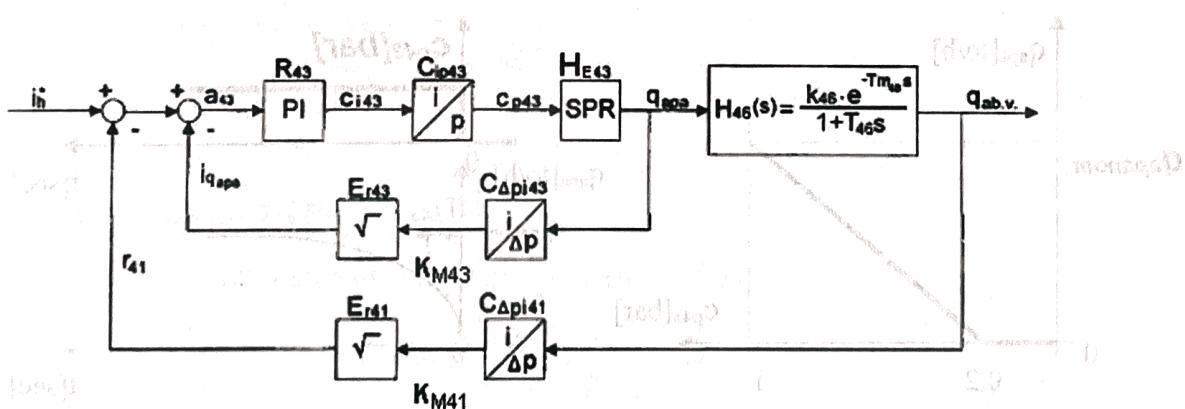
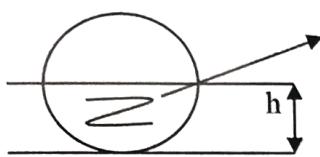


Figura 11

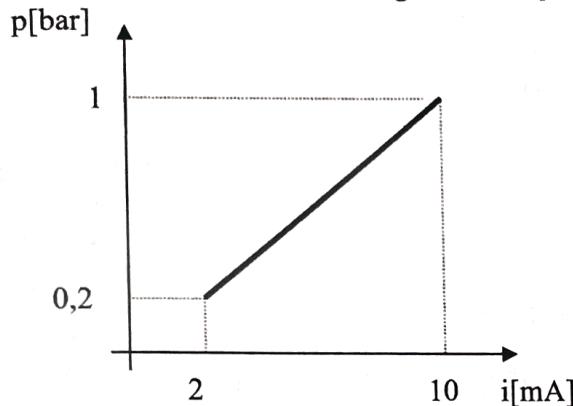
i_h^* → curentul unificat de referință a nivelului apei în tambur (h).



Apa condensată la temperatură de fierbere în tambur

a) Convertorul curent-presiune C_{ip43}

- se consideră neinerțial, cu factorul de proporționalitate ce rezultă din caracteristica din figura de mai jos:

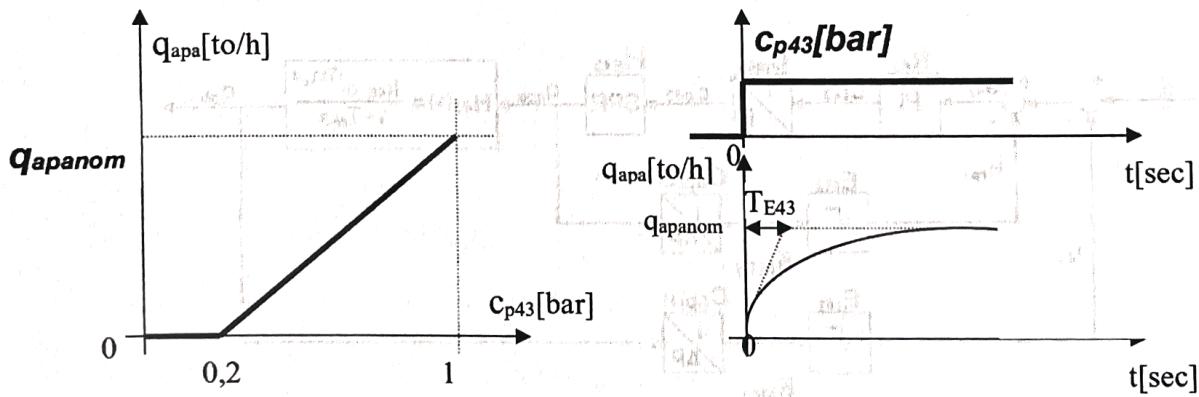


$$K_{Cip43} = \frac{(1-0.2)[bar]}{(10-2)[mA]} = 0.1 \left[\frac{bar}{mA} \right]$$

$$H_{Cip43}(s) = K_{Cip43} = 0.1 \left[\frac{bar}{mA} \right];$$

Figura 12**b) Servomotorul pneumatic cu ventil de reglare SPR (cu robinet)**

- se consideră că are o caracteristică liniară, având coeficientul de proporționalitate rezultând din figura:



$$H_{E43} = K_{E43} = \frac{q_{apnom} \left[\frac{\text{tona}}{h} \right]}{(1-0.2)[\text{bar}]} = \frac{1.22 \cdot 10^3 \left[\frac{\text{tona}}{h} \right]}{0.8[\text{bar}]} = 1.53 \cdot 10^3 \left[\frac{\text{tona}}{h \cdot \text{bar}} \right];$$

$T_{E43} = 1[\text{sec}]$;

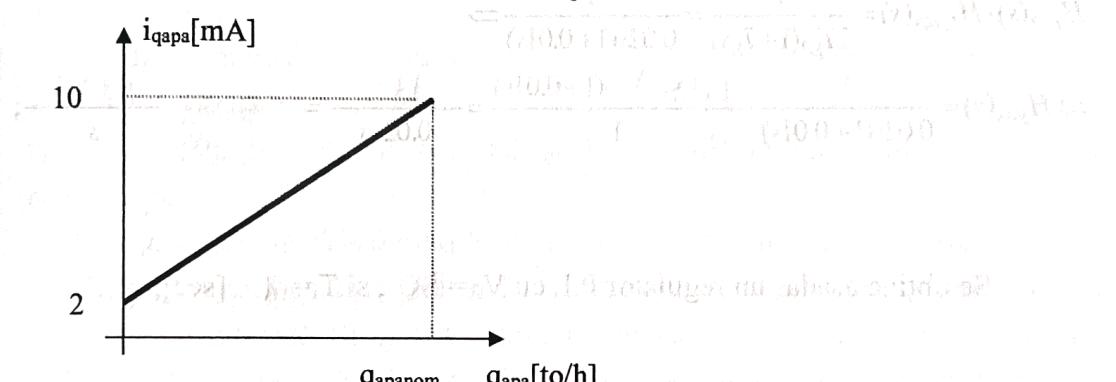
$$H_{E43}(s) = \frac{L\{q_{apa}\}}{L\{C_{p43}\}} = \frac{K_{E43}}{1 + T_{E43} \cdot s} = \frac{1.53 \cdot 10^3}{1 + s};$$

c) Circuitul intern de reacție

- cuprinde traductorul de debit-presiune diferențială, convertorul de presiune diferențială-curent, extractorul de radical al căruia efect compensează efectul pătratic al traductorului; toate aceste elemente se consideră neinerțiale, având coeficientul de proporționalitate:

$$K_{M43} = \frac{(10-2)[\text{mA}]}{q_{apnom} \left[\frac{\text{tona}}{h} \right]} = \frac{8[\text{mA}]}{1.22 \cdot 10^3 \left[\frac{\text{tona}}{h} \right]} = 0.0065 \left[\frac{\text{mA} \cdot h}{\text{tona}} \right];$$

Coefficientul a rezultat din figura de mai jos:



d) Circuitul extern de reacție

- conține aceleași elemente ca și bucla internă având:

$$K_{M41} = \frac{(10-2)[\text{mA}]}{q_{abvnom} \left[\frac{\text{tona}}{h} \right]} = K_{M43} = 0.0065 \left[\frac{\text{mA} \cdot h}{\text{tona}} \right];$$

$T_{m46} = 720[\text{sec}]$;

$T_{46} = 7200[\text{sec}]$; $K_{46} = 1$;

$$\text{partea fixata este: } H_{46}(s) = \frac{1}{1 + T_{46} \cdot s} \cdot e^{-T_{m46} \cdot s} = \frac{1}{1 + 7200s} \cdot e^{-720s} = \frac{L\{q_{abv}\}}{L\{q_{apa}\}}$$

Procesul este lent, cu o constantă de timp $T_{46}=7200$ [sec] = 2 [h] și are un timp mort considerabil $T_{m46}=720$ [sec] = 12 [min]. Din cauza întârzierii mari introduse de proces, regulatorul va acționa prin buclă de reacție internă asupra debitului de apă, la acordarea lui putându-se neglija efectul buclei de reacție externe.

Bucla interioară fiind fără timp mort, regulatorul se poate acorda după criteriul modulului astfel:

$$H_{Ext43}(s) = k_{Cip43} \cdot H_{E43} \cdot k_{M43} = k_{Cip43} \cdot \frac{k_{E43}}{1+T_{E43}s} \cdot k_{M43}; \quad \left[\frac{\text{bar}}{\text{m}^3/\text{h}} \right] \left[\frac{\text{tonc}}{\text{bar}} \right] \left[\frac{\text{m}^3/\text{h}}{\text{tonc}} \right]$$

$$H_{Ext43}(s) = 0.1 \cdot \frac{1536}{1+s} \cdot 0.0065 = \frac{0.9984}{1+s} \approx \frac{1}{1+s};$$

La aceasta se adaugă o constantă de timp $T_{\Sigma43}=0.01$ [sec], considerată ca fiind suma constantelor de timp principal necompensabile.

$$H_{Ext43}(s) = H_{Ext43}(s) \cdot \frac{1}{1+T_{\Sigma43}s} = \frac{1}{1+s} \cdot \frac{1}{1+0.01s};$$

$$H_{R43}(s) \cdot H_{Ext43}(s) = \frac{1}{2T_{\Sigma}s(1+T_{\Sigma}s)} = \frac{1}{0.02s(1+0.01s)} \Rightarrow$$

$$\Rightarrow H_{R43}(s) = \frac{1}{0.02s(1+0.01s)} \cdot \frac{(1+s) \cdot (1+0.01s)}{1+s} = \frac{1+s}{0.02 \cdot s} = 50 \cdot \frac{1+s}{s};$$

Se obține astăzi un regulator P.I. cu $V_R = 50$; și $T_i = 1$ [sec];

Capitolul 6. Reglarea frecvenței și a puterii active

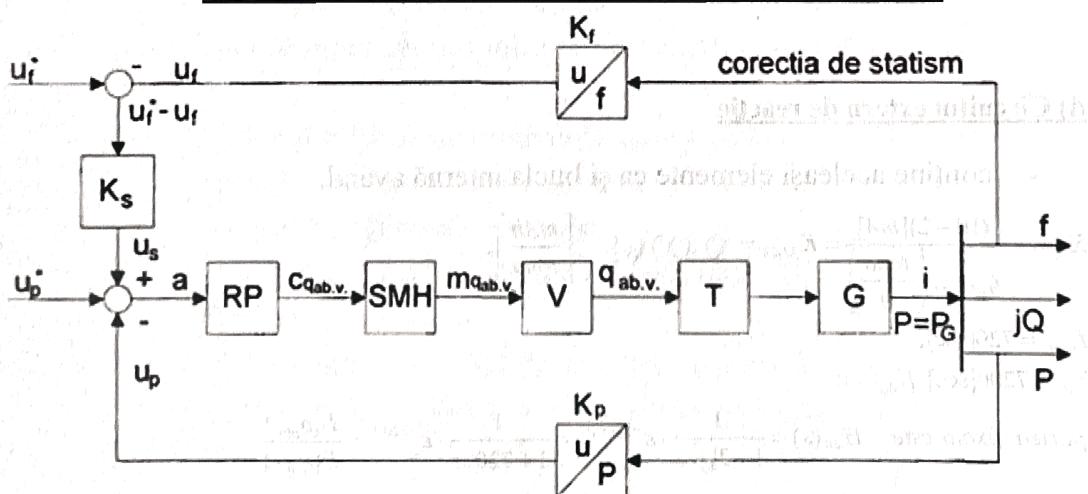


Figura 13: Sistemul de reglare a puterii active

Există 2 bucle principale de reglare:

- reglarea în raport cu puterea activă
- reglarea care asigură corecția de statism

Notății:

RP	- regulatorul puterii active
SMH	- servomotor hidraulic
V	- ventilul de admisie parțială a aburului în turbină
T	- turbină
G	- generatorul sincron cu o pereche de poli în regim trifazat
U/f	- convertor frecvență-tensiune
U_f	- tensiune unificată (0M 0V) proporțională cu frecvența
U_f*	- tensiunea de referință a frecvenței
K_s	- element de statism

Deoarece acest sistem de reglare intră în categoria proceselor rapide, semnalele unificate în curent se înlocuiesc cu semnale unificate în tensiune. Curentul unificat se utilizează la procese lente pentru care distanțele sunt mari și implicit pretabile la inducții parazite.

