

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

Proiect de semestru
la disciplina
Conducerea Proceselor Industriale

**Analiza și reglarea unui sistem
cazan – turbină – generator –
– sistem electro-energetic radial**

Coordonator:

Student:

An IV - grupa

Cuprins

Capitolul 1: Prezentarea procesului	3
Capitolul 2: Sisteme de reglare asociate cazanului	6
Capitolul 3: Date de proiectare.....	12
A. Partea termică.....	12
B. Partea electrică.....	15
Capitolul 4: Modelele proceselor tehnologice aferente cazanului. Identificarea sub formă simplificată a cazanului cu abur (în jurul punctului static de funcționare).....	17
Capitolul 5: Acordarea reguletoarelor 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 reguletoarelor.....	56
Capitolul 9: Exemplu de simulare a sistemelor de reglare a mărimilor electrice aferente unei termocentrale.....	58
Capitolul 10: Cerințe și observații.....	76

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 indiciile semnificative.

Date preliminare:

Puterea grupului

 $P = _ \text{ [MW]}$

Presiunea aburului viu

 $p = _ \text{ [bar]}$

Consumul specific

 $1/\eta_\theta = _ \text{ [Mcal/MWh]}$

Entalpia aburului viu

 $i_2 = _ \text{ [Mcal/to]}$

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) [1-3]. Detalierea circuitului de reglare într-o formă simplificată este următoarea:

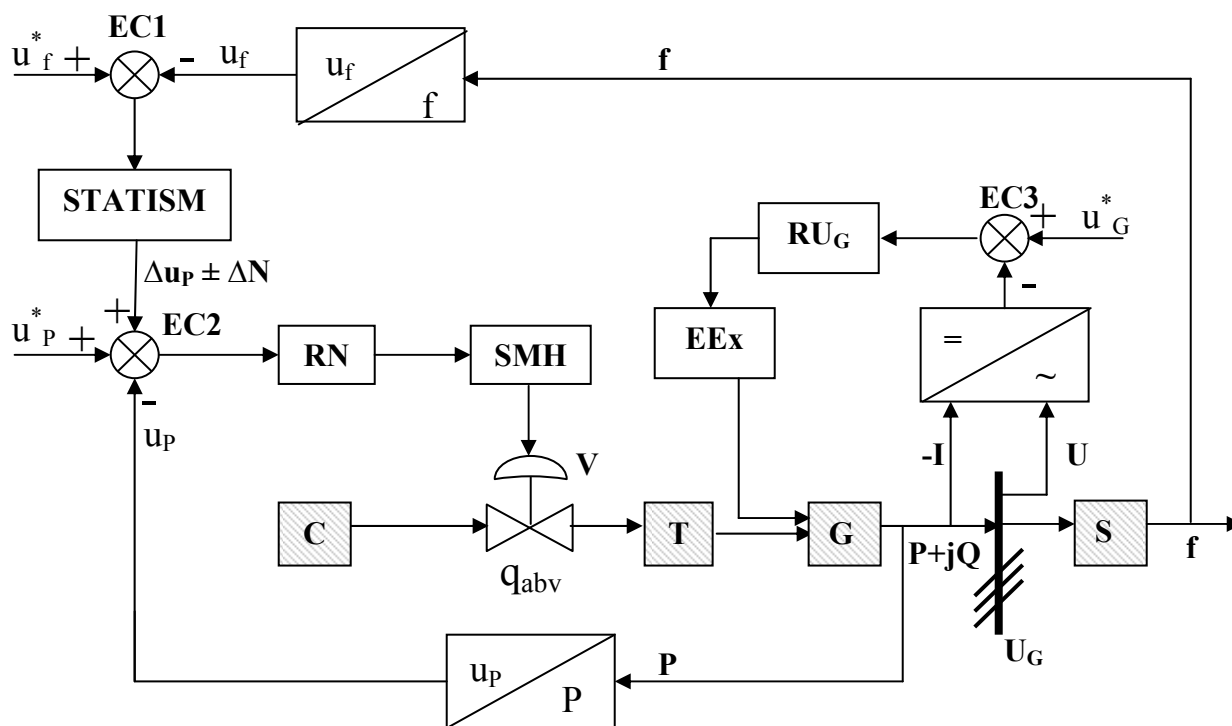


Figura 1: Sistemul electro – energetic radial (circuit de reglare)

Notații:	RN:	regulator de putere activă;
	SMH:	servomotor hidraulic de acționare a ventilului de admisie parțială V a debitului de abur q_{abv} la intrarea în turbină.
	C:	cazan;
	T:	turbină;
	G:	generator sincron;
	S:	sistem energetic radial
	P/ U_P :	traductoare și adaptoare de putere-tensiune unificată;
	f/ U_f :	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 $f(P)$;
	$\sim/=\text{:}$	bloc de redresare a tensiunii;
	RU _G :	regulatorul tensiunii la bornele generatorului;
	EEx:	element de excitație a generatorului;

Alte notații:

- i_{pabv}^* = referința presiunii aburului-viu;
- $i_{O_2}^*$ = referința de O_2 în gazele arse;
- $i_{\Delta pF}^*$ = referința depresiunii în focar;
- $i_{\theta abv}^*$ = 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: cazanul grupului, **C**; turbina, **T**; generatorul sincron, **G**; sistemul energetic radial, **S** [4].

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 la intrarea în turbină, asigurat prin servomotorul hidraulic (**SMH**) și ventilul (**V**) care sunt utilizate pentru a ajusta admisia parțială a aburului în turbină. Avem și un sistem de reglare a tensiunii U la bornele generatorului la care se asociază o corecție pozitivă de curent cu efect de compensare (reacție de compundare).

Se mai utilizează traductoare și *adaptoare de putere - tensiune* unificată (P/U_P), *adaptoare de frecvență - tensiune* unificată (f/U), un bloc de statism, un bloc de redresare din circuitul de reglare a tensiunii la bornele generatorului ($\sim/=\text{}$),

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

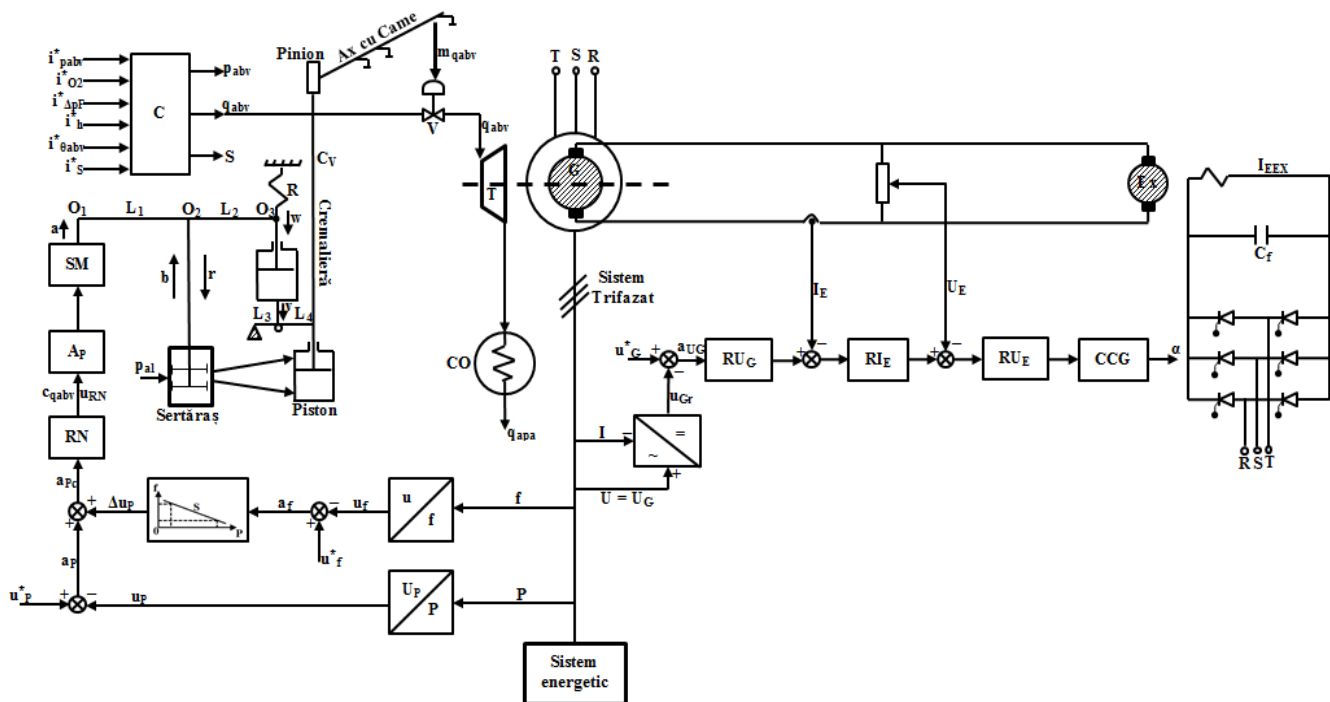


Figura 2: Schema de ansamblu a sistemului

În componența 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 strangularea debitului de abur admis în turbină utilizând ventilul (V).
2. Turbina (T) antrenează generatorul G. Aburul viu destins în turbină trece în condensatorul CO, rezultând datorită răcirii, același debit masic de apă condensată, $q_{apă}$.
3. Elementul de execuție SMH e format dintr-o cremalieră care este 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 poziționar prin intermediul pârghiei L_1L_2 . Prin această reacție negativă se obțin două avantaje principale:
 - a) micșorarea inerției mecanice echivalente;
 - b) îmbunătățirea comportării liniare prin micșorarea distorsiunilor neliniare de tip frecare uscată, jocuri și dereglări mecanice.

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

Se mai utilizează blocurile funcționale: RN - regulatorul puterii active; A_P -amplificator de putere; SM – servomotor.

4. 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).
5. Excitatricea Ex. Rotorul generatorului este alimentat în tensiune continuă de excitație, furnizată de excitatricea Ex, având puterea activă cel mult 1% din puterea generatorului. Excitația excitatricei este alimentată în tensiune continuă la curentul I_{EEX} 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 faza variabilă (α). Modificarea lui α se realizează teoretic între 0° și 180° , practic între 5° și 175° .

Reglarea puterii active se realizează 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 S statismul reglării puterii active. Se mai utilizează două traductoare 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 (reacție 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 următoare:

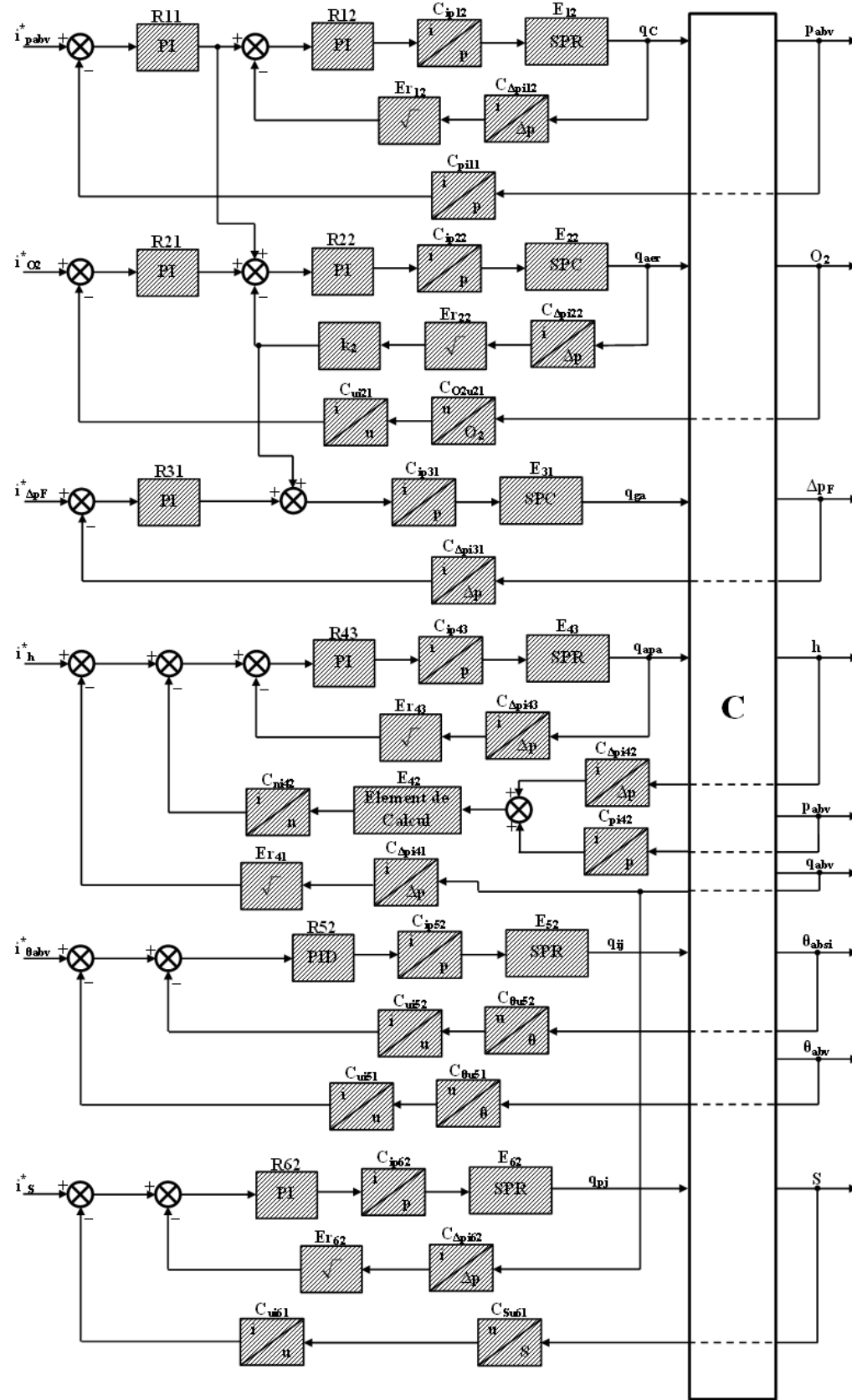


Figura 3: Bucle de reglare (forma generală) pentru un cazan de abur

Detalii functionale

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 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. 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 două 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 i care rezultă din convertor este de asemenea proporțional cu pătratul debitului. Se impune deci utilizarea unui extractor de radical, curentul unificat generat la ieșirea acestuia fiind astfel proporțional cu debitul măsurat. 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 controlul depresiunii din focar Δp_F . Se impune menținerea unei depresiuni având valoarea de -2 mmH₂O în interiorul focarului. Pe buclele de reacție există traductoare de 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 și în schemele anterioare.