Deoarece generatoarele de curent unificat posedă rezistențe de ieșire mari la care se asociază reacții negative de curent puternice, există o desensibilizare aproape totală la inducții parazite și la modificarea rezistențelor de sarcină echivalente.

Prezența unui nul fals desensibilizează și mai mult influența parazită.

Tensiunea unificată se pretează pentru procese rapide pentru care lungimea circuitelor este scurtă. Se pretează alimentarea cu generatoare de tensiune constantă având rezistență de ieșire cât mai mică deoarece sunt mai ieftine și mai avantajoase.

U_{f*}, U_{p*} - tensiuni de referință pentru frecvență, putere activă

U_f - reacția în tensiune proporțională cu frecvența u_f

U_s - tensiunea de ieșire din elementul de statism K_s

a - abaterea de reglare dintre U_{p*} și U_p care este tensiune proporțională cu puterea activă

C_{qabv} - comanda debitului de abur viu

m_{qabv} - semnalul de execuție a debitului de abur viu: reprezintă deplasarea unghiulară pe care o dezvoltă axul cu care acționat hidraulic și care prin rotere deschide progresiv cele n supape de admisie parțială a aburului.

Abaterea dintre U_p și U_p^* este considerată semnal de intrare pentru regulatorul RP, rezultând astfel comanda C_{qabv} pentru servomotorul hidraulic SMH, care prin intermediul ventilului actionează asupra turbinei T și generatorului G.

Abaterea dintre U_p și U_p^* reprezintă abaterea de la reglare fără corecția de statism.

Este bucla principală față de care ponderea corecției de statism este mult mai mică (circa 10%) asigurând încărcarea grupului cu putere activă, proporțională cu puterea nominală a grupului, în ipoteza apariției unei abateri în regim de avarie a frecvenței de 50Hz. Corecția de statism se realizează prin intermediul abaterii dintre U_f și U_f^* și a elementului de statism K_s .

Ne interesează stabilirea și interpretarea funcțiilor de transfer ale elementelor componente.

a) Servomotorul hidraulic SMH

Sertărașul S alimentat la presiunea P_{al} (între 6-100 atm) etanșează complet spre cele 2 admisii, spre pistonul P, numai dacă sertărașul S se află într-o poziție mediană. Ca urmare pistonul P este nemișcat iar semnalul de ieșire (deplasarea axială 'u') este nulă.

Resortul antagonist R este calibrat în funcție de poziția unui șurub de tensionare. Se asigură o poziție axială a elementului hidraulic de reacție format din carcasa C și pistonul interior F. Nu există legătură axială directă între punctele O₃ și O, decât prin acțiunea intermediară, prin variația presiunii de ulei deasupra și dedesubtul pistonului P.

Semnalul de intrare este abaterea 'a', iar semnalul de ieșire este comanda 'u' ce acționează direct asupra ventilului. Dacă abaterea 'a' crește, pârghia L₁L₂ se rotește în jurul lui O₃, asigurând deplasarea în sus 'b↑' și implicit admisia uleiului prin sertărașul S în partea de sus a pistonului P, care este antrenat în jos (scade 'u'). Apare o reacție prin L₃L₄ care se rotește în jurul lui O și asigură deplasarea în jos a acestuia, rezultând deplasarea în jos a lui 'v'. Astfel coboară și carcasa C, rezultând o ușoară suprapresiune în partea de sus a pistonului F cu efect de antrenare în jos a axei și implicit prin 'w↓' se deplasează O₃ în momentele următoare. Astfel coboară și O₂ rezultând 'r↓'.

Deoarece 'b↑' și 'r↓' sunt antagoniste rezultă o reacție negativă hidraulică, care cumulează anumite avantaje:

- micșorează inerția echivalentă mecanică
- îmbunătățește liniarizarea, cu efect de atenuare a unor dereglați mecanice
- mărește rezerva de stabilitate, cu efect de atenuare a unor tendințe de autooscilații

Deoarece uleiul este incompresibil, asociat cu avantajele reacției negative hidraulice, rezultă că sistemul sertăras-piston este foarte puțin inerțial, asigură forțe și cupluri foarte mari, ceea ce la motoarele electrice ar prezenta soluții prea complicate și ineficiente.

Se pot scrie următoarele ecuații:

$$(1) \quad b = K_1 \cdot a \quad \text{unde} \quad K_1 = \frac{L_2}{L_1 + L_2};$$

$$(2) \quad c = b - r;$$

$$(3) \quad \frac{du}{dt} = K \cdot c;$$

$$(4) \quad v = K_2 \cdot u \quad \text{unde} \quad K_2 = \frac{L_3}{L_3 + L_4};$$

$$(5) \quad F \cdot \frac{d}{dt}(v - w) = R \cdot w;$$

$$(6) \quad r = K_3 \cdot w \quad \text{unde} \quad K_3 = \frac{L_1}{L_1 + L_2};$$

Ecuația (3) reprezintă viteza de deplasare a pistonului P, proporțională cu suprafața de admisie a sertărașului S și cu presiunea de alimentare P_{al}.

Ecuația (5) reprezintă echilibrul între forța dezvoltată de amortizorul hidraulic F și forța antagonistă dezvoltată de resortul R.

Aplicând transformata Laplace cu condiții inițiale nule asupra sistemului de ecuații (1)÷(6), rezultă:

- (1) $L\{b\} = K_1 \cdot L\{a\}$
- (2) $c = L\{b - r\};$
- (3) $s \cdot L\{u\} = K \cdot L\{c\}$
- (4) $v = K_2 \cdot u$
- (5) $F \cdot s \cdot L\{v - w\} = R \cdot L\{w\}$
- (6) $L\{r\} = K_3 \cdot L\{w\}$

Eliminând variabilele intermediare $L\{b\}$, $L\{c\}$, $L\{u\}$, $L\{w\}$, $L\{r\}$ obținem forma funcției de transfer a sistemului sertăraș-piston:

$$\frac{L\{u\}}{L\{a\}} = \frac{K_p + \frac{1}{T_i \cdot s}}{1 + T \cdot s} \quad \text{unde}$$

$$K_p = \frac{F \cdot K \cdot K_1}{R + K \cdot K_2 \cdot K_3 \cdot F}; \quad T_i = \frac{R + K \cdot K_2 \cdot K_3 \cdot F}{F \cdot K \cdot K_1}; \quad T = \frac{F}{R + K \cdot K_2 \cdot K_3 \cdot F};$$

F - coeficientul de vâscozitate al amortizorului hidraulic

Deoarece K - foarte mare, constanta T are valori uzuale mult sub 1 sec, deci se poate neglijă. Vom obține astăzi $\frac{L\{u\}}{L\{a\}}$ cu comportare PI, fără inerție proprie.

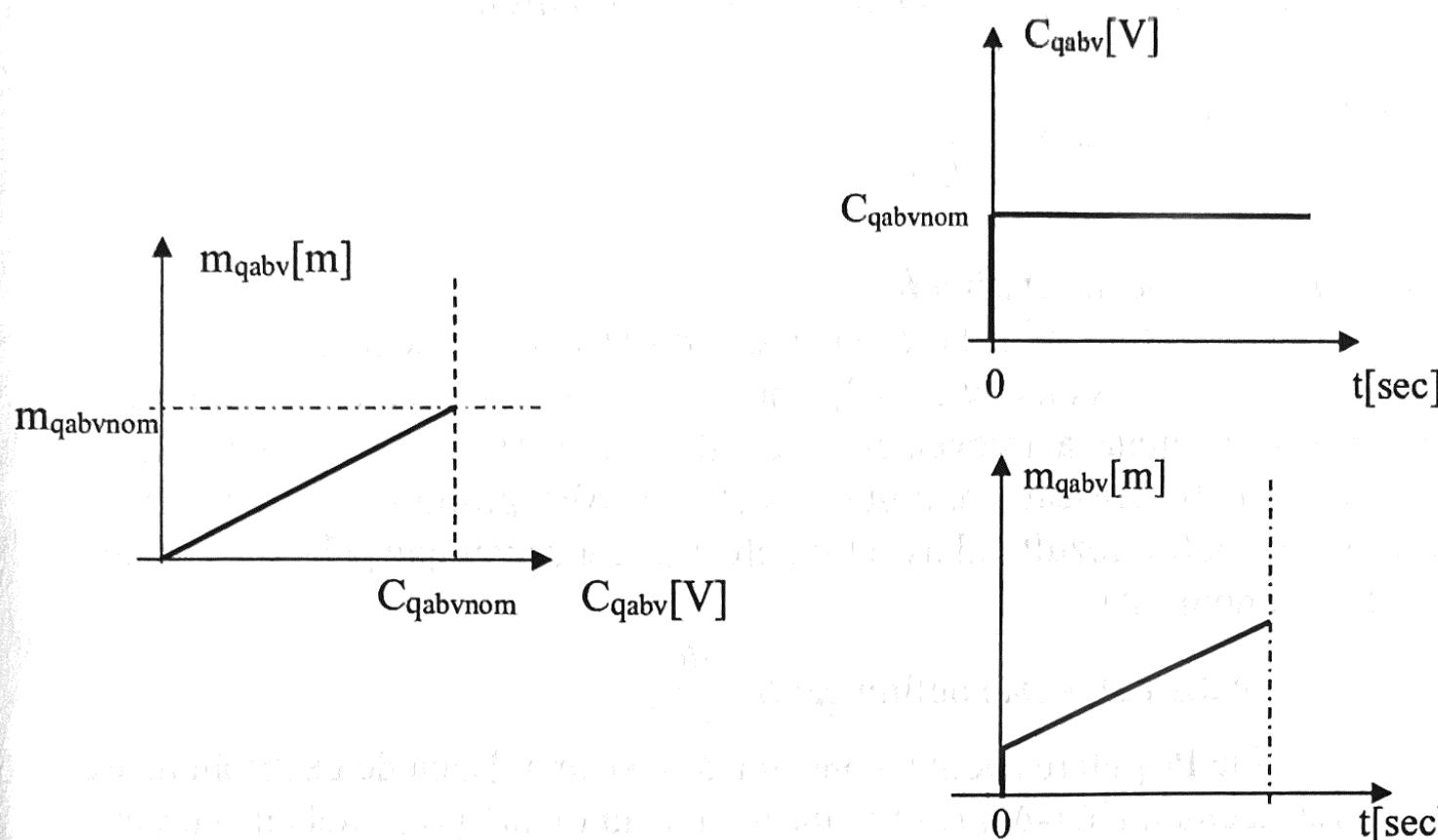
$$\Rightarrow H_{SMH}(s) \cong K_{SMH} + \frac{1}{T_{SMH} \cdot s};$$

$$K_{SMH} = \frac{m_{qabvnom}}{c_{qabvnom}} = \frac{0.1[m]}{10[V]} = 0.01 \left[\frac{m}{V} \right]$$

unde $m_{qabvnom}$ - deplasarea tijei SMH la extremitate.

$$T_{SMH} = 20[\text{sec}] \Rightarrow$$

$$\Rightarrow H_{SMH}(s) \cong 0.01 + \frac{1}{20 \cdot s};$$

**b) Ventilul V**

$$H_V(s) = \frac{L\{q_{abv}\}}{L\{m_{qabv}\}} = K_V = \frac{q_{abvnom} \left[\frac{\text{tona}}{h} \right]}{m_{qabvnom} [m]} = \frac{1.22 \cdot 10^3 \left[\frac{\text{tona}}{h} \right]}{0.1 [m]} = 1.22 \cdot 10^4 \left[\frac{\text{tona}}{m \cdot h} \right]$$

c) Turbina + generatorul T+G

$$H_{T+G}(s) = \frac{L\{P_G\}}{L\{q_{abv}\}} = \frac{K_{T+G}}{1 + T_{T+G} \cdot s};$$

$$T_{T+G} \approx 10[\text{sec}];$$

$$K_{T+G} = \frac{P_{Gnom} [\text{MW}]}{q_{abvnom} \left[\frac{\text{tona}}{h} \right]} = \frac{445 [\text{MW}]}{1.22 \cdot 10^3 \left[\frac{\text{tona}}{h} \right]} = 0.362 \left[\frac{\text{MW} \cdot h}{\text{tona}} \right] \Rightarrow$$

$$\Rightarrow H_{T+G}(s) = \frac{0.362}{1 + 10 \cdot s}$$

d) Bucla de reacție de putere activă și corecție de statism

1. Pentru traductorul de putere activă-tensiune

$$K_p = \frac{L\{U_P\}}{L\{P\}} = \frac{10 [V]}{445 [\text{MW}]} = 0.0225 \left[\frac{V}{\text{MW}} \right];$$

2. Coeficientul de transfer pe circuitul de corecție al statismului

$$K_F = \frac{L\{U_f\}}{L\{f\}} = \frac{10[V]}{50[Hz]} = 0.2 \left[\frac{V}{Hz} \right];$$

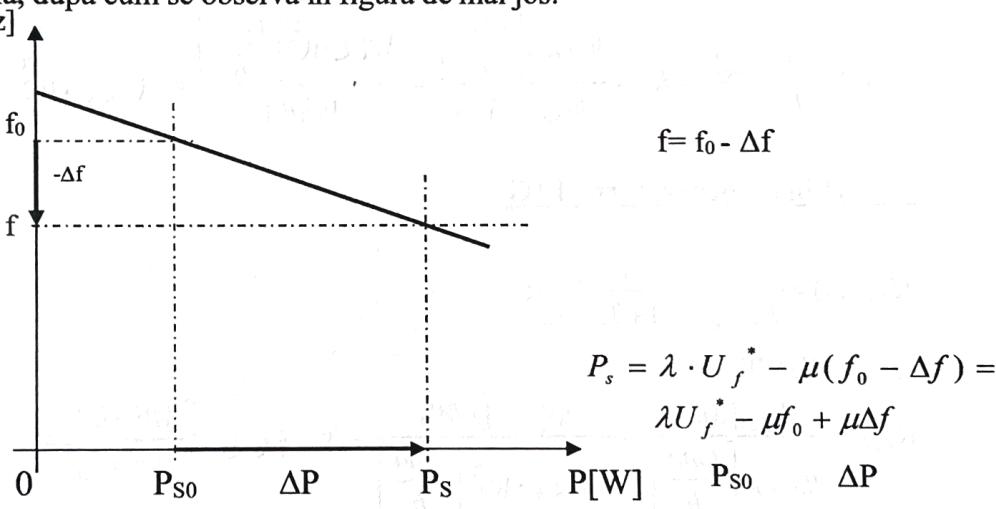
3. Coeficientul reacției de statism K_S

Coeficientul K_S rezultă din comportarea dorită în regim staționar.

În general se consideră $f(P)$ liniarizată. Se urmărește ca pentru o descreștere accidentală a frecvenței sistemului energetic cu $(-\Delta f)$ să rezulte o anumită contribuție crescătoare a puterii active $(+\Delta P)$, proporțională cu puterea nominală a grupului, rezultând astfel un efect de readucere parțială a frecvenței spre valoarea nominală.

Statismul S este definit ca: $S = \frac{df}{dP}$;

Fie P_s puterea activă consumată în sistem. Dacă de exemplu apare descreșterea accidentală $(-\Delta f)$ rezultă încărcarea automată prin bucla de corecție de statism a grupului de la P_{s0} la P_s cu efect de readucere a frecvenței la frecvența nominală, după cum se observă în figura de mai jos:



Se pot scrie relațiile:

$$U_s = K_S \cdot (U_f^* - U_f) = K_S \cdot (U_f^* - K_f \cdot f)$$

$$P_s = K_{SP} \cdot U_s = K_{SP} \cdot K_S \cdot (U_f^* - K_f \cdot f) \rightarrow P_s = \text{puterea corecției de statism}$$

unde K_{SP} este puterea corecției de statism raportată la reacția

$$f = f_0 - \Delta f \Rightarrow P_s = \lambda \cdot U_f^* - \mu(f_0 - \Delta f) = \lambda \cdot U_f^* - \mu \cdot f_0 + \mu \cdot \Delta f = P_{s0} + \Delta P$$

unde $\mu = K_{SP} \cdot K_S \cdot K_F$ și $\lambda = K_{SP} \cdot K_S$

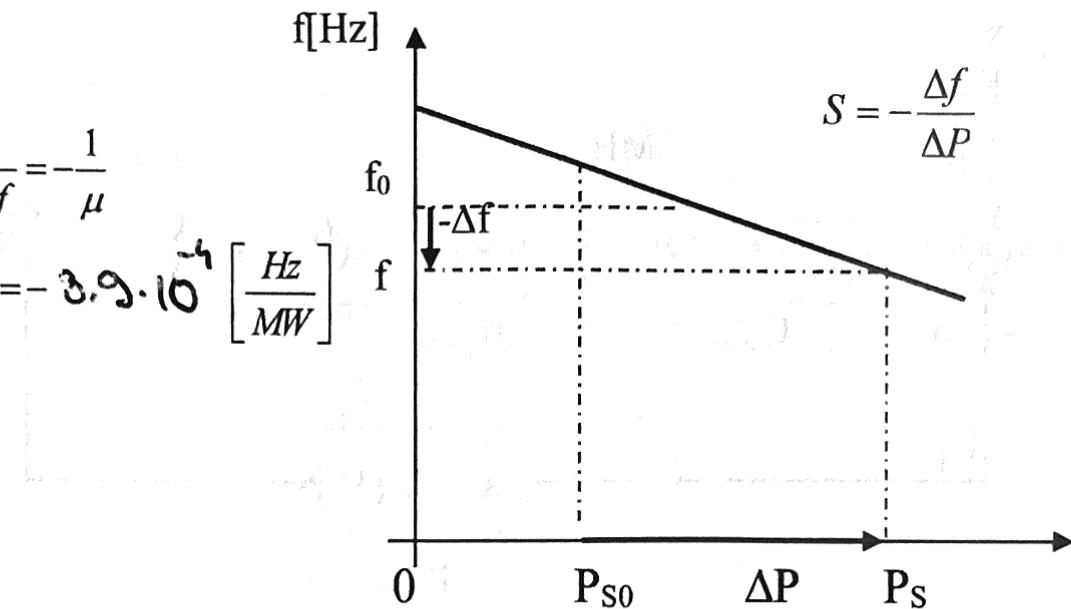
Deci pentru o descreștere ($-\Delta f$) corespunde din partea grupului o contribuție de putere $\Delta P = \mu \Delta f$

Se impune acest statism sub forma:

$$f = f_0 - S \cdot P$$

$$S = -\frac{df}{dP} = -\frac{\Delta f}{\mu \cdot \Delta P} = -\frac{1}{\mu}$$

$$S = -\frac{0.4[\text{Hz}]}{P_{Gnom}[\text{MW}]} = -3.9 \cdot 10^{-4} \left[\frac{\text{Hz}}{\text{MW}} \right]$$



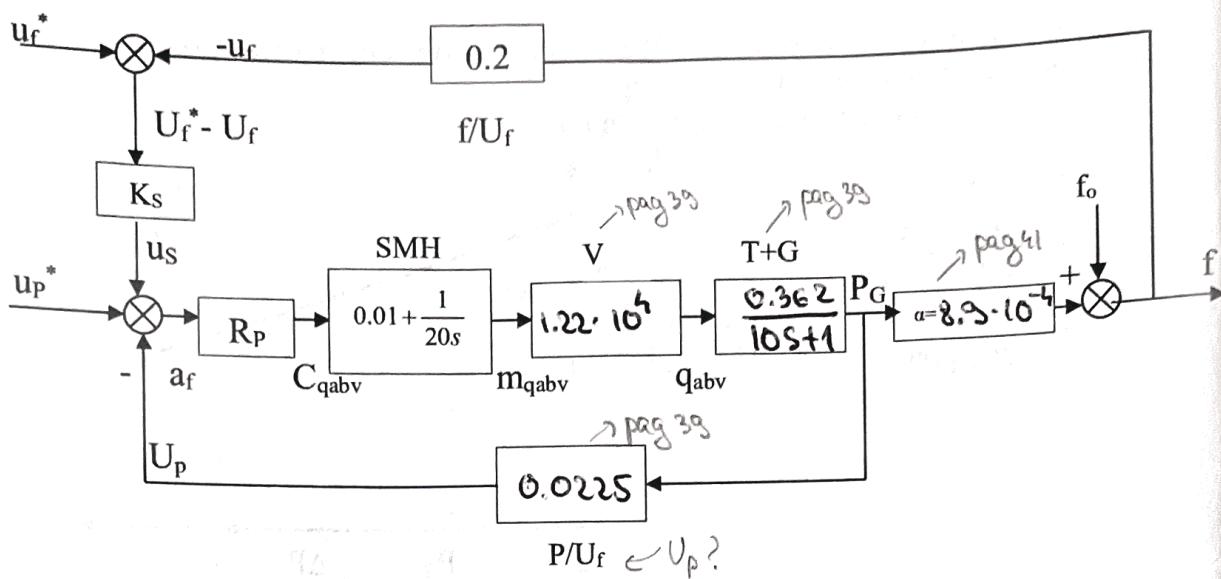
- unde:
 -0.4 reprezintă abaterea de frecvență maximă admisă în jurul frecvenței nominale;
 -S reprezintă raportul între variația frecvenței sistemului energetic la variația puterii grupului de la "0" la P_{nom} .

d) Sistemul echivalent de reglare al frecvenței și al puterii active

Dacă puterea livrată de grup este nulă ($P_G = 0$), frecvența sistemului electroenergetic este f_0 . În aceleasi condiții de consum, prin creșterea progresivă a P_G , rezultă o creștere aproximativ liniară a frecvenței. Dacă grupul este încărcat la o putere P_G , dar sarcina prezintă fluctuații, datorită statismului, grupul se va autoîncărca / descărca după cum frecvența descrește respectiv crește.