Reglarea temperaturii aburului viu este o reglare convergentă în raport cu două reacții: temperatura aburului viu θ_{abv} , respectiv temperatura aburului viu dintr-un supraîncălzitor intermediar θ_{abs} . Pe circuitele de reacție (pentru măsurarea temperaturii) se utilizează convertoare de tip 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. Se utilizează un traductor de concentrație pentru măsurarea salinității apei (salinitate-tensiune), apoi un convertor de tip tensiune/curent unificat. Se mai folosesc, de asemenea, bucle suplimentare cu efect de corecție.

Notații:

i^*	- curent unificat de referință;
u^*	- tensiune unificată de referință;
t	- timpul;
θ	- temperatura;
q_{ij}	- debitul de injecție între două trepte de supraîncălzitor pentru reglarea temperaturii aburului viu;
i^*_{pabv}	- referința în curent unificat pentru presiunea aburului viu;
q_{pj}	- debitul de purjă;
q_{abv}	- debitul de abur viu care intră în turbină (degajat pe paletele turbinei);
$i^*_{O_2}$	- referința în curent unificat de oxigen pentru analizatorul gazelor arse;
θ_{absi}	- temperatura aburului în supraîncălzitorul intermediar;
$i^*_{\Delta p_F}$	- referința în curent unificat pentru depresiunea din focar;
θ_{abv}	- temperatura aburului viu la intrarea în turbină;
i^*_h	- referința în curent unificat pentru nivelul apei în tambur;
h	- nivelul apei în tambur;
$i^*_{\theta_{abv}}$	- referința în curent unificat pentru temperatura aburului viu;
Δp_F	- depresiunea din focar;
i^*_s	- referința în curent unificat pentru salinitate;
C_{ip}, C_{pi}	- convertor curent - presiune și invers;
Q, q	- se referă la debite;
p	- se referă la presiuni;
E	- element de execuție;

Δp	- presiune diferențială (semanalul de ieșire 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 comparație;
$O_2[\%]$	- 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:

$$S = \sqrt{P^2 + Q^2}; [MVA] \cdot$$

Frecvența f din sistemul electro-energetic-radial (neinterconectat cu alt sistem) este măsurată prin utilizarea traductorului (u_f/f) iar semnalul unificat în tensiune ($-u_f$) liniar dependent de frecvență se aplică elementului de comparare EC, unde u_f^* este semnalul de referință în tensiune unificată pentru frecvență. Abaterea de reglaj (a_f) la ieșirea EC este corectată în elementul Statism și reprezintă un semnal de reacție negativă care se aplică la intrarea lui EC2 (Δu_p). Al doilea 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 (corectată) de ieșire din EC2 (a_{pc}) este prelucrată de regulatorul puterii active RN iar semnalul de comandă generat se aplică elementului de execuție SMH. Semnalul de ieșire din SMH este deplasarea axială (forțe mari – de sute de kgf) care acționează asupra ventilului V destinat reglării debitului aburului (q_{abv}).

Reglarea tensiunii și 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 u_{Gr} în tensiune continuă ca reacție echivalentă, în EC3.

Abaterea de reglare la ieșire din EC3 este prelucrată de RU_G , iar semnalul de comandă se aplică la intrarea unui element complex numit excitația excitatricei. Semnalul de ieșire din acest element este curentul continuu de excitație a rotorului generatorului G, necesar pentru a realiza fluxul de excitație.

Observații:

- referințele de **curent unificat** (2-10 sau 4-20 mA) sunt notate cu i^* și se utilizează pentru procese lente; se evită zeroul natural (0 mA) pentru a atenua influența zgomotului din proces; procesele lente au cel puțin o constantă de timp mai mare de 10 s.
- referințele de **tensiune unificată** (1-10V sau $\pm 10V_{cc}$) sunt notate cu u^* și se utilizează pentru procese rapide; constantele de timp ale acestor procese sunt mai mici 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, pentru traductorul presiune diferențială, sunt valabile relațiile:

$$Q^2 = k \cdot \Delta p; \quad Q = k^{\frac{1}{2}} \cdot \sqrt{\Delta p} = k_2 \cdot \sqrt{\Delta p}; \quad \Delta p = p_1 - p_2$$

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) circuitul de reglare a sarcinii cazanului prin reglarea presiunii aburului viu (regulatorul de sarcină, funcția de presiune acționând asupra combustibilului și aerului de combustie);
- 2) circuitul de reglare a combustiei, urmărind calitatea arderii, respectiv reglarea de urmărire a aerului de combustie în exces, în raport cu combustibilul;
- 3) circuitul de reglare a depresiunii în focar;
- 4) circuitul de reglare a alimentării cu apă, funcție de nivelul apei din tambur, debitul de abur; se utilizează și o corecție în raport cu presiunea aburului din tambur;
- 5) circuitul de reglare a temperaturii aburului de ieșire, cu o corecție în raport cu temperatura aburului înainte de injecție.
- 6) circuitul de reglare a salinității (purja continuă, funcție de debitul aburului și salinitatea apei din tambur);

Referințele pentru aceste șase circuite de reglare sunt: i_{pabv}^* , $i_{O_2}^*$, $i_{\Delta pF}^*$, i_h^* , $i_{\theta abv}^*$, i_S^* .

Capitolul 3. Date de proiectare

A. Partea termică

1) Parametrul principal: puterea nominală a generatorului:

$$P_{Gnom} = P = \text{---} [MW];$$

2) Presiunea nominală a aburului viu în cazan:

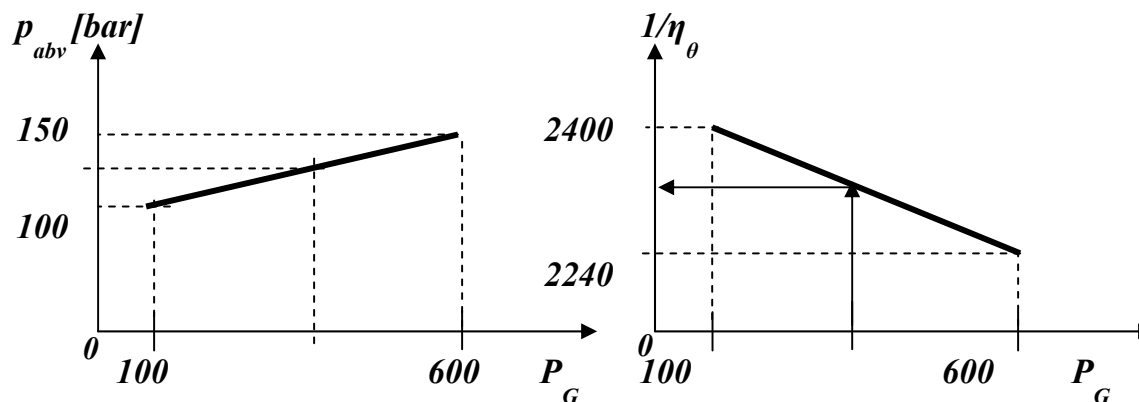
$$p_{abvnom} = p = \text{---} [bar];$$

3) Consumul termic specific:

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

4) Entalpia aburului viu:

$$i_2 = \text{---} [Mcal/tonă];$$



5) Puterea calorică a combustibilului: (gaz metan)

$$PC_{CH_4} = 8.5 \left[\frac{Mcal}{Nm^3} \right]$$

6) Debitul de combustibil nominal:

$$q_{Cnom} = q_{CH_4nom} = \frac{\frac{1}{\eta_{\theta}} \left[\frac{MCal}{MWh} \right] \cdot P_{Gnom} [MW]}{PC_{CH_4} \left[\frac{MCal}{Nm^3} \right]} = \text{---} \left[\frac{Nm^3}{h} \right]$$

7) Temperatura nominală a aburului viu:

$$\theta_{abnom} = 530^0 C$$

8) Conținutul de oxigen molecular în gazele arse:

$$O_2(\%) = 5\%$$

9) Presiunea nominală a aburului în tambur:

$$p_{abvtnom} = 1.1 p_{abvnom} = 1.1 \cdot \underline{\hspace{1cm}} = \underline{\hspace{1cm}} [bar]$$

10) Temperatura nominală a aburului după primul supraîncălzitor

$$\theta_{absinom} = 480^0 C$$

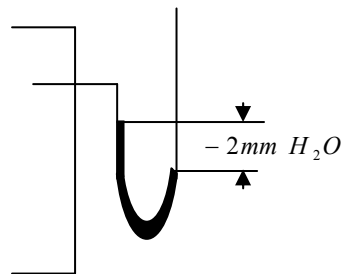
11) Debitul nominal de aer de combustie:

$$q_{aernom} = q_{combnom} \left[\frac{Nm^3}{h} \right] \cdot \alpha \cdot \left(a \frac{PC_{CH_4} \left[\frac{Kcal}{Nm^3} \right]}{1000 \left[\frac{Kcal}{Nm^3} \right]} + b \right) = \underline{\hspace{2cm}} \left[\frac{Nm^3}{h} \right]$$

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:

$$\Delta p_{Fnom} = -2[mm H_2O]$$

**13) Debitul de gaze arse:**

$$q_{ganom} = q_{CH_4nom} + q_{aernom} = \underline{\hspace{2cm}} [Nm^3/h]$$

14) Debitul nominal al aburului viu:

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

$$= \frac{\left[\frac{MCal}{MWh} \right] \cdot \text{---} [MW]}{(i_2 - i_1) \left[\frac{MCal}{tonă} \right]} = \text{---} \left[\frac{tonă}{h} \right]$$

i_1 : entalpia apei de alimentare la ieșirea din condensator la $30^0 C$ -
- energia termică conținută în apa condensată

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

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

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

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

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

16) Salinitate nominală: $S_{nom} = 0.01 [mg/tonă] = 10^{-8} [kg/tonă] = 10^{-2} [mg/tonă]$

17) Debitul de injecție:

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

18) Debitul de purjă:

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

B. Partea electrică***Parametrii circuitului de excitație și ai generatorului:*****1. Factorul de putere:**

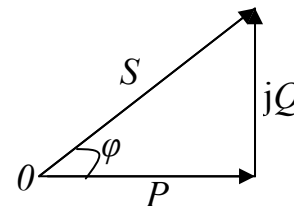
$$\cos \varphi = \frac{P[W]}{S[VA]} = 0.825$$

Cu cât puterea activă este mai mare și $\cos \varphi$ este mai ridicat din motive economice. Se mai asigură o bună rezervă de stabilitate. De obicei nu se depășește $\cos \varphi = 0.91-0.92$ pentru a asigura și o putere reactivă suficient 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: $P = U \cdot I \cdot \cos \varphi$; $Q = U \cdot I \cdot \sin \varphi$

$$S_{Gnom} = \frac{P_{Gnom} [MW]}{\cos \varphi_{nom}} = \underline{\hspace{2cm}} [MVA]$$

**3. Puterea reactivă nominală:**

$$Q_{Gnom}^2 = S_{Gnom}^2 [MVA] - P_{Gnom}^2 [MW] = \underline{\hspace{2cm}} [MVar] \Rightarrow Q_{Gnom} = \underline{\hspace{2cm}} [MVar]$$

4. Tensiunea la bornele generatorului: $U_{Gnom} = \underline{\hspace{2cm}} [kV]$ **5. Tensiunea de excitație nominală:** $U_{Enom} = \underline{\hspace{2cm}} [V]$ **6. Puterea nominală a excitatricei:** $P_{Enom} = 0.0025 \cdot P_{Gnom} = \underline{\hspace{2cm}} [MW]$ **7. Puterea nominală a punții comandate:** $P_{PCnom} = 0.01 \cdot P_{Enom} = \underline{\hspace{2cm}} [kW]$ **8. Curentul nominal de excitație:** $i_{Enom} = \frac{P_{Enom} [MW]}{U_{Enom} [V]} = \underline{\hspace{2cm}} [kA]$ **9. Tensiunea nominală a punții comandate:** $U_{PCnom} = \underline{\hspace{2cm}} [V]$ **10. Constanta de timp a excitației excitatricei:** $T_{EE} = \underline{\hspace{2cm}} [sec]$ **11. Constanta de timp a excitatricei generatorului:** $T_E = \underline{\hspace{2cm}} [sec]$

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

13. Curentul punții comandate:

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

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	>401
(aici = __)				
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

Remarcă: În tabelele anterioare, s-a evidențiat cu culoarea gri un exemplu de alegere a parametrilor electrice ai unui generator sincron a cărui putere nominală este cuprinsă între $301MW$ și $400MW$.

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.