$$f = f_0 + \alpha \cdot P_G \quad \text{unde } \alpha = 8.9 \cdot 10^{-4} [\text{Hz/MW}] \quad \alpha = S \quad (\text{pag. 44})$$

Ca urmare, o putere livrată în sistem $P_G = 445[\text{MW}]$ va atrage o creștere a frecvenței sistemului de $0.41 [\text{Hz}]$



Acordarea regulatorului puterii active RP se face după criteriul modulului, sistemul echivalent fiind cel mai apropiat de un sistem rapid, fiind impusă o comportare de stabilizare a frecvenței.

$$H_{Ex1}(s) = H_{SMH}(s) \cdot H_V \cdot H_{T+G}(s)$$

$$\text{Deci, } H_{Ex1}(s) = \left(0.01 + \frac{1}{20s}\right) \cdot 1.22 \cdot 10^4 \cdot \frac{0.362}{10s + 1}$$

$$= \frac{89s + 445}{s(20s + 2)} = \frac{445(0.2s + 1)}{2s(10s + 1)} = 222.5 \frac{0.2s + 1}{s(10s + 1)}$$

Circuitul pe calea directă are funcția de transfer fără regulator H_{Ex} . Întreaga buclă împreună cu convertorul de putere activă-tensiune va avea funcția de transfer:

$$H_d(s) = H_{Ex1}(s) \cdot K_P = 222.5 \cdot \frac{0.2s + 1}{s(10s + 1)} \cdot 0.0225 = 5 \cdot \frac{0.2s + 1}{s(10s + 1)}$$

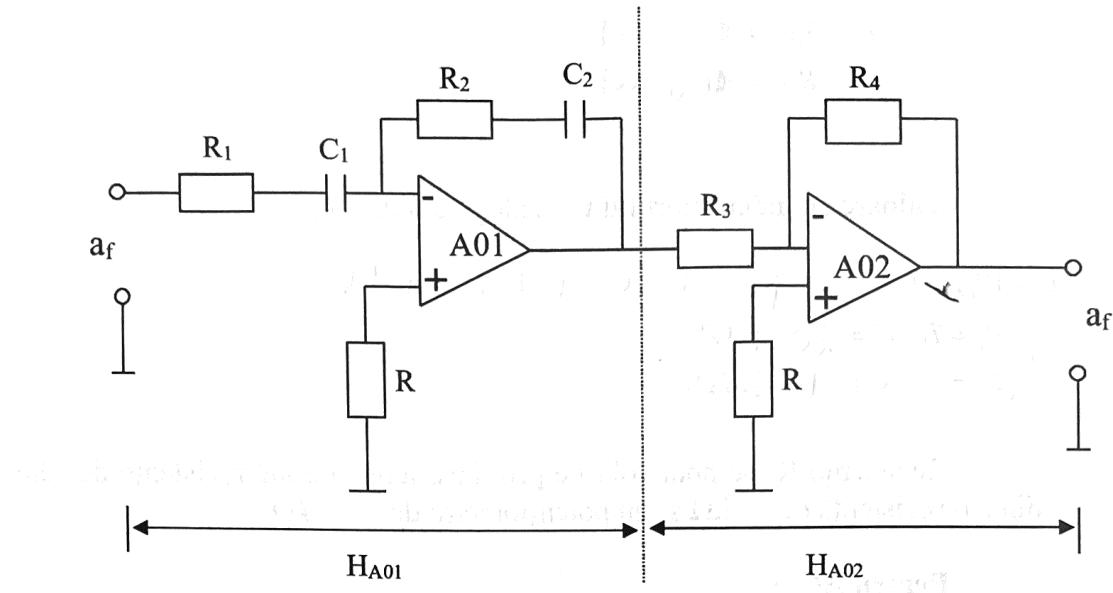
$$H_{Ex}(s) = H_d(s) \cdot \frac{1}{1 + T_\Sigma \cdot s} = 5 \cdot \frac{0.2s + 1}{s(10s + 1)} \cdot \frac{1}{1 + 0.01s}$$

unde $T_\Sigma = 0.01$ [sec] și reprezintă suma constantelor de timp principal necompensabile.

$$\begin{aligned}
 H_{RP}(s) &= \frac{1}{2 \cdot T_\Sigma \cdot s \cdot (1 + T_\Sigma \cdot s)} \cdot \frac{1}{H_{Ex}(s)} \\
 &= \frac{1}{0.02s(1 + 0.01s)} \cdot \frac{s(10s + 1)(1 + 0.01s)}{5(0.2s + 1)} \\
 &= \frac{10s + 1}{0.1(0.2s + 1)} = 10 \cdot \frac{10s + 1}{0.2s + 1} = H_{A01} \text{ ead} \\
 &= H_{A01} \cdot H_{A02}
 \end{aligned}$$

e) Modelarea analogică a regulatorului

Funcția de transfer a regulatorului RP se poate modela analogic prin 2 amplificatoare operaționale legate în serie ca în figura de mai jos:



Un amplificator operațional are următoarele proprietăți:

- în circuit deschis amplificarea este foarte mare (cel puțin 10^4)
- posedă 2 borne de intrare: una inversoare (folosită uzual) și una neinversoare care se asociază reacțiilor pozitive
- impedanța de intrare foarte mare (cel puțin $1 M\Omega$)
- impedanța de ieșire foarte mică ($1 \div 10\Omega$) - generator ideal la ieșire
- constanta de timp echivalentă neglijabilă (cel mult 10^{-4})
- $H_{AO}(s) = \frac{L\{V_o\}}{L\{V_i\}} \cong \frac{-Z_R}{Z_i}$

R se calibrează astfel încât puntea rezistivă echivalentă să fie echilibrată în regim staționar.

Se consideră că $C_1 = C_2 = C$

$$H_{AOech}(s) = -\frac{R_2 + \frac{1}{C \cdot s}}{R_1 + \frac{1}{C \cdot s}} \cdot (-1) \cdot \frac{R_4}{R_3} = \frac{1 + T_2 \cdot s}{1 + T_1 \cdot s} \cdot K$$

$$\text{unde } K = \frac{R_4}{R_3}; \quad T_1 = R_1 C; \quad T_2 = R_2 C;$$

Primul amplificator introduce un pol și un zero, iar al doilea este un amplificator inversor. Prin identificare ($H_{RP}(s) = H_{AOech}(s)$) se obține:

Pentru AO1:

$$H_{AO1}(s) = \frac{1 + T_2 \cdot s}{1 + T_1 \cdot s} = \frac{1 + R_2 C \cdot s}{1 + R_1 C \cdot s}$$

$$\Rightarrow \begin{cases} T_1 = R_1 C = 0.2 \text{ [sec]} \\ T_2 = R_2 C = 10 \text{ [sec]} \end{cases}$$

Valoarea condensatorului C se alege din catalog:

$$C = 10[\mu F] \quad \frac{1}{\mu F} = 10^6 \Omega = 10^3 k\Omega \leq 1 M\Omega$$

$$\Rightarrow \begin{cases} R_1 = T_1 / C = 20 [k\Omega] \\ R_2 = T_2 / C = 10 [M\Omega] \end{cases}$$

Rezistența R_1 se poate obține prin inserarea a două rezistențe de câte $k\Omega$ sau dintr-o rezistență de $k\Omega$ și un potențiometru de $k\Omega$.

Pentru AO2:

$$H_{AO2}(s) = K = \frac{R_4}{R_3}$$

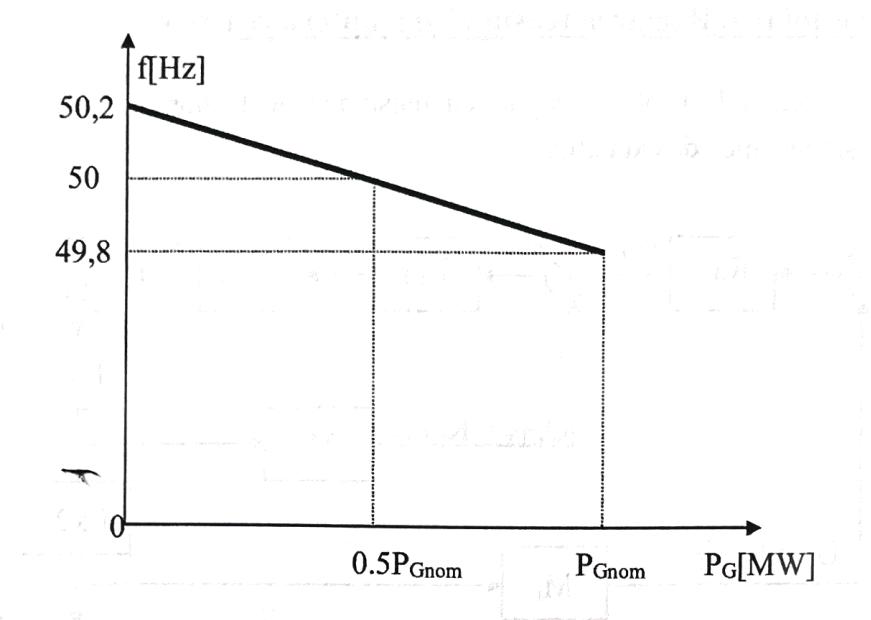
$$\text{Valorile rezistențelor } R_3 \text{ și } R_4 \text{ se aleg din catalog: } \Rightarrow \begin{cases} R_3 = 100 [k\Omega] \\ R_4 = 1 [M\Omega] \end{cases}$$

f) Calculul buclei corectoare de statism

Coeficientul K_S se calculează din condiția ca plaja de frecvență $\pm 0.2\text{Hz}$, adică $\Delta f=0.4\text{Hz}$, în jurul frecvenței nominale de 50Hz , să poată fi asigurată de puterea nominală a grupului.

$$S = -\frac{\Delta f[\text{Hz}]}{P_{Gnom}[\text{MW}]} = -\frac{0.4}{445} \approx -8.98 \cdot 10^{-5} \left[\frac{\text{Hz}}{\text{MW}} \right]$$

Creșterea puterii nominale P_{Gnom} are ca efect scăderea frecvenței f , după cum se observă în figura de mai jos:



Traductorul de putere are coeficientul $0.2[V/Hz]$.

În regim staționar rezultă:

$$\tilde{P}_G = \frac{1}{10} \cdot P_{Gnom} \cdot (U_P^* + U_S) = \frac{1}{10} \cdot P_{Gnom} \cdot [U_P^* + K_S \cdot (U_f^* - 0.2 \cdot f)]$$

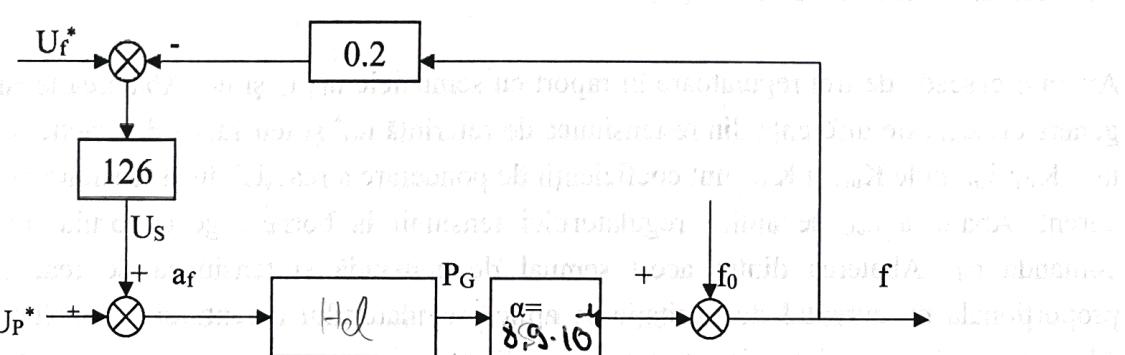
$$\tilde{P}_G = \frac{1}{10} \cdot P_{Gnom} \cdot (U_P^* + K_S \cdot U_f^*) - 0.02 \cdot P_{Gnom} \cdot K_S \cdot f$$

$$\Rightarrow f = \frac{1}{0.02 \cdot P_{Gnom} \cdot K_S} \left[\frac{1}{10} \cdot P_{Gnom} \cdot (U_P^* + K_S \cdot U_f^*) - \tilde{P}_G \right]$$

$$S = \frac{df}{d\tilde{P}_G} = -\frac{1}{0.02 \cdot P_{Gnom} \cdot K_S} \Rightarrow K_S = \frac{-1}{0.02 \cdot P_{Gnom} \cdot S} = \frac{-1}{0.02 \cdot P_{Gnom} \cdot 0.008} = +125$$

Observație: $(1/10) * P_{Gnom}$ evidențiază rezerva de putere reglantă a frecvenței, impusă de dispecer în funcție de performanțele grupului.