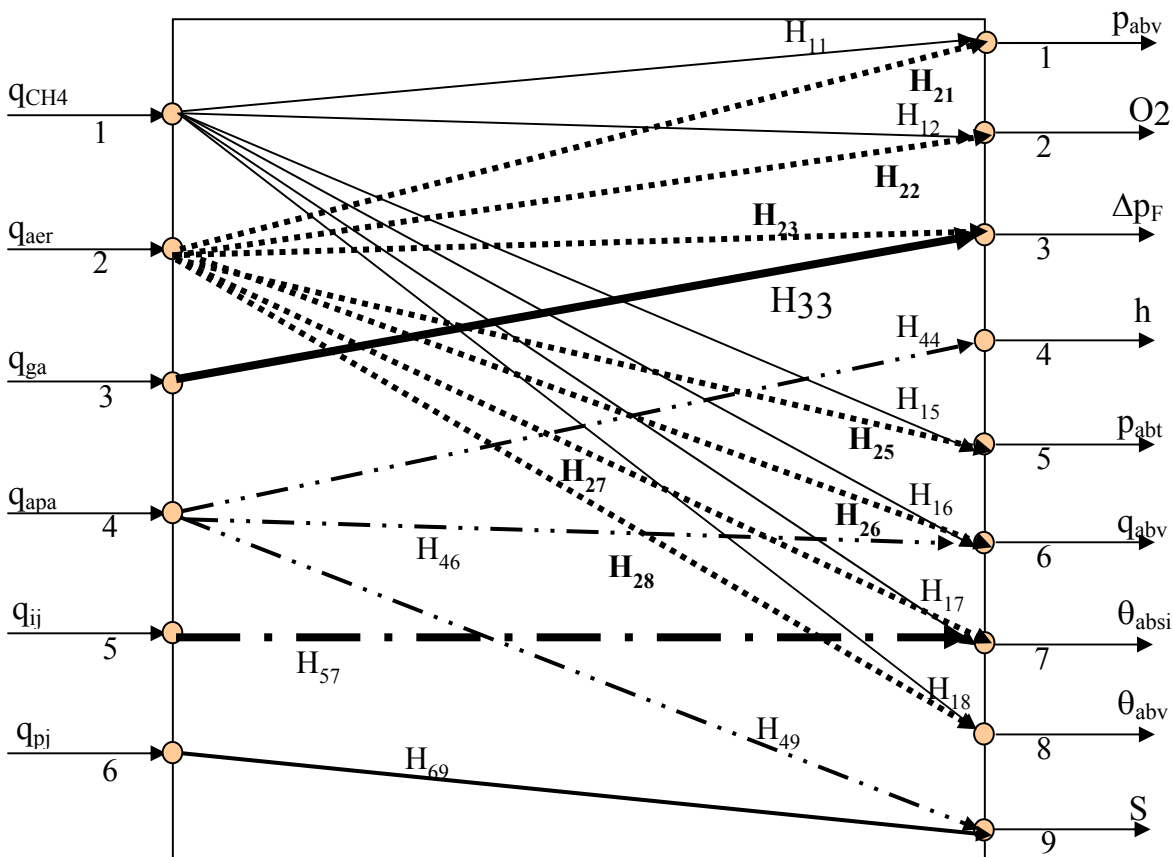


Figura 4: Reprezentarea legăturilor între funcțiile principale

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

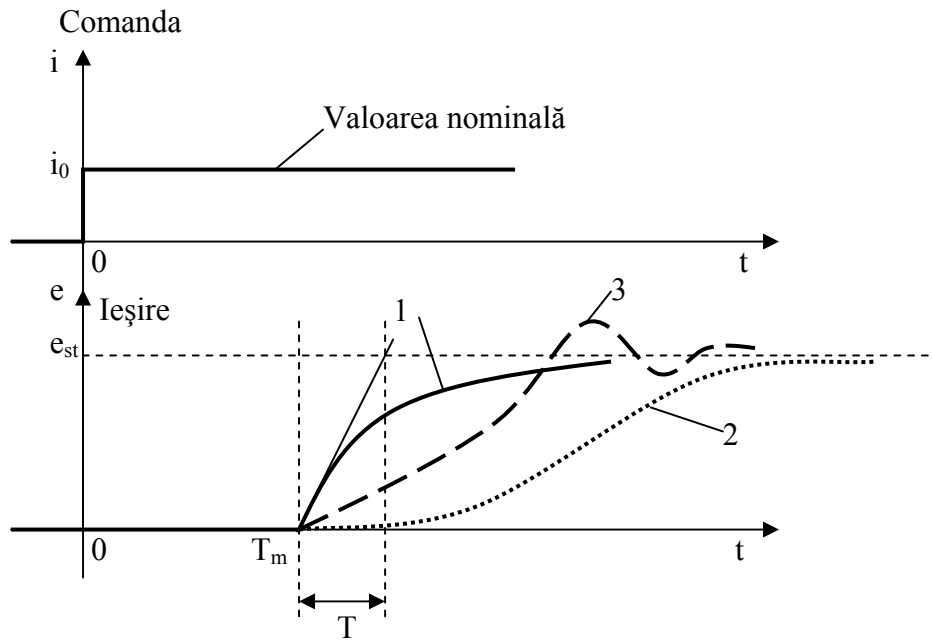
Se iau numai cele cu modul suficient de mare.

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

Având în vedere caracterul de filtru trece jos cu întârziere de fază a majorității subprocesselor incluse în funcțiile de transfer, aproximările se pot face prin identificare pe baza 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 aceasta se utilizează în proiectare și relativ rar se utilizează funcții de transfer de ordinul II.

Se întâlnesc două cazuri:

A.



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

Pentru curba **1** vom avea:

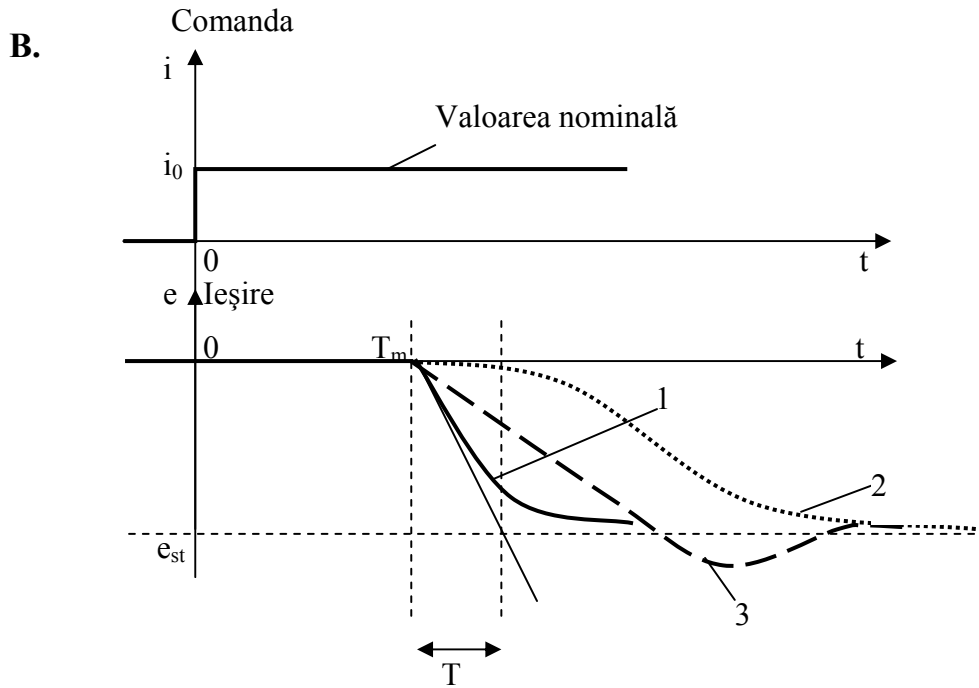
$$H_1 = \frac{Le}{Li} = \frac{k}{1 + T_s} \varepsilon^{-T_m s}; \quad k = \frac{e_{st}}{i_0};$$

Pentru curba **2** vom avea:

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

Pentru curba **3** vom avea:

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



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

S-au folosit următoarele notații:

e_{st} – valoarea staționară a ieșirii;

i_0 – valoarea staționară a comenzii;

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:

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

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

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

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

* 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 :

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

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

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

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

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

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

$$k_{15} = \frac{p_{abvtnom}[bar]}{q_{cnom} \left[\frac{Nm^3}{h} \right]} = \frac{[h \cdot bar]}{[Nm^3]}$$

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

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

$$H_{15}(s) = \frac{\cdot \varepsilon^{-540 \cdot s}}{1 + 5400 \cdot s};$$

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

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

$$k_{16} = \frac{q_{abvnom} \left[\frac{tonă}{h} \right]}{q_{cnom} \left[\frac{Nm^3}{h} \right]} = \frac{[tonă]}{[Nm^3]}$$

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

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

$$H_{16}(s) = \frac{\cdot \varepsilon^{-720 \cdot s}}{1 + 7200 \cdot s};$$

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

$$H_{17}(s) = \frac{L\{\theta_{abvsi}\}}{L\{q_c\}} = \frac{k_{17}}{1 + T_{17} \cdot s} \cdot \varepsilon^{-T_{m17} \cdot s};$$

$$k_{17} = \frac{\theta_{abvsi}[\text{°C}]}{q_{cnom} \left[\frac{\text{Nm}^3}{h} \right]} = \frac{480[\text{°C}]}{\left[\frac{\text{Nm}^3}{h} \right]} = \left[\frac{h \cdot \text{°C}}{\text{Nm}^3} \right]$$

$$T_{m17} = 10[\text{min}] = 600[\text{sec}];$$

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

$$H_{17}(s) = \frac{\varepsilon^{-600 \cdot s}}{1 + 6000 \cdot s};$$

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

$$H_{18}(s) = \frac{L\{\theta_{abv}\}}{L\{q_c\}} = \frac{k_{18}}{1 + T_{18} \cdot s} \cdot \varepsilon^{-T_{m18} \cdot s};$$

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

$$T_{m18} = 12[\text{min}] = 720[\text{sec}];$$

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

$$H_{18}(s) = \frac{\varepsilon^{-720 \cdot s}}{1 + 7200 \cdot s};$$

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

$$H_{21}(s) = \frac{L\{p_{abv}\}}{L\{q_{aer}\}} = \frac{k_{21}}{1 + T_{21} \cdot s} \cdot \varepsilon^{-T_{m21} \cdot s};$$

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

$$T_{m21} = 10[\text{min}] = 600[\text{sec}];$$

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

$$H_{21}(s) = \frac{\varepsilon^{-600 \cdot s}}{1 + 6000 \cdot s};$$

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

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

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

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

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

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

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

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

$$k_{23} = \frac{\Delta p_{Fnom}[mmH_2O]}{q_{aernom} \left[\frac{Nm^3}{h} \right]} = \frac{-2[mmH_2O]}{\left[\frac{Nm^3}{h} \right]} = \left[\frac{h \cdot mmH_2O}{Nm^3} \right]$$

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

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

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

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:

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

$$k_{25} = \frac{p_{abvnom}[bar]}{q_{aernom} \left[\frac{Nm^3}{h} \right]} = \left[\frac{h \cdot bar}{Nm^3} \right]$$

$$T_{m25} = 9[min] = 540[sec]; \quad T_{25} = 90[min] = 5400[sec];$$

$$H_{25}(s) = \frac{\cdot \varepsilon^{-540 \cdot s}}{1 + 5400 \cdot s};$$

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

$$H_{26}(s) = \frac{L\{q_{abv}\}}{L\{q_{aer}\}} = \frac{k_{26}}{1 + T_{26} \cdot s} \cdot \varepsilon^{-T_{m26} \cdot s};$$

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

$$T_{m26} = 12[\text{min}] = 720[\text{sec}];$$

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

$$H_{26}(s) = \frac{\varepsilon^{-720 \cdot s}}{1 + 7200 \cdot s};$$

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

$$H_{27}(s) = \frac{L\{\theta_{absi}\}}{L\{q_{aer}\}} = \frac{k_{27}}{1 + T_{27} \cdot s} \cdot \varepsilon^{-T_{m27} \cdot s};$$

$$k_{27} = \frac{\theta_{absi nom} [^{\circ}\text{C}]}{q_{aernom} \left[\frac{\text{Nm}^3}{h} \right]} = \frac{480 [^{\circ}\text{C}]}{\left[\frac{\text{Nm}^3}{h} \right]} = \frac{h \cdot ^{\circ}\text{C}}{\text{Nm}^3};$$

$$T_{m27} = 10[\text{min}] = 600[\text{sec}];$$

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

$$H_{27}(s) = \frac{\varepsilon^{-600s}}{1 + 6000 \cdot s};$$

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

$$H_{28}(s) = \frac{L\{\theta_{abv}\}}{L\{q_{aer}\}} = \frac{k_{28}}{1 + T_{28} \cdot s} \varepsilon^{-T_{m28} \cdot s};$$

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

$$T_{m28} = 12[\text{min}] = 720[\text{sec}];$$

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

$$H_{28}(s) = \frac{\varepsilon^{-720 \cdot s}}{1 + 7200 \cdot s};$$

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

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

$$k_{33} = \frac{\Delta p_{Fnom} [mmH_2O]}{q_{ganom} \left[\frac{Nm^3}{h} \right]} = \frac{-2 [mmH_2O]}{\left[\frac{Nm^3}{h} \right]} = \frac{\left[\frac{h \cdot mmH_2O}{Nm^3} \right]}{\left[\frac{Nm^3}{h} \right]}$$

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

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

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

În ipoteza $q_{aer} = 0$ și $q_{apă} = 0$ se consideră că presiunea în focar este egală cu cea din exterior. Dacă se pornesc exhaustoarele la q_{ganom} menținând în continuare $q_{aer} = 0$ în focar rezultă o depresiune care în regim staționar este $-2 [mmH_2O]$.

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

$$H_{44}(s) = \frac{L\{h\}}{L\{q_{apa}\}} = \frac{k_{44}}{1 + T_{44} \cdot s} \varepsilon^{-T_{m44} \cdot s}; \quad h_{nom} = 100[mm] = 0.1 [m];$$

$$k_{44} = \frac{h_{nom} [m]}{q_{apanom} \left[\frac{tona}{h} \right]} = \frac{0.1 [m]}{\left[\frac{tona}{h} \right]} = \frac{\left[\frac{h \cdot m}{tona} \right]}{\left[\frac{tona}{h} \right]}$$

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

$$T_{44} = 20[sec];$$

$$H_{44}(s) = \frac{\varepsilon^{-20 \cdot s}}{1 + 20 \cdot s};$$

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

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

$$k_{46} = \frac{q_{abvnom} \left[\frac{tona}{h} \right]}{q_{apanom} \left[\frac{tona}{h} \right]} = \frac{\left[\frac{tona}{h} \right]}{\left[\frac{tona}{h} \right]} = \frac{\left[\frac{tona}{h} \right]}{\left[\frac{tona}{h} \right]};$$

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

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

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

$$H_{49}(s) = \frac{L\{S\}}{L\{q_{apa}\}} = \frac{k_{49}}{1 + T_{49} \cdot s} \cdot \varepsilon^{-T_{m49} \cdot s};$$

$$k_{49} = \frac{S_{nom} [\%]}{q_{apanom} \left[\frac{tona}{h} \right]} = \frac{1 [\%]}{\left[\frac{tona}{h} \right]} = \left[\frac{h \cdot \%}{tona} \right]$$

$$T_{m49} = 60 [min] = 3600 [sec];$$

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

$$H_{49}(s) = \frac{\varepsilon^{-3600 \cdot s}}{1 + 36000 \cdot s};$$

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

$$H_{57}(s) = \frac{L\{\theta_{absi}\}}{L\{q_{ij}\}} = \frac{k_{57}}{1 + T_{57} \cdot s} \varepsilon^{-T_{m57} \cdot s};$$

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

$$k_{57} = - \frac{\Delta \theta_{absinom} [^\circ C]}{q_{ijnom} \left[\frac{tona}{h} \right]} = - \frac{100 [^\circ C]}{\left[\frac{tona}{h} \right]} = - \left[\frac{h \cdot ^\circ C}{tona} \right]$$

$$T_{m57} = 10 [sec];$$

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

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

19. Funcția de transfer a salinității în raport cu debitul de purjă :

$$H_{69}(s) = \frac{L\{S\}}{L\{q_{pj}\}} = \frac{k_{69}}{1 + T_{69} \cdot s} \varepsilon^{-T_{m69} \cdot s};$$

$$k_{69} = - \frac{\Delta S_{nom} [\%]}{q_{pjnom} \left[\frac{tona}{h} \right]} = - \frac{1 [\%]}{\left[\frac{tona}{h} \right]} = - \left[\frac{h \cdot \%}{tona} \right]$$

$$T_{m69} = 60 [sec];$$

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

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

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: Matricea de transfer aferentă cazanului

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

Observația de mai sus este valabilă mai ales la procese puternic inerțiale, la care primele două derivate sunt semnificative, iar celelalte derivate 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}).