Pe baza acestor precizări rezultă schema finală:



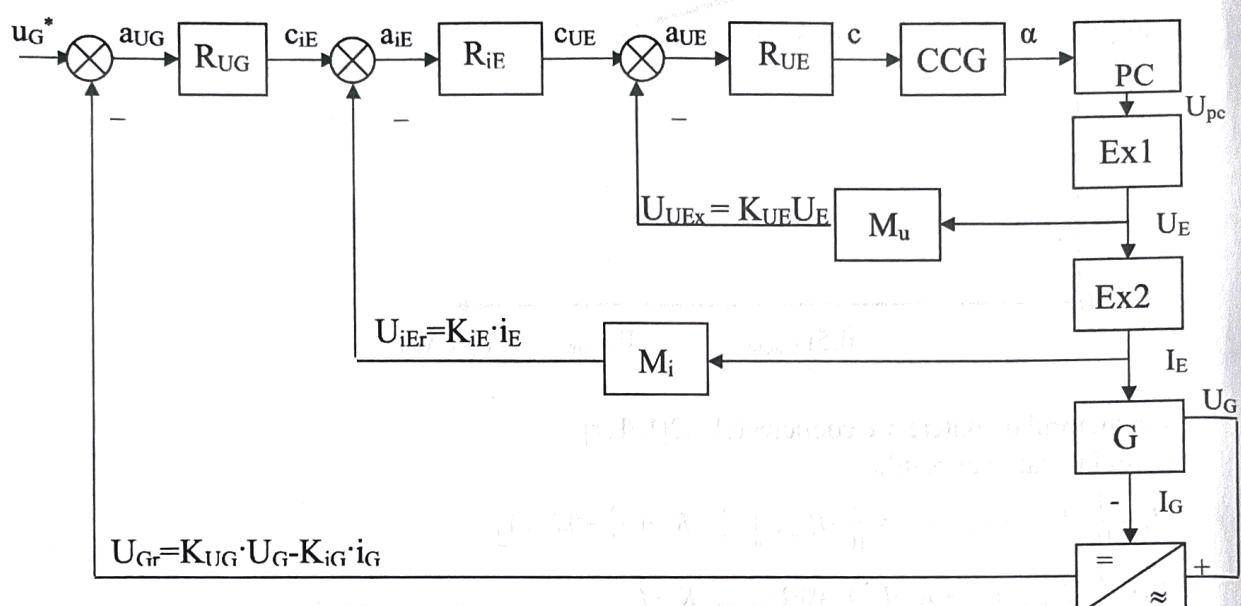
$$H_d = H_{RP} \cdot H_{SMH} \cdot V \cdot H_{TG} = 10 \cdot \frac{10s+1}{0.2s+1} \cdot \frac{0.2s+1}{2.9s} \cdot 1.22 \cdot 10^4 \cdot \frac{0.362}{10s+1} = 0.22 \cdot 10^4 \cdot \frac{1}{s}$$

$$H_d = \frac{H_d}{1 + H_d \cdot K_p} = \frac{0.22 \cdot 10^4}{s} \cdot \frac{1}{s + 0.22 \cdot 10^4 \cdot 0.0225} = \frac{0.22 \cdot 10^4}{0.005 \cdot 10^4 + s} = \frac{0.22 \cdot 10^4}{50 + s}$$

$$H_d = \frac{1}{50} \cdot \frac{0.22 \cdot 10^4}{0.02s+1} = 44 \cdot \frac{1}{0.02s+1}$$

Capitolul 7. Reglarea tensiunii și a puterii reactive

Se adoptă o reglare în cascadă triplă în raport cu tensiunea de la bornele generatorului, curentul de excitație și tensiunea de excitație.



În figura de mai sus s-au folosit următoarele notații:

R_{UG} – regulatorul tensiunii la bornele generatorului;

R_{iE} – regulatorul curentului de excitație;

R_{UE} – regulatorul tensiunii de excitație;

M_u , M_i – traductoare de măsură plus adaptoare de tensiune, respectiv de curent.

c_{iE} – comanda curentului de excitație;

c_{UE} – comanda tensiunii de excitație;

Avem o cascadă de trei regulatoare în raport cu semnalele U_E , i_E și U_G . Abaterea tensiunii la generator, a_{UG} este diferența dintre tensiunea de referință u_G^* și tensiunea de reacție $U_{Gr} = K_{UG} \cdot U_G - K_{iG} \cdot i_G$, unde K_{UG} și K_{iG} sunt coeficienții de ponderare a reacției după tensiune, respectiv curent. Abaterea a_{UG} se aplică regulatorului tensiunii la bornele generatorului rezultând comanda c_{iE} . Abaterea dintre acest semnal de comandă și tensiunea de reacție U_{iEr} , proporțională cu curentul de excitație se aplică regulatorului curentului de excitație, R_{iE} . Abaterea dintre c_{UE} și tensiunea proporțională cu tensiunea de excitație U_{UEr} , se aplică

regulatorului tensiunii de excitație, R_{UE} . Complexul de comandă pe grilă, CCG, generează la ieșire impulsuri având faza α care comandă puterea punții comandate, PC rezultând tensiunea U_{PC} .

a) Elementele componente principale

1. Generatorul sincron

Puterea nominală aparentă $S_{Gnom} = 539.35 [MW]$

Factorul de putere $\cos\phi = 0.825$

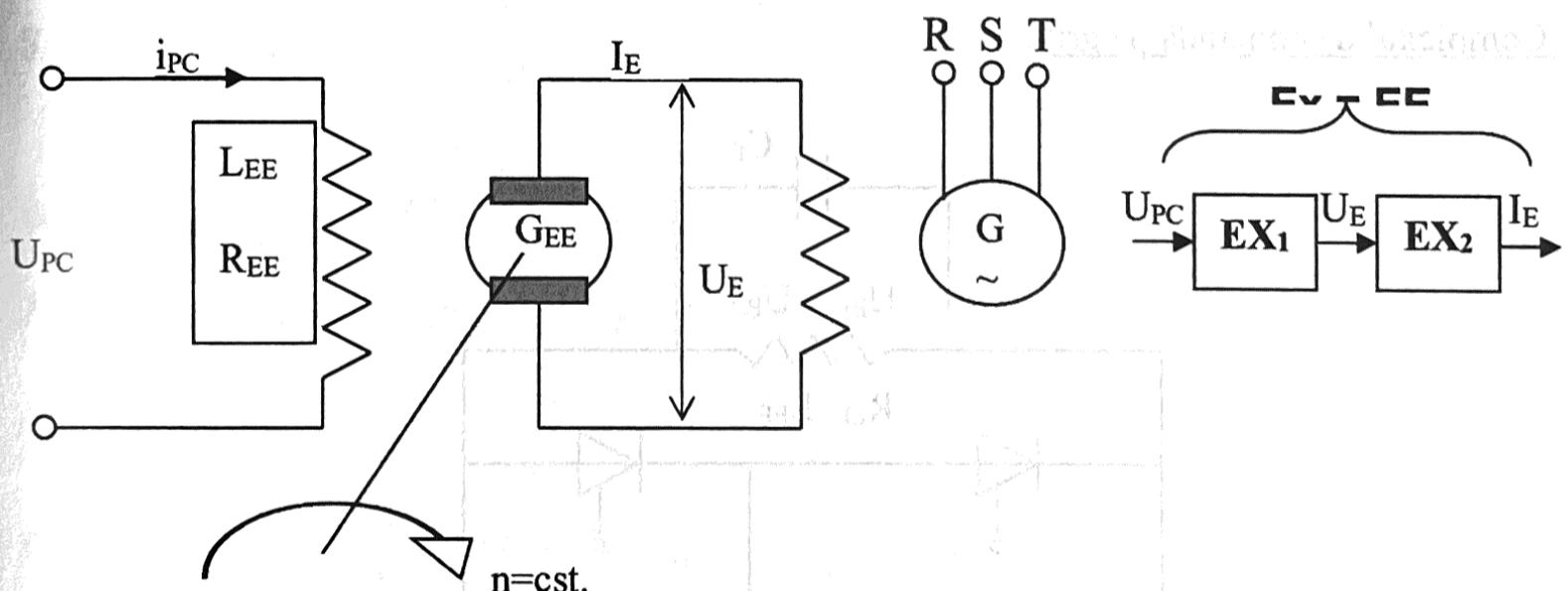
Tensiunea la bornele generatorului $U_{Gnom} = 30 [KV]$

$$I_{Gnom} = \frac{S_{Gnom}}{\sqrt{3} \cdot U_{Gnom}} = 10.38 [kA] = 10380 [A]$$

$$P_{Gnom} = S_G \cdot \cos\phi = 539 \cdot 0.825 = 445 [MW]$$

$$Q_{Gnom} = \sqrt{S_{Gnom}^2 - P_{Gnom}^2} = \sqrt{539^2 - 445^2} = 304.82 [MVAr]$$

2. Excitatricea EE



$$P_{Enom} \approx 0.25\% \cdot P_{Gnom} = 0.0025 \cdot 445 = 1.1125 [MW]$$

$$U_{Enom} = 600 [V]$$

$$I_{Enom} = \frac{P_{Enom} [MW]}{U_{Enom} [V]} = \frac{1.1125}{600} \cdot 10^6 = 1854 [A]$$

3. Puntea comandată PC

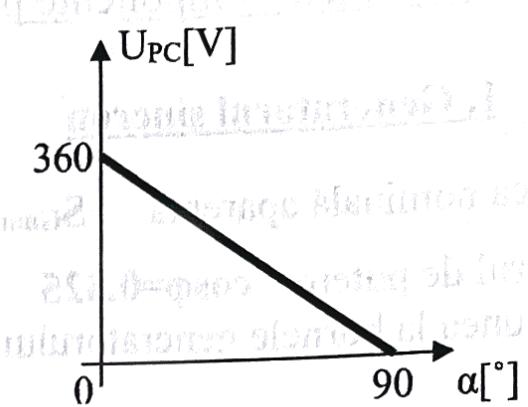
Alimentează înfăşurarea de excitație a excitatricei cu tensiunea U_{PC}

Curentul i_{PC} și puterea P_{PC} :

$$P_{PCnom} \approx 1\% \cdot P_{Enom} = 0.01 \cdot 11125 = 11.125 [kW]$$

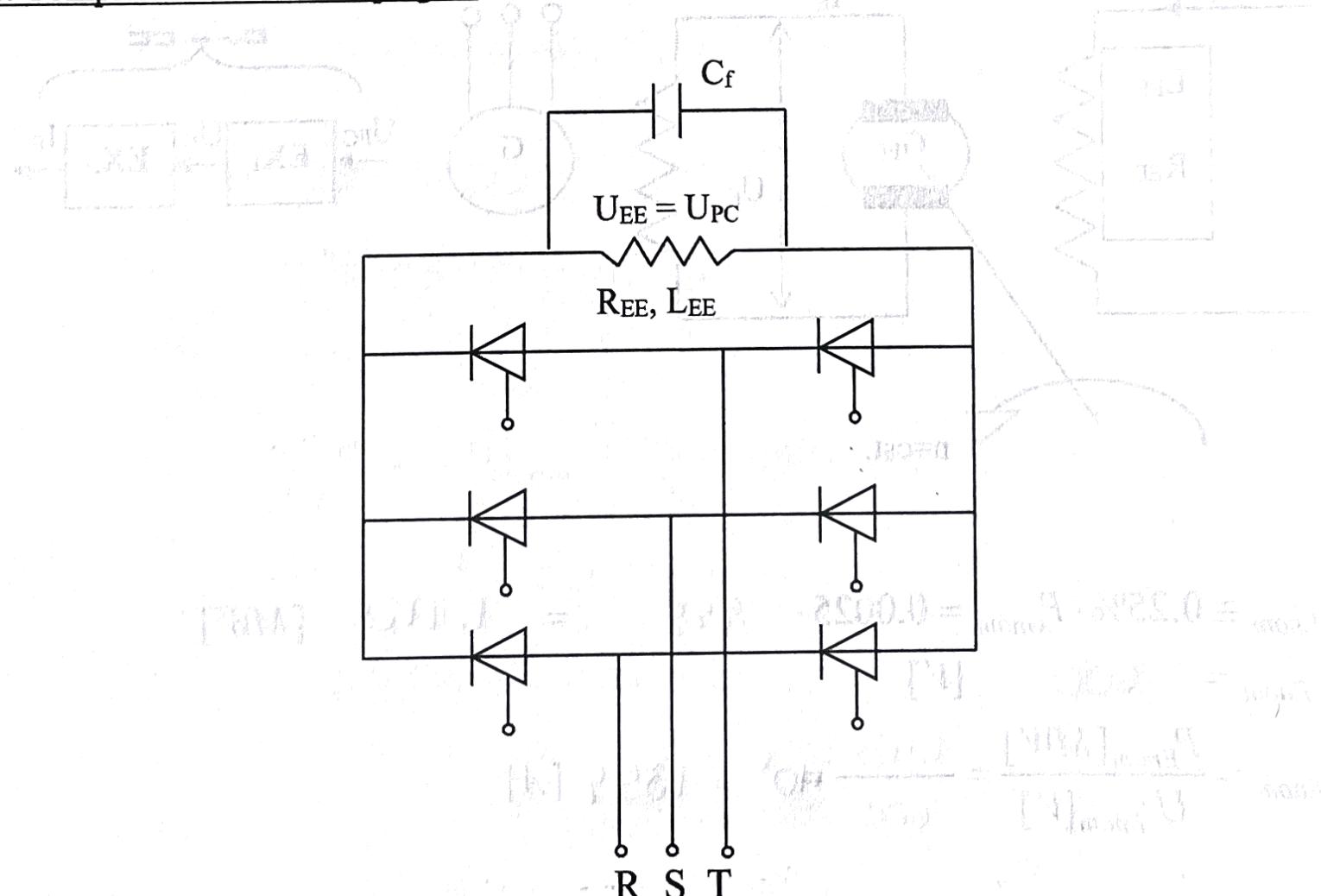
Se consideră $U_{PCnom} = 360 [V]$ pentru care

$$i_{PCnom} = \frac{P_{PCnom}[W]}{U_{PCnom}[V]} = \frac{11125}{360} = 30.9 [A]$$



$$\text{Se consideră că: } U_{PC} = 360 - \frac{360}{90} \cdot \alpha$$

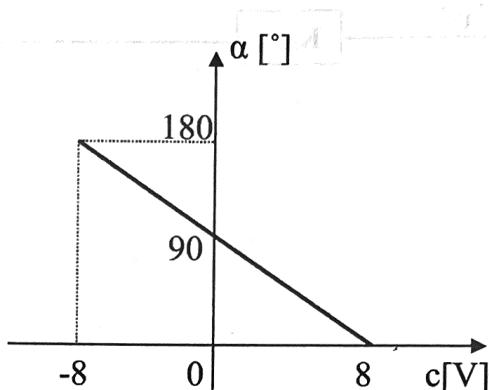
Astfel am obținut prin aproximare o dependență liniară între U_{PC} și α . Unghiul α se încadrează prin intermediul unui adaptor între 0° și 90° .

4. Complexul de comandă pe grilă

În analiza circuitului, se va neglija timpul mort al acestui bloc: $T_{mCCG} \approx 0$; ... la analiza

Se definește factorul de conversie tensiune-fază: $K_{CCG} = \frac{-\Delta\alpha}{\Delta c} = \frac{90^\circ}{8V} = -11.25 \left[\frac{\circ}{V} \right]$

Acest raport corespunde unei variații maxime a defazajului impulsurilor de comandă pe grilă ale curentului care pentru o variație de 8V a tensiunii de comandă la intrarea în CCG realizează prin proiectare un defazaj maxim de 90° .



Tensiunea de comandă a regulatorului notată cu „c” se încadrează între $-8V$ și $8V$.

Se asigură condiția:

$$\alpha = 90^\circ - \frac{90^\circ}{8V} \cdot c = 90^\circ - 11.25 \cdot c$$

$$U_{PC} = 360 - 4 \cdot \alpha = 360 - 4 \cdot (90^\circ - 11.25 \cdot c) = 45 \cdot c$$

În general:

$$U_{PC} = U_{PCnom} - \frac{U_{PCnom}}{90} \cdot \alpha = U_{PCnom} - \frac{U_{PCnom}}{90} \cdot (90 - 11.25 \cdot c)$$

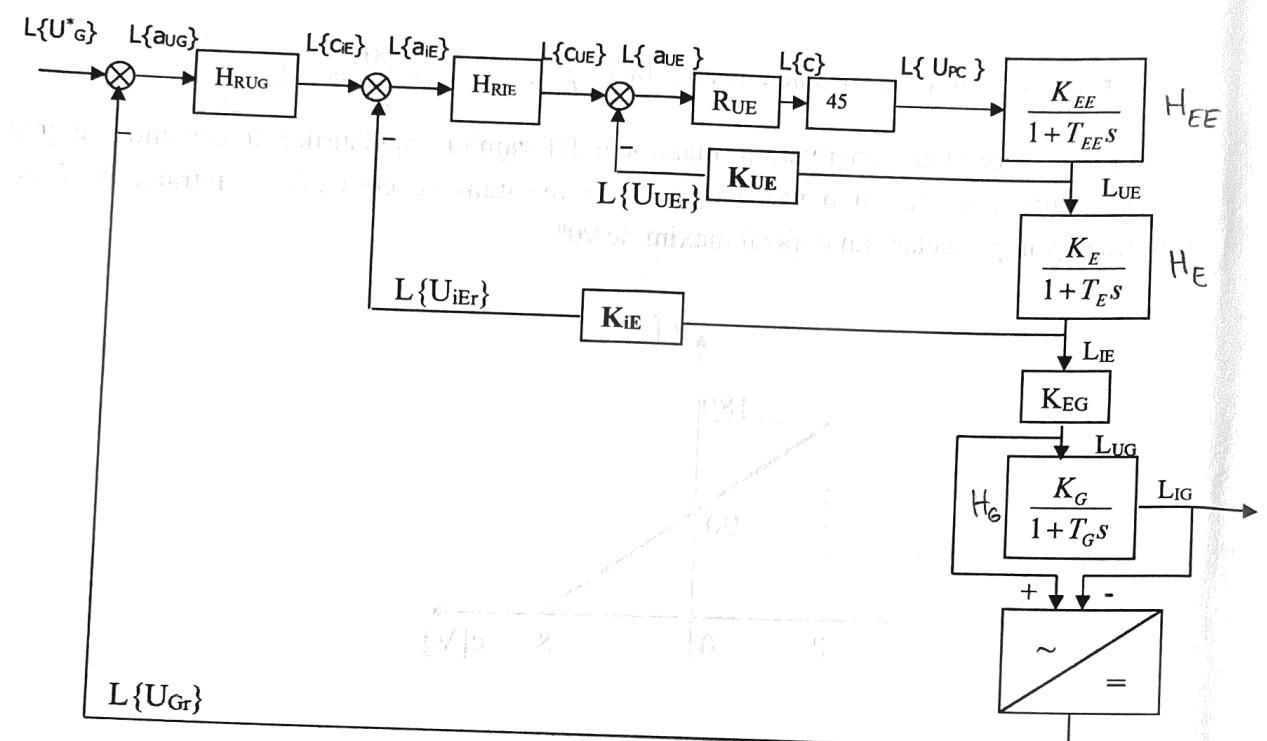
$$\Rightarrow U_{PC} = \frac{U_{PCnom}}{90} \cdot 11.25 \cdot c$$

$$\text{Pentru } U_{PCnom} = 360[V] \Rightarrow U_{PC} = 45 \cdot c$$

$$(U_{PCnom} = 270 \Rightarrow K_{CCG+PC} = 33.45)$$

$$U_{PCnom} = 360 \Rightarrow K_{CCG+PC} = 45$$

Schema de reglare arată ca în figura de mai jos:



b) Calculul funcțiilor de transfer ale elementelor componente

1. Functia de transfer a excitatiei excitatricei EF

$$H_{EE}(s) = \frac{L\{U_E\}}{L\{U_{PC}\}} = \frac{K_{EE}}{1 + T_{EE}s}$$

$$\begin{cases} U_{PC} = L_{EE} \cdot \frac{di}{\sigma} \\ U_E = K_{EE} \cdot i_{PC} \end{cases}$$

Se aplică transformata Laplace pentru condiții initiale nule:

$$\begin{cases} U_{PC}(s) = (L_{EE} \cdot s + R_{EE}) \cdot L\{i_{PC}\} \\ U_E(s) = K_{EE} \cdot L\{i_{PC}\} \end{cases}$$

$$T_{EE} = \frac{L_{EE}}{R_{EE}} = 0.15 \text{ [sec]};$$

$$K_{EE} = \frac{U_{Enom}[V]}{U_{PCnom}[V]} = \frac{600[V]}{360[V]} = 1.66 \Rightarrow H_{EE}(s) = \frac{1.667}{1 + 0.15 \cdot s}$$

2. Functia de transfer a excitatiei generatorului

$$H_E(s) = \frac{L\{i_E\}}{L\{u_E\}} = \frac{K_E}{1 + T_E s}$$

$$K_E = \frac{i_{Enom}[A]}{U_{Enom}[V]} = \frac{1.85 \cdot 10^3[A]}{600[V]} = 3.09 \left[\frac{A}{V} \right]$$

$$T_E(s) = 0.45 \text{ [sec]} \Rightarrow H_E(s) = \frac{3.09}{1 + 0.45 \cdot s}$$

3. Functia de transfer a generatorului

$$H_{EG}(s) = \frac{L\{i_G\}}{L\{u_G\}} = \frac{K_G}{1 + T_G s}$$

$$K_{EG} = \frac{U_{Gnom}[V]}{i_{Enom}[A]} = \frac{30000[V]}{1.85 \cdot 10^3[A]} = 16.17 \left[\frac{V}{A} \right]$$

$$K_G = \frac{i_{Gnom}[A]}{U_{Gnom}[V]} = \frac{10.38 \cdot 10^3[A]}{30 \cdot 10^3[V]} = 0.346 \left[\frac{A}{V} \right]$$

$$T_G(s) = 5 \text{ [sec]}$$

$$\Rightarrow H_G(s) = \frac{0.346}{1 + 5 \cdot s}$$

4. Functia de transfer a reactiei de compundare

- K_{UG} – se alege în ipoteză $i_G=0$ pentru care:

$$\begin{cases} U_{Gr} = K_{UG} \cdot U_G \\ U_G^* = 10[V] \Rightarrow K_{UG} = \frac{10}{U_{Gnom}} = \frac{10}{30 \cdot 10^3} = 0.33 \cdot 10^{-3} \\ U_{Gr} = U_G^* \end{cases}$$