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

A. Reglarea presiunii aburului viu

Buclo de reglare din Figura 6 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.

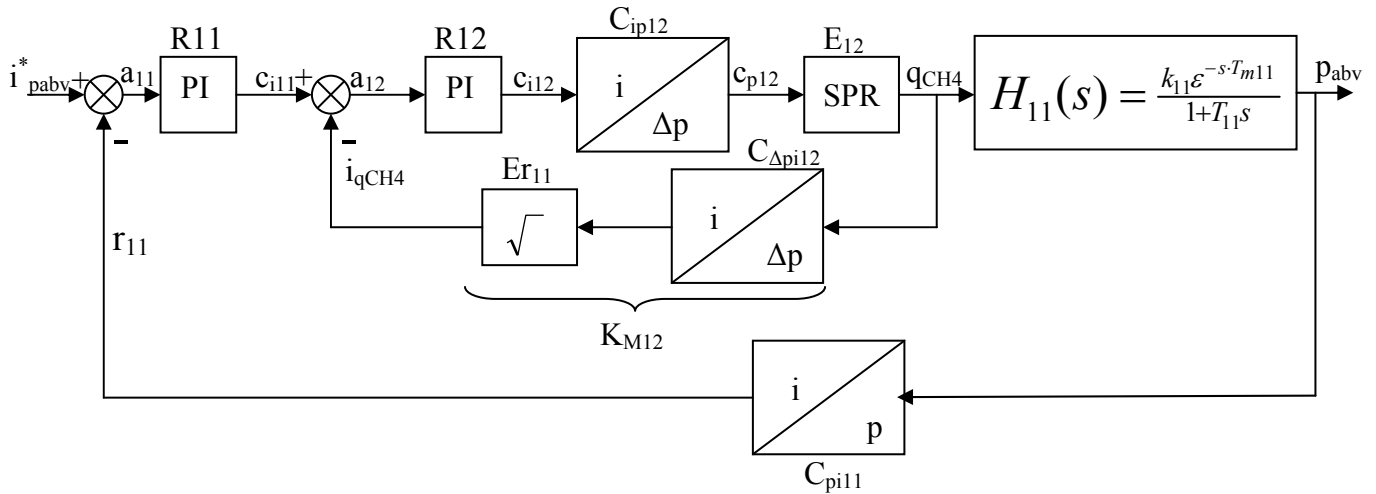


Figura 6: Buclo de reglare a presiunii aburului viu

C_{ip12} — convertor curent unificat-presiune diferențială;

SPR — servomotor pneumatic cu robinet;

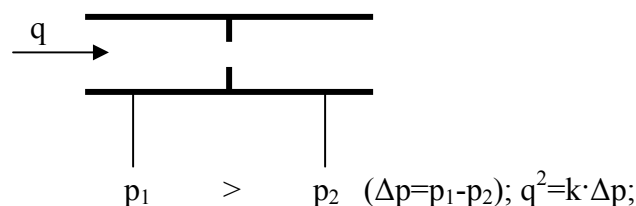
C_{pi11} — convertor presiune-curent unificat care asigură reacția exterioară (principală în regim staționar);

i_{pabv}^* — curent unificat de referință destinat stabilizării presiunii aburului viu;

E_{r12} — extractor de radical.

Buclo 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 acestuia

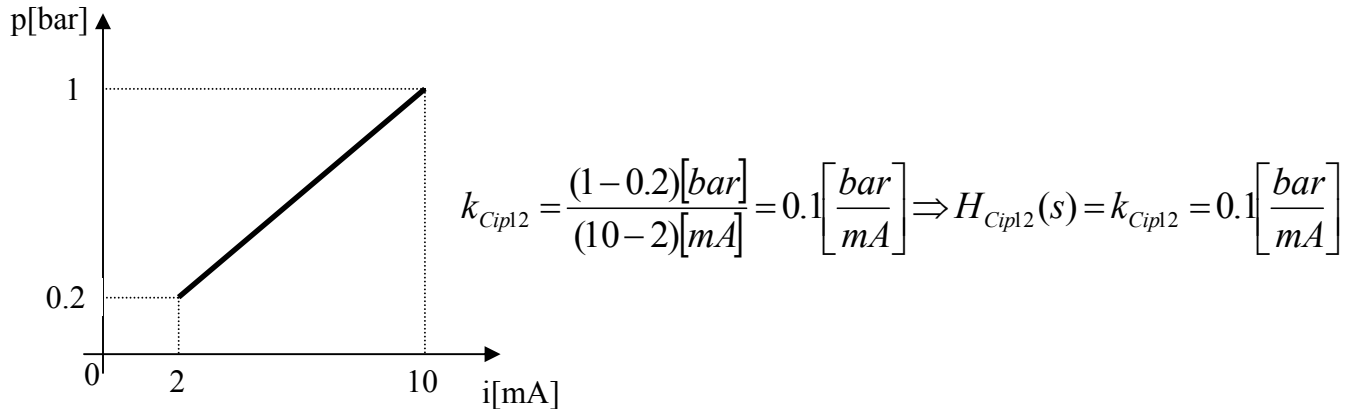


Figura 7: Caracteristica statică a convertorului

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

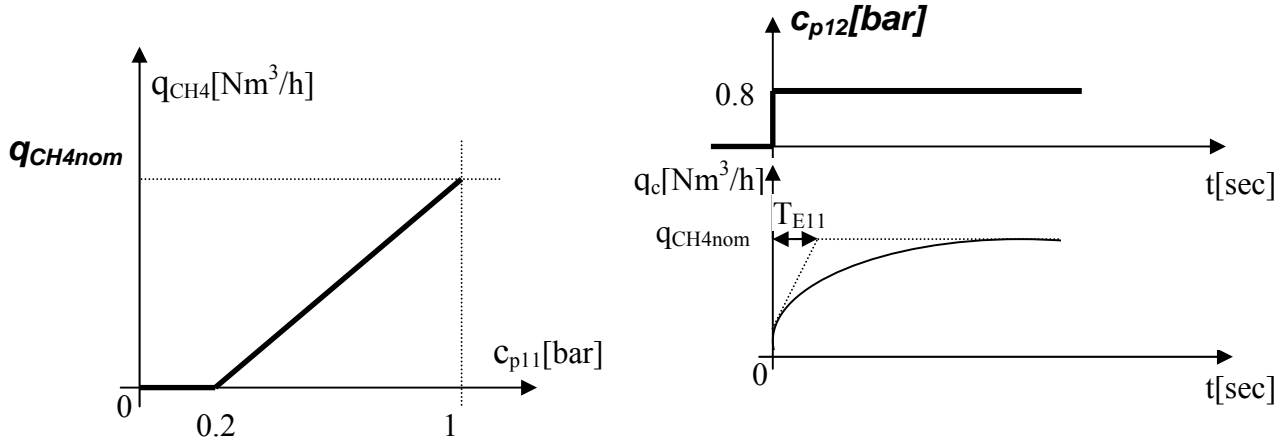


Figura 8: Caracteristica statică a SPR

Figura 9: Răspunsul indicial al SPR

$$k_{E12} = \frac{q_{cnom} \left[\frac{Nm^3}{h} \right]}{(1 - 0.2)[bar]} = \frac{\left[\frac{Nm^3}{h \cdot bar} \right]}{0.8} ;$$

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

$$H_{E12}(s) = \frac{L\{q_c\}}{L\{C_{p12}\}} = \frac{k_{E12}}{1 + T_{E12} \cdot s} = \frac{\left[\frac{Nm^3}{h \cdot bar} \right]}{1 + s}$$

c) Circuitul intern de reacție

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

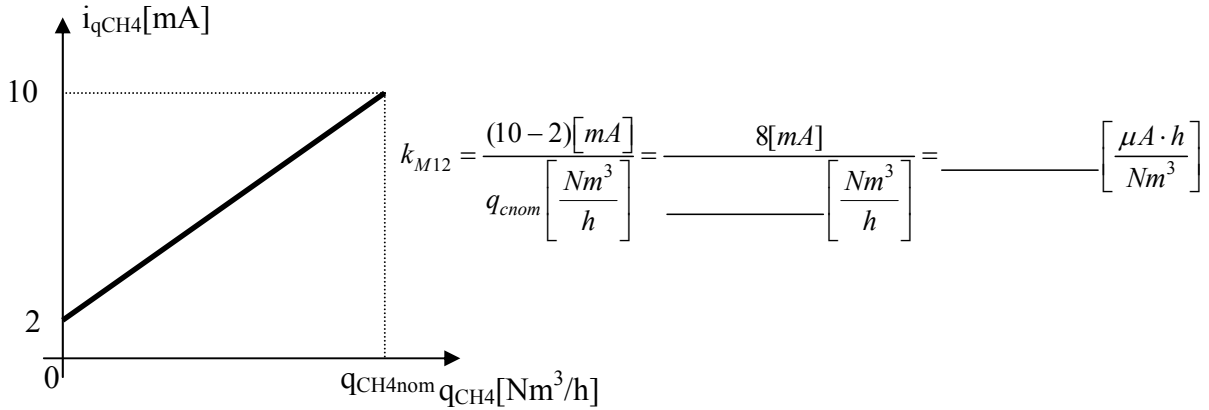
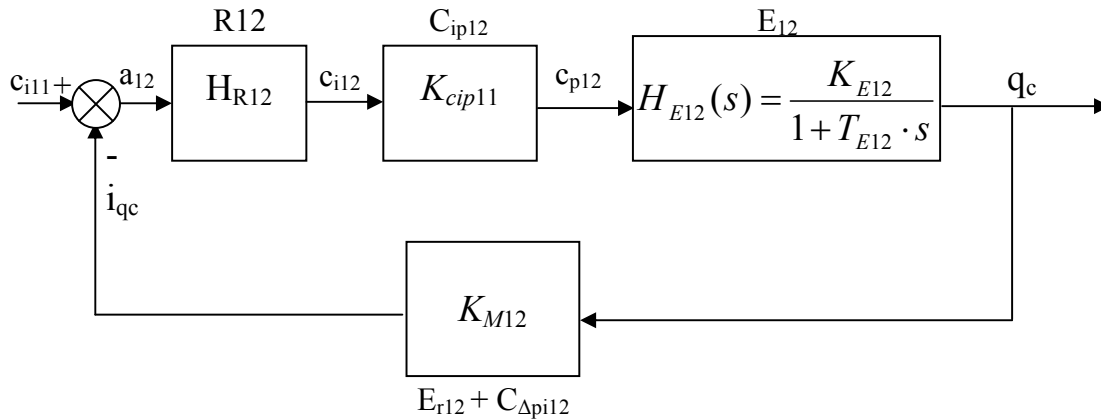


Figura 10: Caracteristica statică a circuitului intern de reacție

Bucula de reglare internă are următoarea formă:



Acest sistem fiind de inerție mică și de stabilizare, regulatorul R12 se va acorda după criteriul modulului [5-7], constanta de timp mort fiind neglijabilă (nu există T_m) [8].

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

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

unde T_{Σ} – suma constantelor de timp necompensabile;

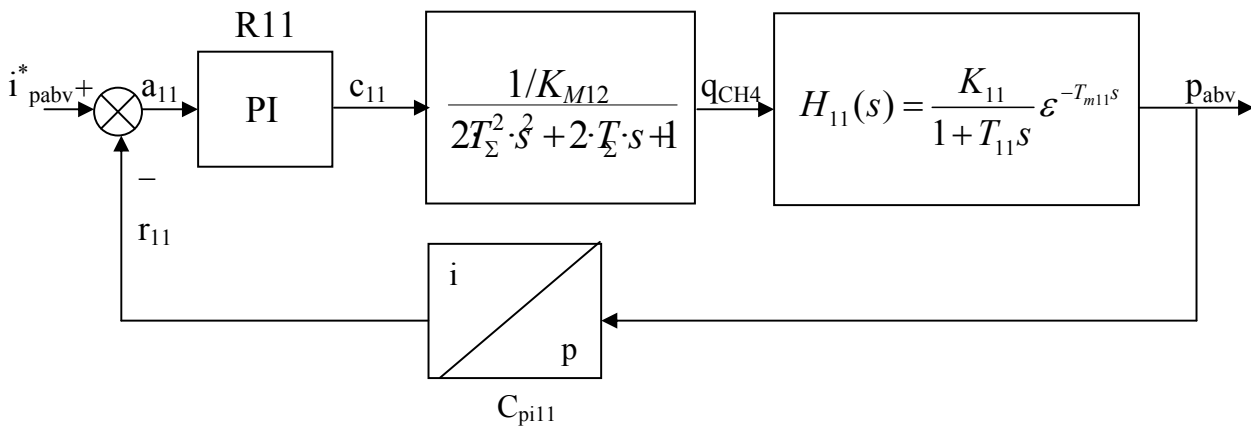
$$T_{\Sigma 12} = 10^{-2} [\text{sec}] = 0.01 [\text{sec}] \text{ și } T_{E12} = 1 [\text{sec}]; K_{EX12}=1;$$

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

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

$$V_{R12} = \frac{1}{0.02}; T_{i12} = 0.02 [\text{sec}]; \rightarrow \text{reg. P.I.}$$

d) Circuitul extern de reacție



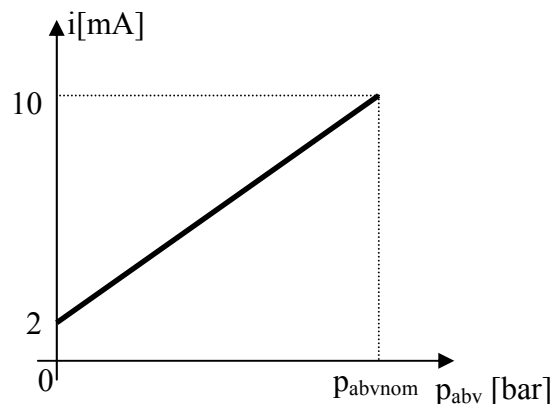
Spre deosebire de bucla internă, în această buclă externă există o constantă de timp relativ mare: $T_{m11}=10$ min. Ca urmare acordarea regulatorului R11 se face analog proceselor lente după criteriul Ziegler-Nichols [9-12] în varianta de stabilizare, având funcția de transfer exterioară.

$$H_{EX11}(s) = \frac{1/K_{M12}}{1 + 2 \cdot T_{\Sigma} \cdot s + 2 \cdot T_{\Sigma}^2 \cdot s^2} \cdot \frac{K_{11}}{1 + T_{11} \cdot s} \varepsilon^{-T_{m11} \cdot s} \cdot K_{cp11} \cong \frac{K_{11} \cdot K_{cp11}}{1 + T_{11} \cdot s} \varepsilon^{-T_{m11} \cdot s}$$

Constanta de proporționalitate K_{Cpi11} rezultă din caracteristica statică din figura alăturată:

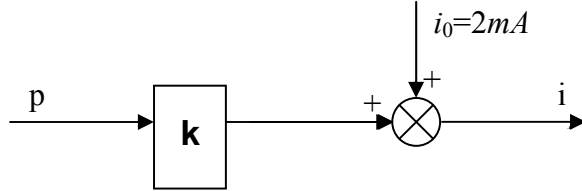
$$T_{11} = 100 \text{ min } (T_{\Sigma 12} \ll T_{11});$$

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



$$K_{cpi11} = \frac{(10-2)[mA]}{p_{abvnom}[bar]} = \frac{8[mA]}{\quad[bar]} = \quad \left[\frac{mA}{bar} \right]$$

Se face modelarea pentru convertor:



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

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

Folosind criteriul Ziegler-Nichols, obținem:

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

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

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

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

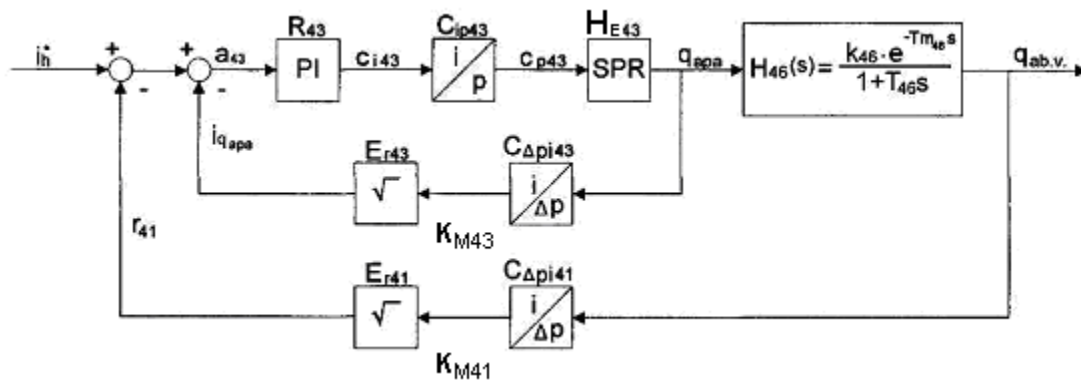
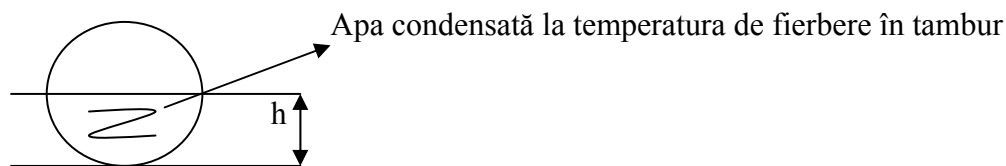


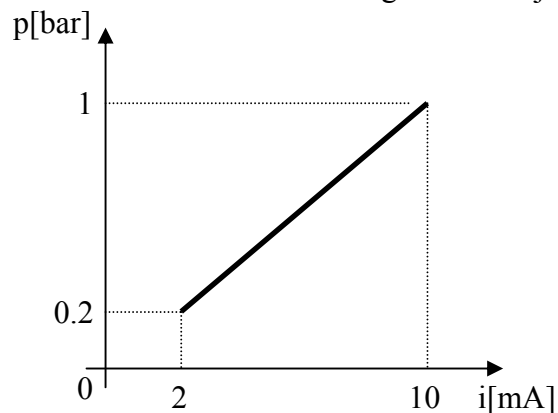
Figura 11: Bucla de reglare a debitului de abur viu

$i_h^* \rightarrow$ curentul unificat de referință pentru nivelul apei în tambur (h).



a) Convertorul curent-presiune C_{ip43}

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



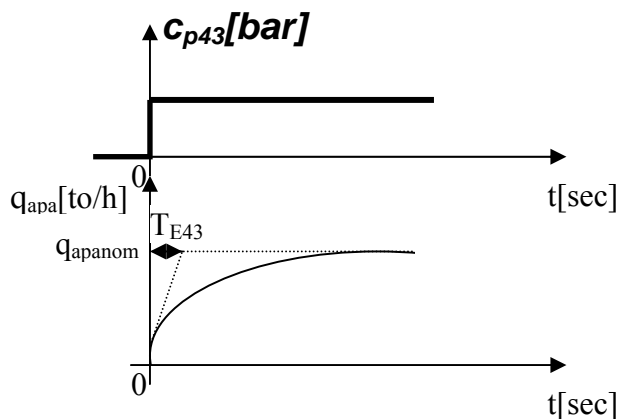
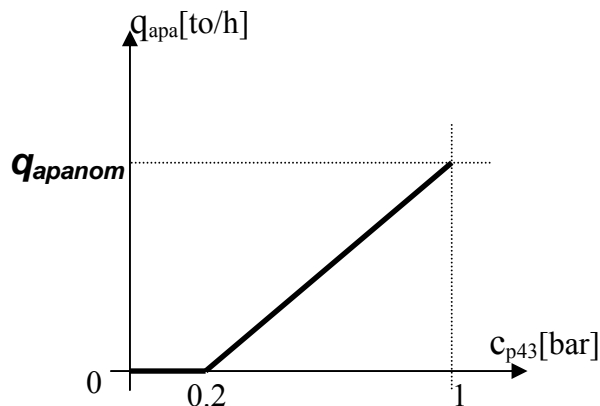
$$K_{Cip43} = \frac{(1 - 0.2)[bar]}{(10 - 2)[mA]} = 0.1 \left[\frac{bar}{mA} \right] \Rightarrow$$

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

Figura 12: Caracteristica statică a convertorului

b) Servomotorul pneumatic cu ventil de reglare SPR (cu robinet)

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



$$H_{E43} = K_{E43} = \frac{q_{apanom} \left[\frac{\text{tona}}{h} \right]}{(1 - 0.2)[\text{bar}]} = \frac{\left[\frac{\text{tona}}{h} \right]}{0.8[\text{bar}]} = \left[\frac{\text{tona}}{h \cdot \text{bar}} \right];$$

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

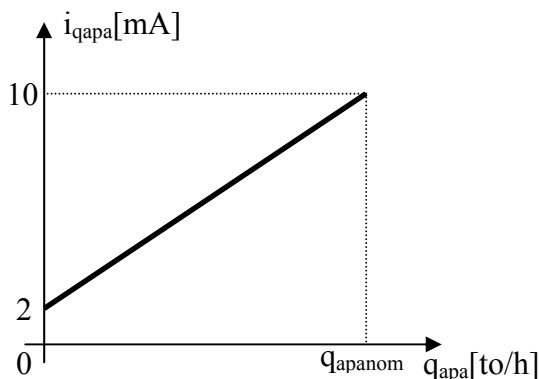
$$H_{E43}(s) = \frac{L\{q_{apa}\}}{L\{C_{p43}\}} = \frac{K_{E43}}{1 + T_{E43} \cdot s} = \frac{1}{1 + s};$$

c) Circuitul intern de reacție

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

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

Coeficientul a rezultat din figura de mai jos:



d) Circuitul extern de reacție

- conține aceleași elemente ca și bucla internă, având:

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

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

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

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

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 bucla de reacție internă asupra debitului de apă, la acordarea lui fiind posibilă neglijarea efectului buclei de reacție externe.

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

$$H'_{Ext43}(s) = k_{Cip43} \cdot H_{E43} \cdot k_{M43} = k_{Cip43} \cdot \frac{k_{E43}}{1+T_{E43} \cdot s} \cdot k_{M43};$$

$$H'_{Ext43}(s) = 0.1 \cdot \frac{1}{1+s} \cdot \frac{1}{1+s} = \frac{1}{1+s} \cong \frac{1}{1+s};$$

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

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

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

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

Se obține, așadar, un regulator P.I. cu $V_R =$; și $T_i =$ [sec];

Capitolul 6. Reglarea frecvenței și a puterii active

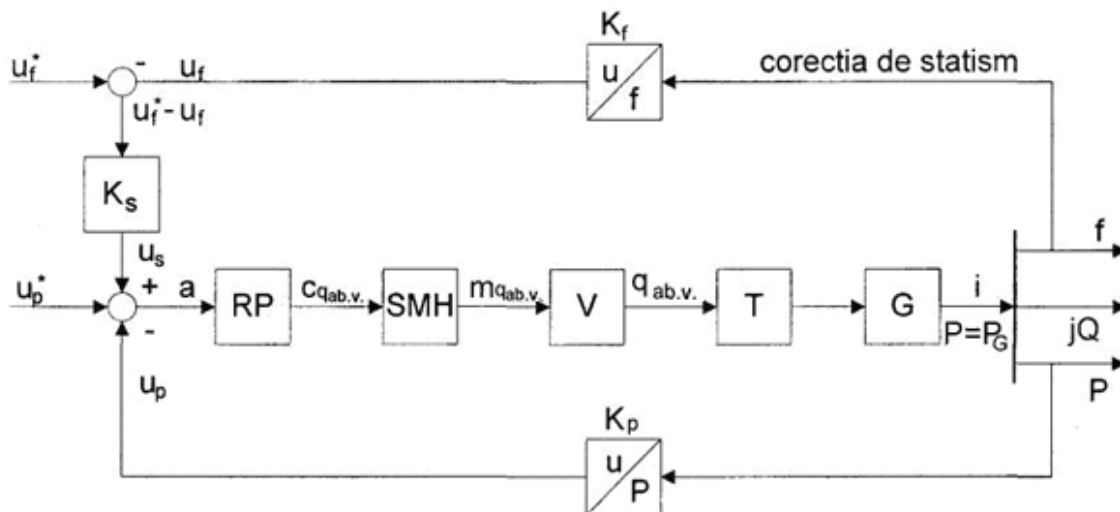


Figura 13: Sistemul de reglare a puterii active, cu corecție după frecvență

Există 2 bucle principale de reglare:

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

Notatii:

RP - regulatorul puterii active

SMH - servomotor hidraulic

V - ventilul de admisie parțială a aburului în turbină

T - turbina

G - generatorul sincron cu o pereche de poli în regim trifazat

u/f - convertor frecvență-tensiune unificată

u_f - tensiune unificată 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 rezistența de ieșire cât mai mică deoarece sunt mai ieftine și mai avantajoase.

Alte notații:

u_f^* u_P^* – tensiuni de referință pentru frecvență, putere activă

u_f – reacția în tensiune proporțională cu frecvența **f**

u_S – tensiunea de ieșire din elementul de statism **K_S**

a – abaterea de reglare dintre **u_P^*** și **u_P** (tensiune unificată proporțională cu puterea activă)

c_{qabv} – semnalul de comandă a debitului de abur viu

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

Semnalul de intrare este abaterea 'a', iar semnalul de ieșire este comanda 'u' ce acționează direct asupra ventilului. Dacă abaterea 'a' crește, pârghia L_1L_2 se rotește în jurul lui O_3 , 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 L_3L_4 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 O_3 în momentele următoare. Astfel coboară și O_2 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 dereglări 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 sertăraș-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:

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

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

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

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

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

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

Ecuațiile (1), (4) și (6) reprezintă ecuațiile celor trei pârghii utilizate în schema SMH-ului.

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 pentru condiții inițiale nule [13,14], asupra sistemului de ecuații (1)÷(6), rezultă:

$$(1) \quad L\{b\} = K_1 \cdot L\{a\}$$

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

$$(3) \quad s \cdot L\{u\} = K \cdot L\{c\}$$

$$(4) \quad v = K_2 \cdot u$$

$$(5) \quad F \cdot s \cdot L\{v - w\} = R \cdot L\{w\}$$

$$(6) \quad L\{r\} = K_3 \cdot L\{w\}$$

Eliminând variabilele intermediare $L\{b\}$, $L\{c\}$, $L\{u\}$, $L\{w\}$, $L\{r\}$ obținem forma funcției de transfer a sistemului sertaraș-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 neglija. Vom obține așadar $\frac{L\{u\}}{L\{a\}}$ cu comportare PI (Proportional Integrator), fără inerție proprie.