- K_{iG} – se alege în ipoteză: $K_{iG} = \frac{0.5[V]}{i_{Gnom}[A]} = \frac{0.5[V]}{10.38 \cdot 10^3[A]} = 4.81 \cdot 10^{-5} \left[\frac{V}{A} \right]$

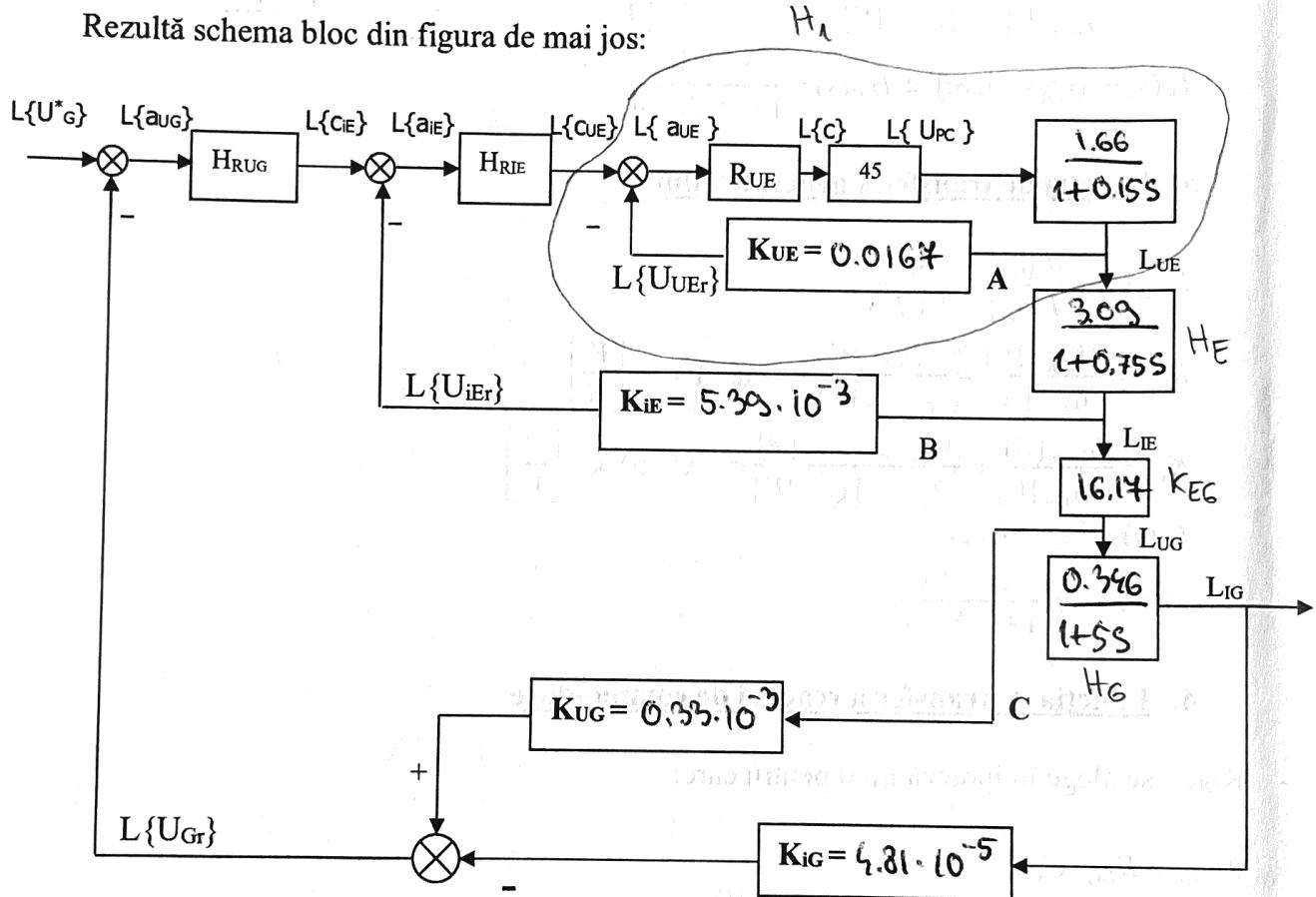
- K_{iE} - se alege în ipoteză:

$$U_{iEr} = 10[V]; \text{ si } K_{iE} = \frac{U_{iEr}[V]}{i_{Enom}[V]} = \frac{10[V]}{1.25 \cdot 10^3 [V]} = 5.39 \cdot 10^{-3} \left[\frac{V}{A} \right]$$

- K_{UE} - se alege în ipoteză:

$$U_{UEr} = 10[V]; \text{ si } K_{UE} = \frac{U_{UEr}[V]}{U_{Enom}[V]} = \frac{10[V]}{600 [V]} = 0.0167 \left[\frac{V}{V} \right]$$

Rezultă schema bloc din figura de mai jos:



Acordarea regulatoarelor se va face cu criteriul modulului deoarece perturbațiile care apar sunt de tipul treaptă iar efectul dorit este de stabilizare.

a) **Bucla internă A**

$$H_{Ex}(s) = K_{CCG+PC} \cdot \frac{K_{EE}}{1 + T_{EE} \cdot s} \cdot K_{UE} = 45 \cdot \frac{1.664}{0.15s + 1} \cdot 0.0164 = \frac{1.25}{0.15s + 1}$$

$$H_{ExA}(s) = H_{Ex}(s) \cdot \frac{1}{1 + T_\Sigma \cdot s} \quad \text{unde} \quad T_\Sigma = 10^{-2} [\text{sec}]; \quad H_{ExA} = \frac{1.25}{0.15s+1} \cdot \frac{1}{0.01s+1} = \frac{1.25}{(0.15s+1)(0.01s+1)}$$

$$\Rightarrow H_{RUE}(s) = \frac{1}{2T_\Sigma s(1+T_\Sigma \cdot s)} \cdot \frac{1}{H_{ExA}(s)} = \frac{1}{0.02 \cdot s \cdot (1+0.01 \cdot s)} \cdot \frac{(0.15s+1)(0.01s+1)}{1.25} = \frac{0.15s+1}{0.025s}$$

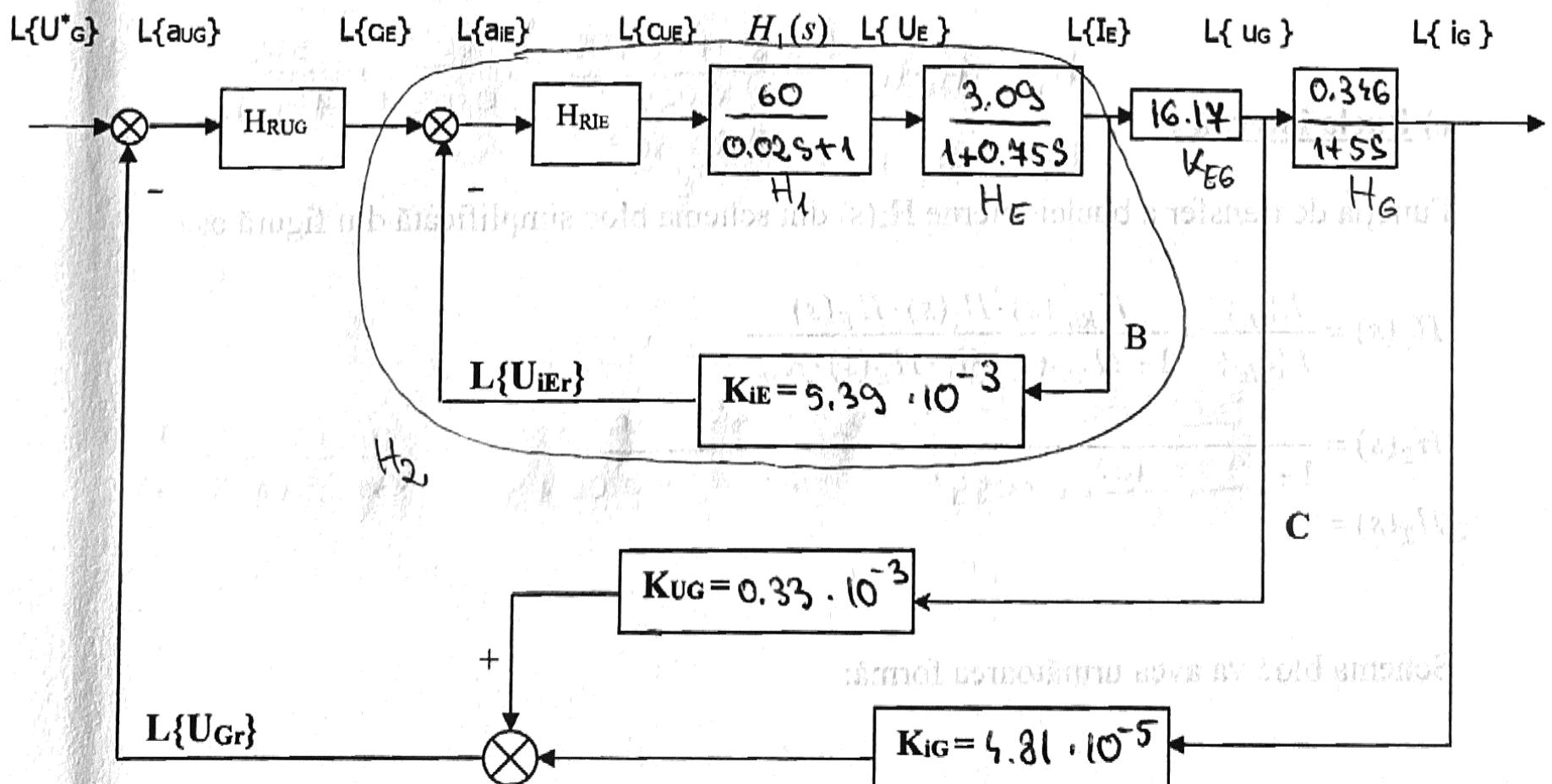
$$\text{un regulator PI având: } \begin{cases} V_{RUE} \approx 6 \\ T_{iRUE} \approx 0.025 \quad [\text{sec}] \end{cases} \quad H_{Pi} = V_{Pi} + \frac{1}{T_{Pi}s} = \frac{V_{Pi}T_{Pi} + 1}{T_{Pi}s}$$

b) Bucla internă B

Funcția de transfer a buclei interne este:

$$H_1(s) = \frac{L\{U_E\}}{L\{c_{IE}\}} = \frac{H_{RUE}(s) \cdot K_{CCG+PC} \cdot H_{EE}(s)}{1 + H_{RUE}(s) \cdot K_{CCG+PC} \cdot H_{EE}(s) \cdot K_{UE}}$$

$$H_1(s) = \frac{\frac{3000}{s}}{1 + \frac{50}{s}} = \frac{\frac{3000}{s}}{\frac{s+50}{s}} = \frac{3000}{s+50} = \frac{1}{\frac{50}{3000}} \cdot \frac{3000}{s+50} = \frac{60}{0.025s+1}$$



$$H_{Ex}(s) = H_1(s) \cdot \frac{K_E}{1 + T_E \cdot s} \cdot K_{IE} = \frac{60}{0.02s+1} \cdot \frac{3.09}{1+0.75s} \cdot 5.39 \cdot 10^{-3} \equiv \frac{1}{(0.02s+1)(1+0.75s)}$$

$$H_{ExB}(s) = H_{Ex}(s) \cdot \frac{1}{1 + T_\Sigma \cdot s} \quad \text{unde} \quad T_\Sigma = 10^{-2} [\text{sec}];$$

$$H_{ExB}(s) = \frac{(0.02s+1)(0.75s+1)(0.01s+1)}{1}$$

$$\Rightarrow H_{RIE}(s) = \frac{L\{c_{UE}\}}{L\{a_{IE}\}} = \frac{1}{2T_\Sigma s(1 + T_\Sigma \cdot s)} \cdot H_{ExB}(s)$$

$$H_{RIE}(s) = \frac{1}{0.02s(1 + 0.01s)} \cdot \frac{(0.02s+1)(0.75s+1)(0.01s+1)}{1} = \frac{(0.02s+1)(0.75s+1)}{0.02s}$$

$$H_{RIE}(s) = \frac{0.75s^2 + 38.5s + 50}{s} = \frac{1}{0.02 \cdot s} + 38.5 + 0.75s$$

$$H_{RIE}(s) = 38.5 \cdot \left(1 + \frac{1}{0.75s} + 0.019s\right)$$

ceea ce reprezintă un regulator PID cu următorii parametri:

$$\begin{cases} V_{RIE} = 38.5 \\ T_{iRIE} = 0.44 \quad [\text{sec}] \\ T_{dRIE} = 0.0195 \quad [\text{sec}] \equiv 0.02 \quad [\text{sec}] \end{cases}$$

c) Bucla internă C

$$H_{RIE} \cdot H_1 \cdot H_E = \frac{(0.02s+1)(0.75s+1)}{0.02s} \cdot \frac{60}{0.02s+1} \cdot \frac{3.09}{1+0.75s}$$