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

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

unde $m_{qab nom}$ – deplasarea tijei SMH la extreme. De asemenea, K_{SMH} se calculează ținând cont de toate elementele care fac legătura între regulatorul RP și SMH. Știind că:

$$T_{iSMH} = 20[sec] \Rightarrow$$

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

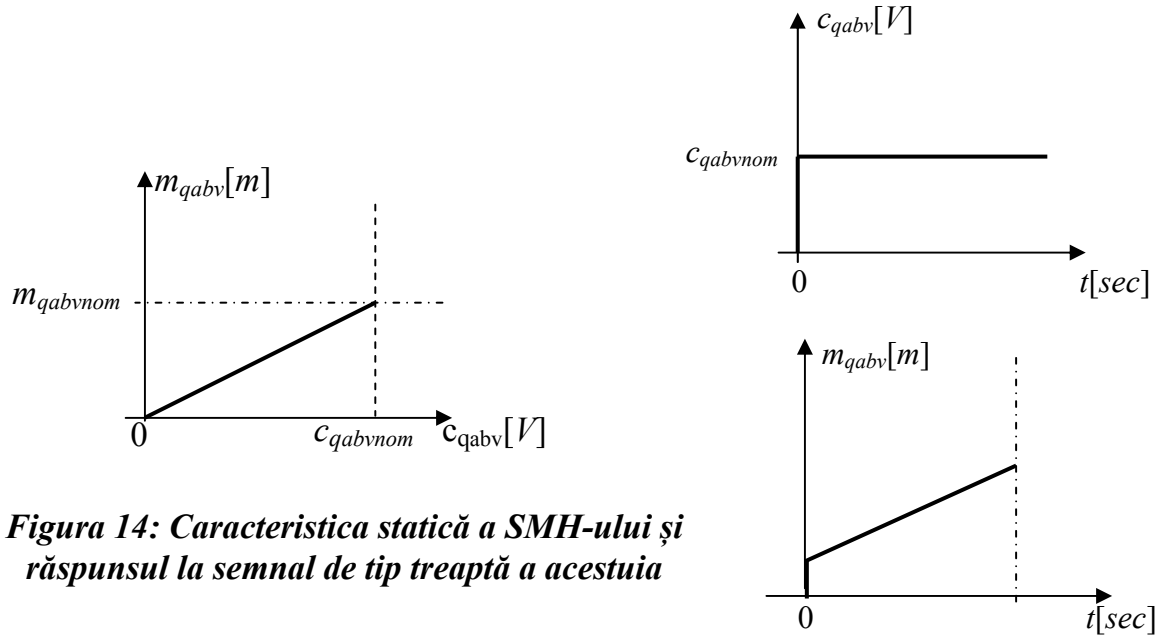


Figura 14: Caracteristica statică a SMH-ului și răspunsul la semnal de tip treaptă a acestuia

b) Ventilul V

$$H_V(s) = \frac{L\{q_{abv}\}}{L\{m_{qabv}\}} = K_V = \frac{q_{abvnom} \left[\frac{\text{tona}}{h} \right]}{m_{qabvnom} [m]} = \frac{\left[\frac{\text{tona}}{h} \right]}{0.1 [m]} = \underline{\hspace{2cm}} \left[\frac{\text{tona}}{m \cdot h} \right]$$

c) Turbina + generatorul T+G

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

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

$$K_{T+G} = \frac{P_{Gnom} [MW]}{q_{abvnom} \left[\frac{\text{tona}}{h} \right]} = \frac{\underline{\hspace{2cm}} [MW]}{\underline{\hspace{2cm}} \left[\frac{\text{tona}}{h} \right]} = \underline{\hspace{2cm}} \left[\frac{MW \cdot h}{\text{tona}} \right] \Rightarrow$$

$$\Rightarrow H_{T+G}(s) = \frac{\underline{\hspace{2cm}}}{1 + 10 \cdot s}$$

d) Bucla de reacție de putere activă, respectiv de corecție de statism

1. Pentru traductorul de putere activă-tensiune

$$K_P = \frac{L\{u_P\}}{L\{P\}} = \frac{10 [V]}{\underline{\hspace{2cm}} [MW]} = \underline{\hspace{2cm}} \left[\frac{V}{MW} \right];$$

2. Coeficientul de transfer pe circuitul de corecție de statism

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

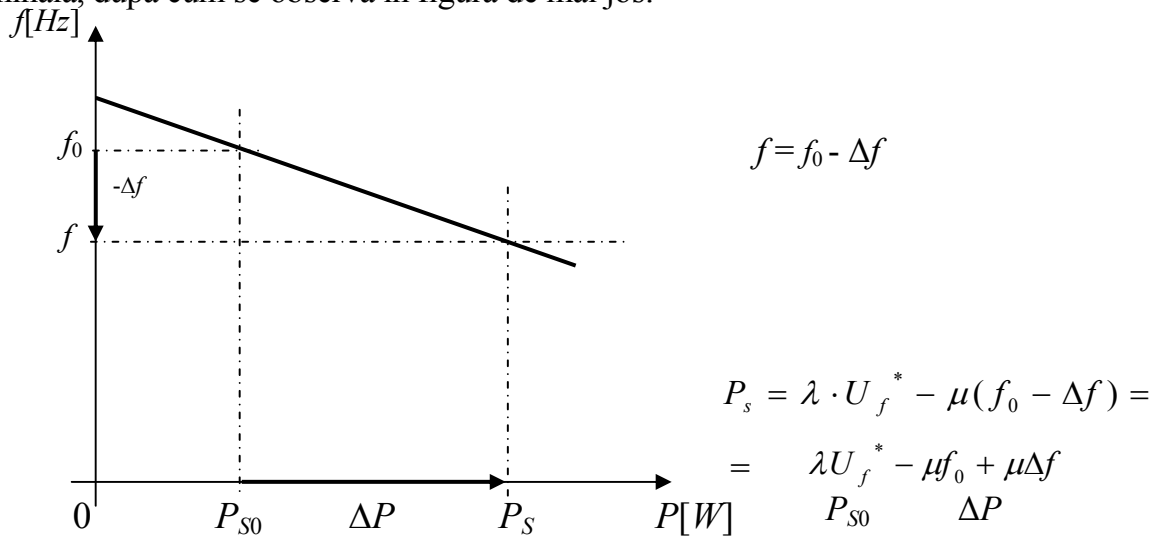
3. Coeficientul reacției de statism K_S

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_{S0} 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:

$$u_S = K_S \cdot (u_f^* - u_f) = K_S \cdot (u_f^* - K_f \cdot f)$$

$$P_S = K_{SP} \cdot u_S = K_{SP} \cdot K_S \cdot (u_f^* - K_f \cdot f) \rightarrow P_S = \text{puterea corecției de statism}$$

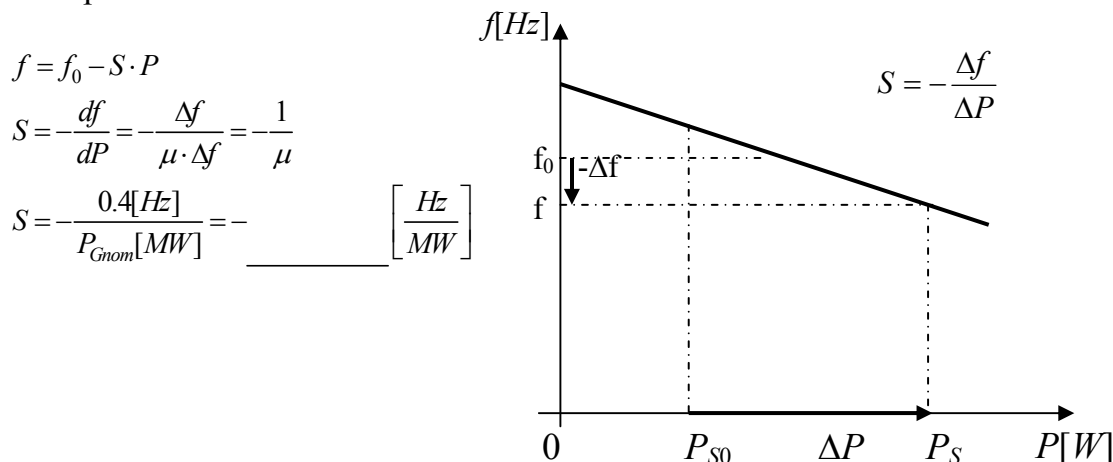
unde K_{SP} este puterea corecției de statism raportată la reacția

$$f = f_0 - \Delta f \Rightarrow P_S = \lambda \cdot u_f^* - \mu(f_0 - \Delta f) = \lambda \cdot u_f^* - \mu \cdot f_0 + \mu \cdot \Delta f = P_{S0} + \Delta P$$

$$\text{unde } \mu = K_{SP} \cdot K_S \cdot K_f \text{ si } \lambda = K_{SP} \cdot K_S$$

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:



unde:

–0.4 Hz reprezintă abaterea de frecvență maximă admisă în jurul frecvenței nominale;

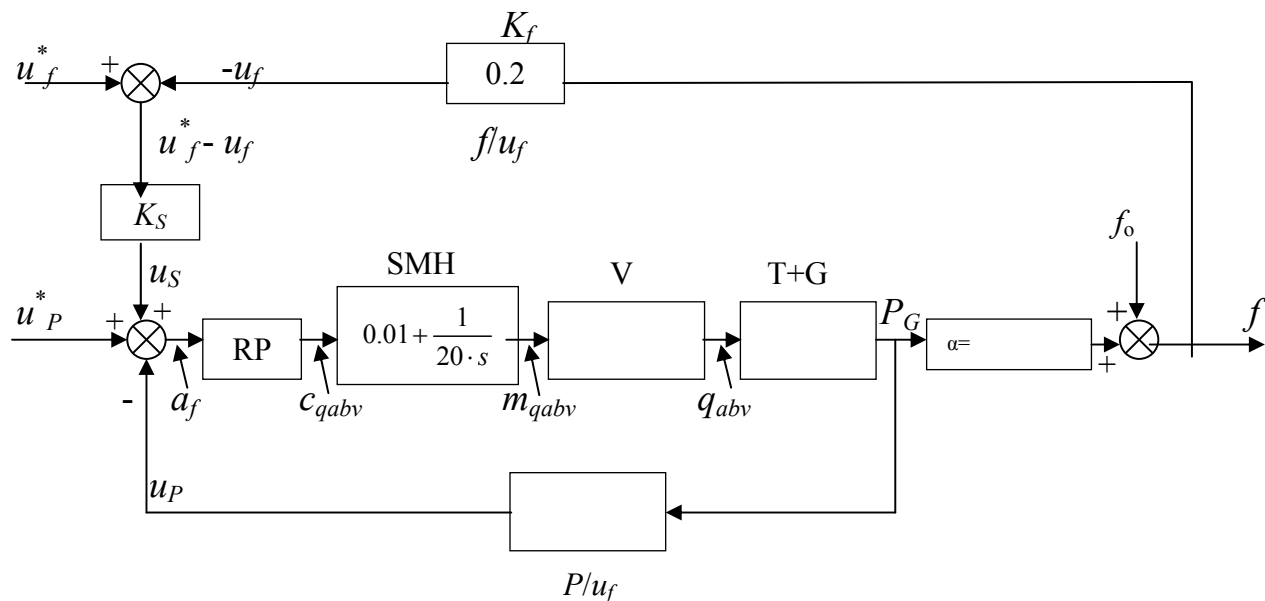
–S reprezintă raportul între variația frecvenței sistemului energetic la variația puterii grupului de la "0" la P_{nom} .

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

Dacă puterea livrată de grup este nulă ($P_G = 0W$), frecvența sistemului electroenergetic este f_0 . În aceleași 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.

$$f = f_0 + \alpha \cdot P_G \text{ unde } \alpha = [Hz/MW]$$

Ca urmare, o putere livrată în sistem $P_G = \text{_____}[MW]$ va atrage o creștere a frecvenței sistemului de $\text{_____}[Hz]$. După efectuarea calculelor, Figura 13 se poate reface sub forma:



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.

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

$$\text{Deci, } H_{Ex1}(s) = \left(0.01 + \frac{1}{20s}\right) \cdot \underline{\hspace{2cm}} \cdot \underline{\hspace{2cm}} = \underline{\hspace{2cm}}$$

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

$$H_d(s) = H_{Ex1}(s) \cdot K_P = \underline{\hspace{2cm}} \cdot \underline{\hspace{2cm}} \cong \underline{\hspace{2cm}}$$

$$H_{Ex}(s) = H_d(s) \cdot \frac{1}{1 + T_\Sigma \cdot s} = \underline{\hspace{2cm}} ;$$

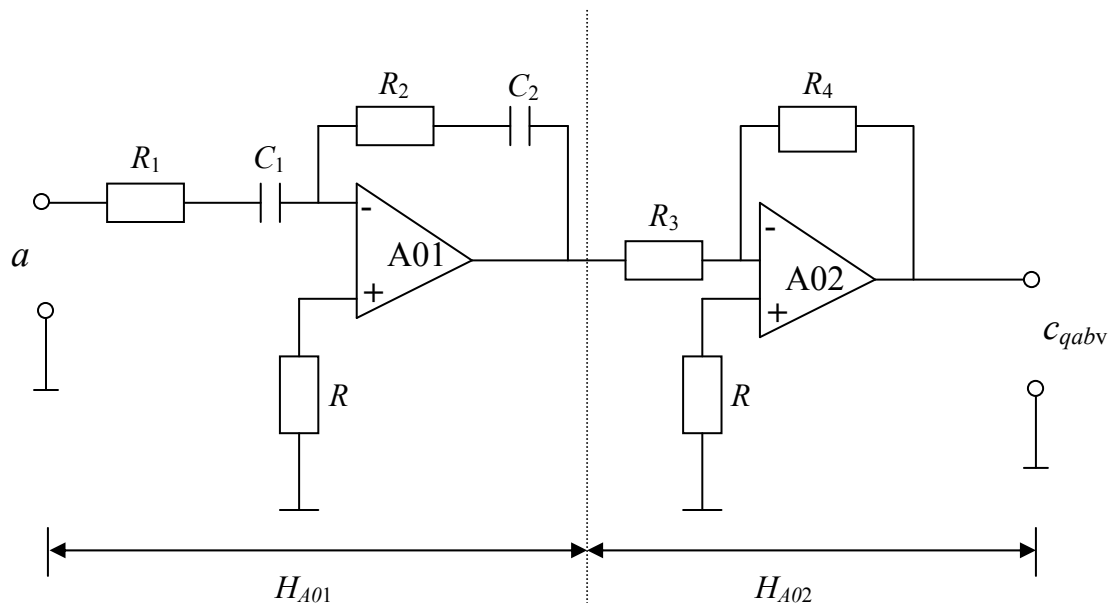
unde $T_\Sigma = 0.01 \text{ [sec]}$ și reprezintă suma constantelor de timp principal necompensabile. Rezultă regulatorul de tip PD (Proportional Derivativ):

$$H_{RP}(s) = \frac{1}{2 \cdot T_\Sigma \cdot s \cdot (1 + T_\Sigma \cdot s)} \cdot \frac{1}{H_{Ex}(s)} =$$

$$= \underline{\hspace{2cm}} = \underline{\hspace{2cm}}$$

f) Modelarea analogică a regulatorului

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



Un amplificator operațional are următoarele proprietăți:

- în circuit deschis amplificarea este foarte mare (cel puțin 10^4);
- posedă două borne de intrare: una inversoare (folosită uzual) și una neinversoare care se asociază reacțiilor pozitive;
- impedanța de intrare foarte mare (cel puțin $1\text{ M}\Omega$);
- impedanța de ieșire foarte mică ($1\div 10\Omega$) - generator ideal la ieșire;
- constanta de timp echivalentă neglijabilă (cel mult 10^{-4} sec).

$$H_{AO}(s) = \frac{L\{V_o\}}{L\{V_i\}} \cong \frac{-Z_R}{Z_i}$$

Se observă că funcția de transfer a unui amplificator operațional utilizat în conexiunea cu reacție negativă este minusul raportului dintre impedanța echivalentă pe circuitul de reacție Z_R și impedanța echivalentă pe circuitul de intrare Z_i . De asemenea, V_o și V_i se referă la tensiunile de intrare și de ieșire în/din amplificatorul operațional.

R se calibrează astfel încât puntea rezistivă echivalentă să fie echilibrată în regim staționar. Se consideră, pentru simplificarea calculelor că $C_1 = C_2 = C$.

$$H_{AOech}(s) = -\frac{R_2 + \frac{1}{C_2 \cdot s}}{R_1 + \frac{1}{C_1 \cdot s}} \cdot (-1) \cdot \frac{R_4}{R_3} = \frac{1 + T_2 \cdot s}{1 + T_1 \cdot s} \cdot K$$

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

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:

$$H_{AO1}(s) = \frac{1 + T_2 \cdot s}{1 + T_1 \cdot s} = \frac{1 + R_2 \cdot C \cdot s}{1 + R_1 \cdot C \cdot s} = \underline{\hspace{2cm}}$$

$$\Rightarrow \begin{cases} T_1 = R_1 \cdot C = \underline{\hspace{1cm}} [sec] \\ T_2 = R_2 \cdot C = \underline{\hspace{1cm}} [sec] \end{cases}$$

Valoarea condensatorului C se alege din catalog:

$$C = 10[\mu F]$$

$$\Rightarrow \begin{cases} R_1 = T_1 / C = \underline{\hspace{1cm}} [k\Omega] \\ R_2 = T_2 / C = \underline{\hspace{1cm}} [M\Omega] \end{cases}$$

Rezistența R_1 se poate obține prin înserierea a două rezistențe de câte $\underline{\hspace{1cm}} k\Omega$ sau dintr-o rezistență de $\underline{\hspace{1cm}} k\Omega$ și un potențiomtru de $\underline{\hspace{1cm}} k\Omega$.

Pentru AO2:

$$H_{AO2}(s) = K = \frac{R_4}{R_3} = \underline{\hspace{1cm}} ;$$

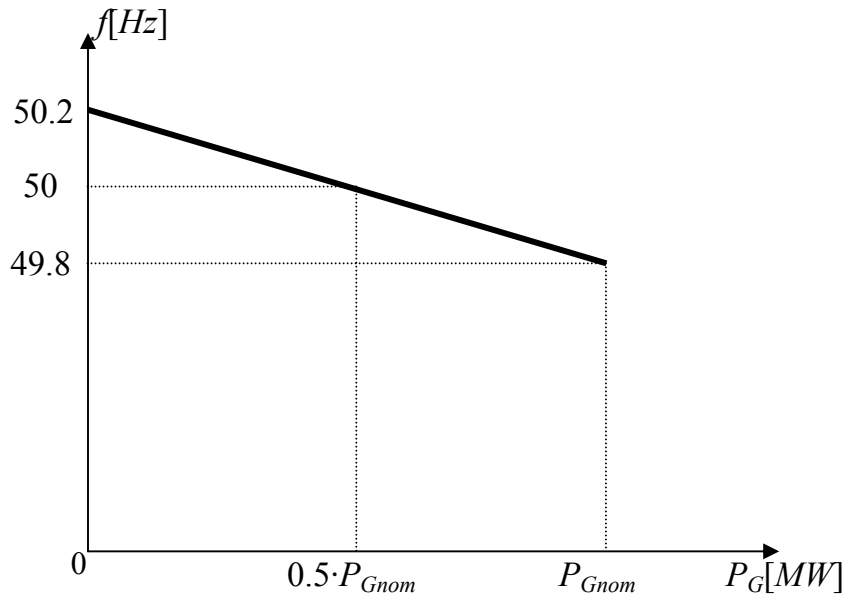
$$\text{Valorile rezistențelor } R_3 \text{ și } R_4 \text{ se aleg din catalog: } \Rightarrow \begin{cases} R_3 = \underline{\hspace{1cm}} [k\Omega] \\ R_4 = \underline{\hspace{1cm}} [M\Omega] \end{cases}.$$

f) Calculul buclei corectoare de statism

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

$$S = -\frac{\Delta f [Hz]}{P_{Gnom} [MW]} = -\frac{0.4}{\underline{\hspace{1cm}}} \cong -\underline{\hspace{1cm}} \left[\frac{Hz}{MW} \right]$$

Creșterea puterii nominale P_{Gnom} are ca efect readucerea frecvenței f , la valoarea impusă prin referință ($50 Hz$), aspect evidențiat (sub forma unui exemplu bazat pe un caz particular) în figura de mai jos:



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

În regim staționar, rezultă:

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

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

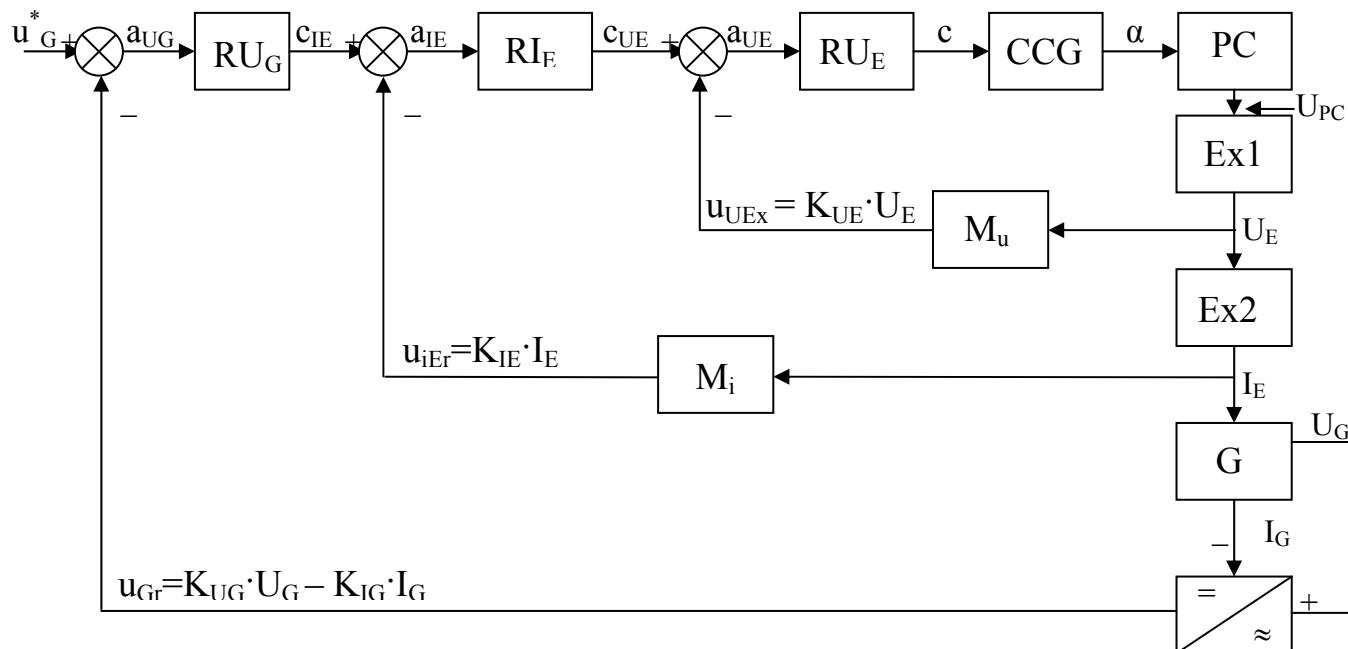
$$\Rightarrow f = \frac{1}{0.02 \cdot P_{Gnom} \cdot K_S} \cdot \left[\frac{1}{10} \cdot P_{Gnom} \cdot (u_P^* + K_S \cdot u_f^*) - \tilde{P}_G \right]$$

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

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

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;

RI_E – regulatorul curentului de excitație;

RU_E – regulatorul tensiunii de excitație;

M_{ij} , M_i – traductoare de măsură plus adaptoare de tensiune, respectiv de curent;

c_{IE} – comanda curentului de excitație;

c_{UE} – comanda tensiunii de excitație.

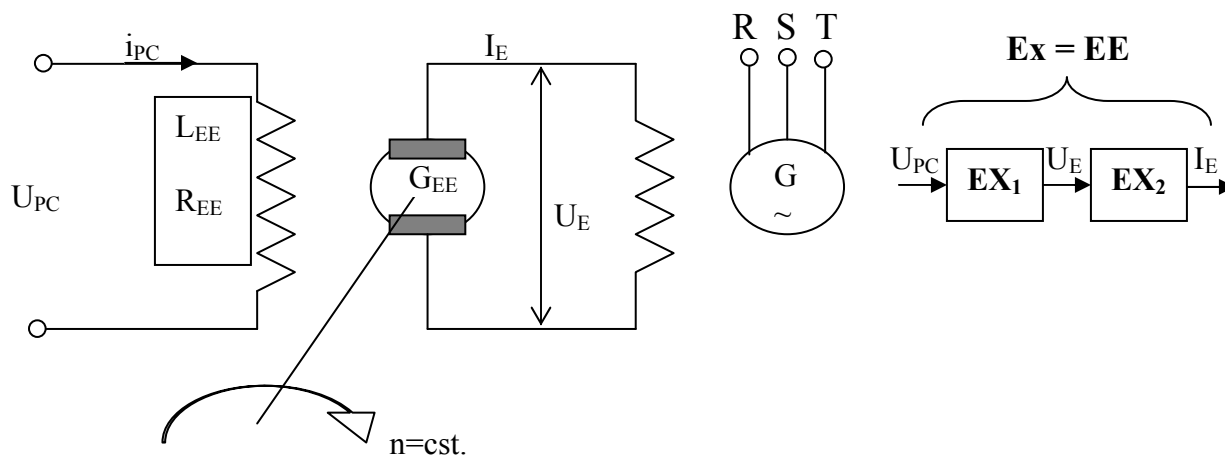
Schema reprezintă o cascadă de trei regulatoare în raport cu semnalele U_E , I_E și U_G . Abaterea tensiunii la generator, a_{uG} este diferența dintre tensiunea de referință u_G^* și tensiunea de reacție $u_{Gr}=K_{UG} \cdot U_G - K_{IG} \cdot I_G$, unde K_{UG} și K_{IG} sunt coeficienții de ponderare a reacției după tensiune, respectiv după curent. Abaterea a_{UG} se aplică regulatorului tensiunii la bornele generatorului, rezultând semnalul de comandă 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, RI_E . Abaterea dintre c_{UE} și tensiunea proporțională cu tensiunea de excitație u_{UEx} , se aplică regulatorului tensiunii de excitație, RU_E . 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 $S_{Gnom} = \underline{\hspace{2cm}} [MVA]$ Factorul de putere $\cos\phi = 0.825$ Tensiunea la bornele generatorului $U_{Gnom} = \underline{\hspace{2cm}} [KV]$

$$I_{Gnom} = \frac{S_{Gnom}}{\sqrt{3} \cdot U_{Gnom}} = \underline{\hspace{2cm}} [kA] = \underline{\hspace{2cm}} [A]$$

$$P_{Gnom} = S_G \cdot \cos\phi = \underline{\hspace{2cm}} \cdot 0.825 = \underline{\hspace{2cm}} [MW]$$

$$Q_{Gnom} = \sqrt{S_{Gnom}^2 - P_{Gnom}^2} = \sqrt{\underline{\hspace{2cm}} - \underline{\hspace{2cm}}} = \underline{\hspace{2cm}} [MVar]$$

2. Excitatricea EE

$$P_{Enom} \cong 0.25\% \cdot P_{Gnom} = 0.0025 \cdot \underline{\hspace{2cm}} = \underline{\hspace{2cm}} [MW]$$

$$U_{Enom} = \underline{\hspace{2cm}} [V]$$

$$I_{Enom} = \frac{P_{Enom} [MW]}{U_{Enom} [V]} = \frac{\underline{\hspace{2cm}}}{\underline{\hspace{2cm}}} = \underline{\hspace{2cm}} [A]$$

3. Puntea comandată PC

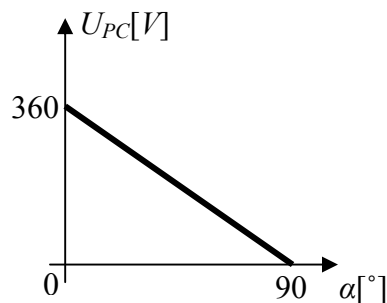
Alimentează înfășurarea de excitație a excitatricei cu tensiunea U_{PC} .

Curentul i_{PC} și puterea P_{PC} sunt date de:

$$P_{PCnom} \cong 1\% \cdot P_{Enom} = 0.01 \cdot \underline{\hspace{2cm}} = \underline{\hspace{2cm}} [kW]$$

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

$$i_{PCnom} = \frac{P_{PCnom} [W]}{U_{PCnom} [V]} = \frac{\underline{\hspace{2cm}}}{360} = \underline{\hspace{2cm}} [A]$$

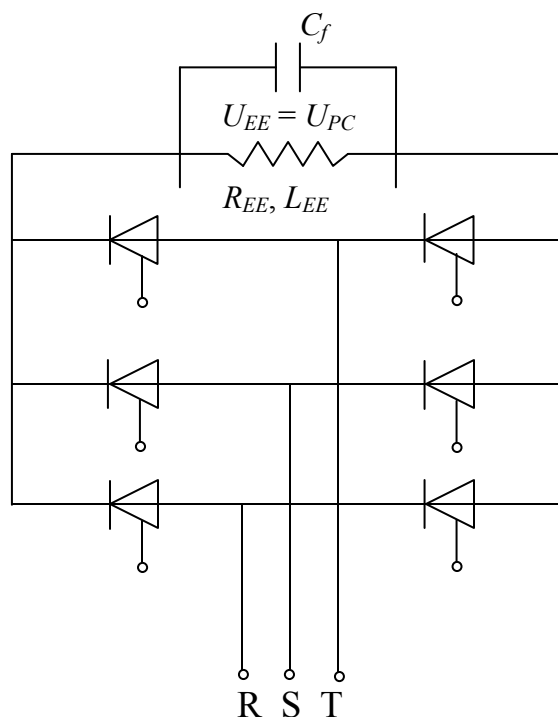


$$\text{Se consideră că: } U_{PC} = 360 - \frac{360}{90} \cdot \alpha \cdot$$

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

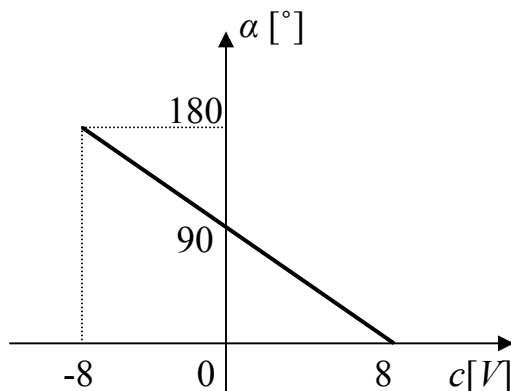
Schema redresorului trifazat utilizat, este:



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

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 notat cu „c” se încadrează între $-8V$ și $8V$.