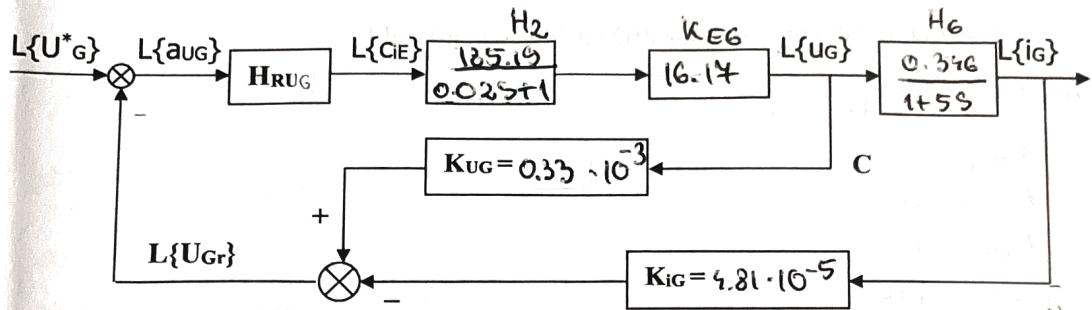
$$H_{RIE} \cdot H_1 \cdot H_E = \frac{9.24 \cdot 10^3}{s}$$

Funcția de transfer a buclei interne $H_2(s)$ din schema bloc simplificată din figură este:

$$H_2(s) = \frac{L\{i_E\}}{L\{c_{IE}\}} = \frac{H_{RIE}(s) \cdot H_1(s) \cdot H_E(s)}{1 + H_{RIE}(s) \cdot H_1 \cdot H_E(s) \cdot K_{IE}}$$

$$H_2(s) = \frac{\frac{9.24 \cdot 10^3}{s}}{1 + \frac{9.24 \cdot 10^3}{s} \cdot 0.0054} = \frac{9.24 \cdot 10^3}{s} \cdot \frac{s}{50.06 + s} = \frac{185.19}{0.02s + 1} = \frac{9271}{50s + 1}$$

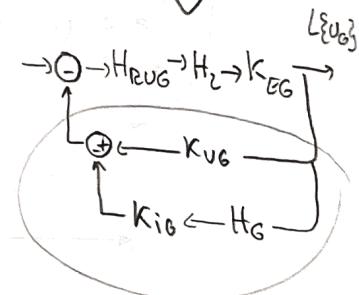
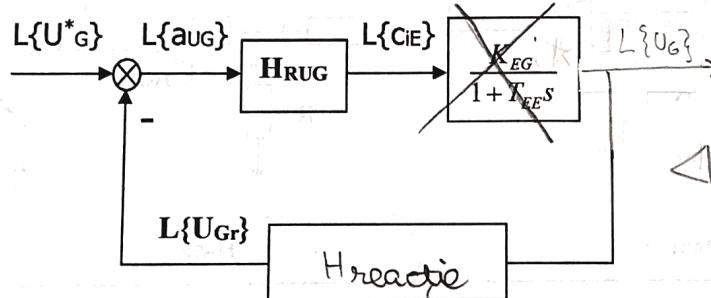
Schema bloc va avea următoarea formă:



Se transfigurează schema:

$$H_{reactie}(s) = k_{UG} - k_{iG} \cdot H_G = \frac{0.00166 + 0.00031}{5s+1} = \frac{0.31 \cdot 10^{-3}}{5s+1} (5.26s+1)$$

$$H_{direct}(s) = H_2 \cdot k_{EG} = \frac{150000}{s+50} = \frac{3000}{0.02s+1} H_2 \cdot k_{EG}$$



$$H_{Ex}(s) = H_{reactie} \cdot H_{direct} \cdot \frac{1}{(1+T_\Sigma \cdot s)} \text{ cu } T_\Sigma = 0.01[\text{sec}]$$

$$\Rightarrow H_{Ex}(s) = \frac{0.93 (5.26s+1)}{(5s+1)(0.02s+1)(1+0.01s)}$$

$$H_{RUG}(s) = \frac{L\{c_{IE}\}}{L\{a_{UG}\}} = \frac{1}{2 \cdot T_\Sigma \cdot s \cdot (T_\Sigma \cdot s + 1)} \cdot \frac{1}{H_{Ex}(s)} = \frac{(5s+1)(0.02s+1)(0.01s+1)}{0.02s(0.01s+1)(5.26s+1)0.93}$$

1. Dacă se consideră $5s+1 \approx 5.26s+1 \Rightarrow$ un regulator de tip PI :

$$H_{RUG}(s) = \frac{0.02s+1}{0.0186s} = 1.0453 + \frac{1}{0.0186s} \approx 1.045 \left(1 + \frac{1}{0.02s} \right)$$

$$\begin{cases} V_{RRUG} = 1.045 \\ T_{iRUG} = 0.02 \text{ [sec]} \end{cases}$$

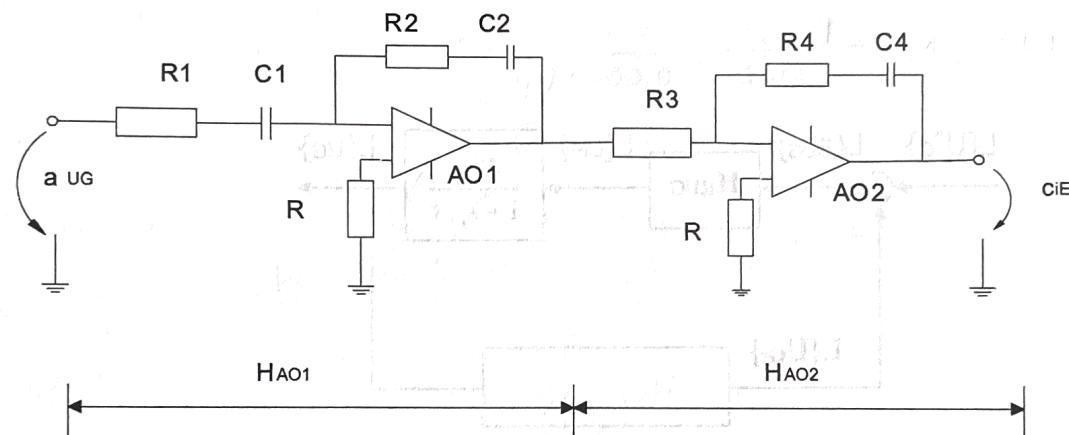
2. Altfel, rezultă un regulator PID cu filtru de ordinul I :

$$H_{RU_G}(s) = \frac{(5s+1)(0.02s+1)}{0.0186s(5.26s+1)} =$$

$$\Rightarrow \begin{cases} V_{RRU_G} = \\ T_{iRU_G} = [\text{sec}] \\ T_{dRU_G} = [\text{sec}] \\ T_N = [\text{sec}] \end{cases}$$

Capitolul 8. Modelarea analogică a regulatoarelor

Modelarea regulatorului RU_G



$$H_{RU_G}(s) = H_{AO_1}(s) \cdot H_{AO_2}(s), \text{ unde } H_{AO_1}(s) = -\frac{R_2 + \frac{1}{C_2 \cdot s}}{R_1 + \frac{1}{C_1 \cdot s}} \text{ și } H_{AO_2}(s) = -\frac{R_4 + \frac{1}{C_4 \cdot s}}{R_3}$$

$$\Rightarrow H_{RU_G}(s) = \left(\frac{R_2 + \frac{1}{C_2 \cdot s}}{R_1 + \frac{1}{C_1 \cdot s}} \right) \cdot \left(\frac{R_4 + \frac{1}{C_4 \cdot s}}{R_3} \right) = \frac{C_1}{C_2 \cdot C_4 \cdot R_3} \cdot \frac{(R_2 \cdot C_2 \cdot s + 1) \cdot (R_4 \cdot C_4 \cdot s + 1)}{R_1 \cdot C_1 \cdot s + 1}$$

Prin identificare \Rightarrow

$$T_i = R_1 \cdot C_1 = \text{[sec]}; \text{ se alege } R_1 = K\Omega \Rightarrow C_1 = \text{---} = \mu F$$

$$T_2 = R_2 \cdot C_2 = \text{[sec]} ; \text{ se alege } R_2 = k\Omega \Rightarrow C_2 = \text{_____} = \mu F$$

$$T_4 = R_4 \cdot C_4 = \text{[sec]} ; \text{ se alege } R_4 = K\Omega \Rightarrow C_4 = \mu F$$

Alegem condensatorii după datele de catalog condensatori de tip E6, cu 6 tipuri cuprinse între 1 și 10 și care au valori standardizate, multiple de: 1, 2.2, 3.3, 4.7, 6.8, 10.

Astfel alegem $C_1 = \mu F \Rightarrow R_1 = \text{_____} = K\Omega$, dar în catalog nu avem o rezistență de acea valoare și inseriem o rezistență $R_1' = \text{_____} K\Omega$ cu o rezistență variabilă $R_1'' = \text{_____} K\Omega$, alegem

$C_2 = \mu F \Rightarrow R_2 = \text{_____} = K\Omega$ și o obținem astfel $R_2' = \text{_____} k\Omega$ inseriată cu o rezistență

variabilă $R_2'' = \text{_____} k\Omega$, alegem $C_4 = \mu F \Rightarrow R_4 = \text{_____} = K\Omega$ și o obținem astfel

$R_4' = \text{_____} k\Omega$ inseriată cu rezistență variabilă $R_4'' = \text{_____} \Omega$.

$V_R = \frac{C_1}{C_2 \cdot C_4 \cdot R_3} = \frac{\text{_____}}{\text{_____} \cdot R_3} = \Rightarrow R_3 = \frac{1}{\text{_____}}$. $\Rightarrow R_3 = \text{_____} k\Omega$ pe care o obținem din

$R_3' = \text{_____} k\Omega$ inseriată cu rezistență variabilă $R_3'' = \text{_____} \Omega$.

Deci, $R_1 = R_1' + R_1''$; $R_2 = \text{_____} k\Omega$; $R_3 = R_3' + R_3''$; $R_4 = R_4' + R_4''$;

$C_1 = \mu F$, $C_2 = \mu F$; $C_4 = \mu F$;