Se asigură condiția:

$$c = 0 \Rightarrow \alpha = 90^\circ$$

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

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

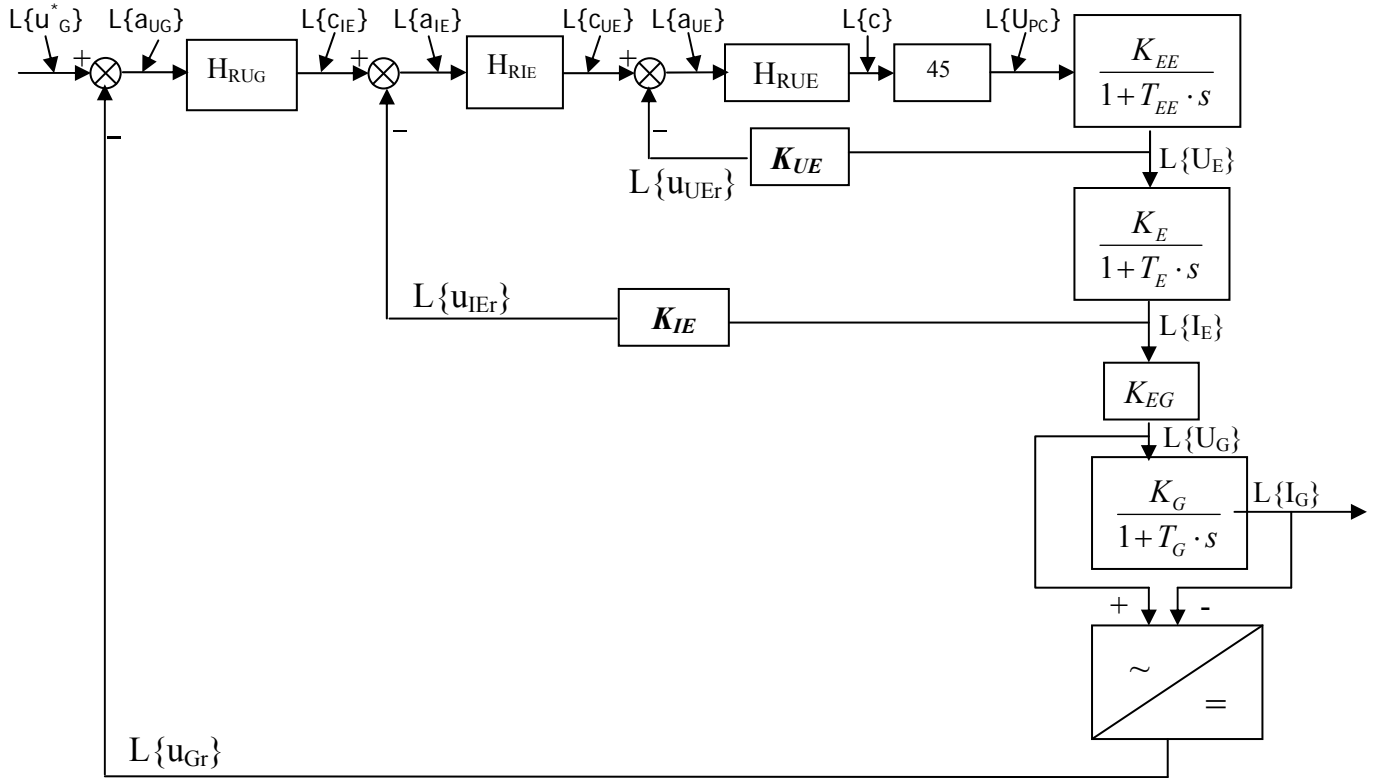
În general :

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

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

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

Ținând cont de relația anterioară, schema de reglare se poate redesena, ca și în figura următoare:



b) Calculul funcțiilor de transfer ale elementelor componente

1. Funcția de transfer a excitației excitatricei EE

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

$$\begin{cases} U_{PC} = L_{EE} \cdot \frac{di_{PC}}{dt} + R_{EE} \cdot i_{PC} \\ U_E = K_{EE} \cdot i_{PC} \end{cases}$$

Se aplică transformata Laplace pentru condiții inițiale nule:

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

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

$$K_{EE} = \frac{U_{Enom}[V]}{U_{PCnom}[V]} = \frac{\text{_____}[V]}{360[V]} = \text{_____} \Rightarrow H_{EE}(s) = \frac{\text{_____}}{1 + \text{_____} \cdot s}$$

2. Funcția de transfer a excitației generatorului

$$H_E(s) = \frac{L\{I_E\}}{L\{U_E\}} = \frac{K_E}{1 + T_E \cdot s}$$

$$K_E = \frac{i_{Enom}[A]}{U_{Enom}[V]} = \frac{[A]}{[V]} = \left[\frac{A}{V} \right]$$

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

3. Funcția de transfer a generatorului

$$H_{EG}(s) = \frac{L\{I_G\}}{L\{U_G\}} = \frac{K_G}{1 + T_G \cdot s}$$

$$K_{EG} = \frac{U_{Gnom}[V]}{I_{Enom}[A]} = \frac{[V]}{[A]} = \left[\frac{V}{A} \right]$$

$$K_G = \frac{I_{Gnom}[A]}{U_{Gnom}[V]} = \frac{[A]}{[V]} = \left[\frac{A}{V} \right]$$

$$T_G = [sec]$$

$$\Rightarrow H_G(s) = \frac{[A]}{1 + [] \cdot s}$$

4. Funcția de transfer a reacției de compundare

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

$$\begin{cases} u_{Gr} = K_{UG} \cdot U_G \\ u_G^* = 10[V] \Rightarrow K_{UG} = \frac{10}{U_{Gnom}} = [] \\ u_{Gr} = u_G^* \end{cases}$$

- K_{IG} – se alege în ipoteza unei ponderi impuse de 5 % a buclei de compundare în raport cu bucla principală în raport cu tensiunea la bornele generatorului:

$$K_{IG} = \frac{0.5[V]}{I_{Gnom}[A]} = \frac{0.5[V]}{[A]} = \left[\frac{V}{A} \right]$$

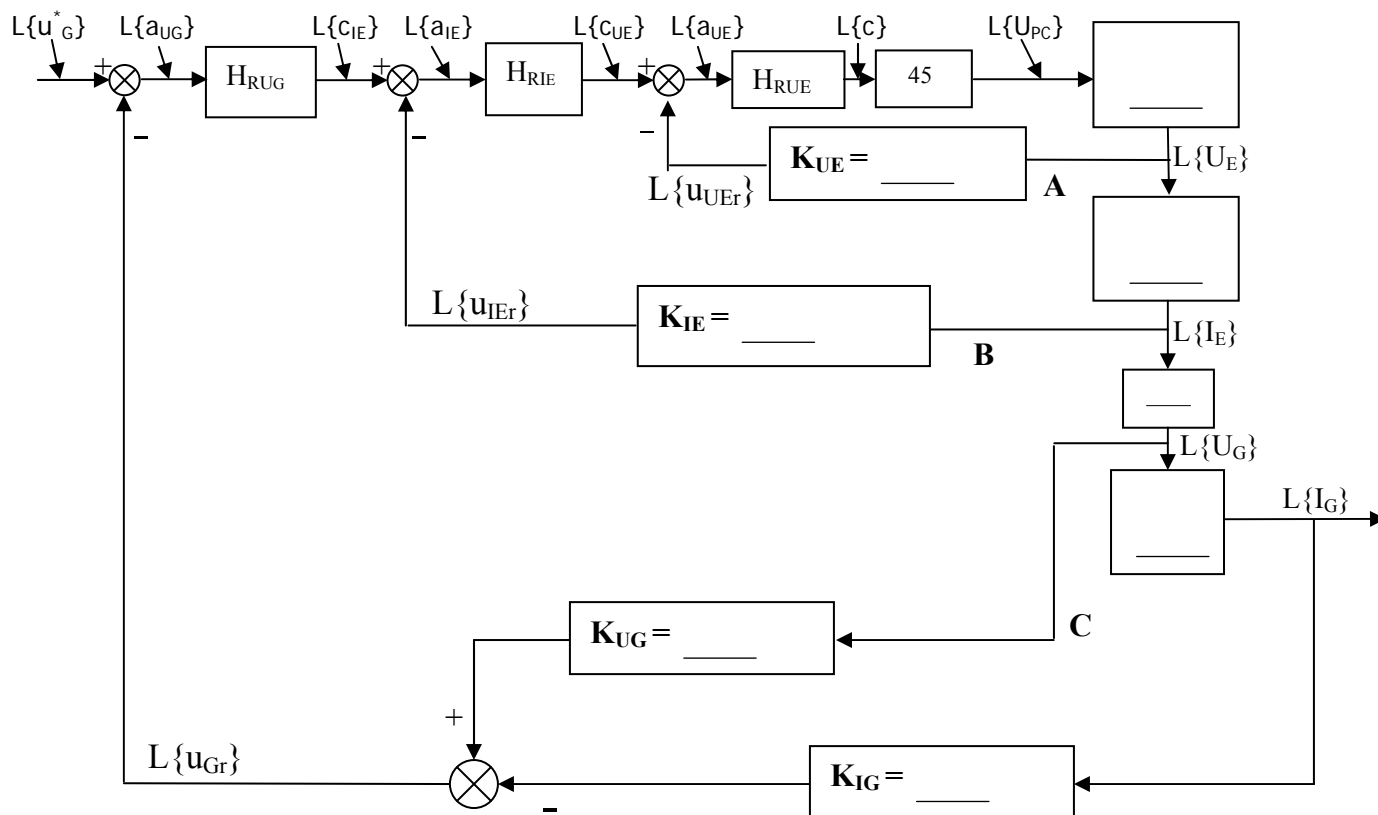
- K_{IE} – se alege în ipoteza următoare:

$$U_{IEr} = 10[V]; \quad si \quad K_{IE} = \frac{U_{IEr}[V]}{I_{Enom}[V]} = \frac{10[V]}{[V]} = \left[\frac{V}{A} \right]$$

- K_{UE} – se alege în ipoteza următoare:

$$U_{UEr} = 10[V]; \quad si \quad K_{UE} = \frac{U_{UEr}[V]}{U_{Enom}[V]} = \frac{10[V]}{[V]} = []$$

Rezultă schema bloc din figura de mai jos:



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

a) Bucla internă A

$$H'_{Ex}(s) = K_{CCG+PC} \cdot \frac{K_{EE}}{1 + T_{EE} \cdot s} \cdot K_{UE} = \underline{\hspace{2cm}}$$

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

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

$$H_{RUE}(s) = \frac{\quad}{\quad} \cong \frac{\quad}{\quad} \cdot (1 + \frac{\quad}{\quad})$$

un regulator PI având: $\begin{cases} V_{RUE} \cong \underline{\hspace{2cm}} \\ T_{iRUE} \cong \underline{\hspace{2cm}} [sec] \end{cases}$

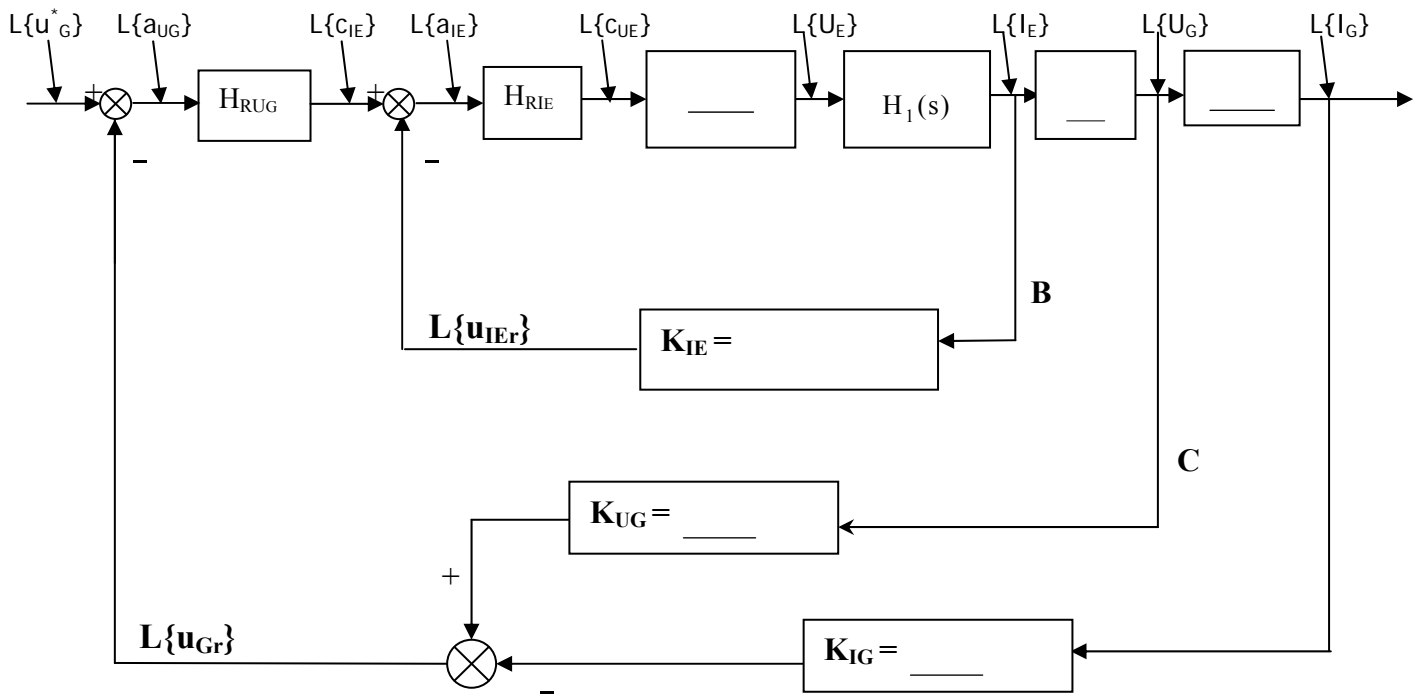
b) Bucla internă B

Funcția de transfer a buclei interne (A) este:

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

$$H_1(s) = \underline{\hspace{2cm}} = \underline{\hspace{2cm}}$$

$$H_1(s) = \underline{\hspace{2cm}}$$



$$H''_{Ex}(s) = H_1(s) \cdot \frac{K_E}{1 + T_E \cdot s} \cdot K_{IE} = \underline{\hspace{2cm}} \cdot \underline{\hspace{2cm}} \cdot \underline{\hspace{2cm}} \cong \underline{\hspace{2cm}}$$

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

$$H_{ExB}(s) = \underline{\hspace{2cm}}$$

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

$$H_{RIE}(s) = \frac{1}{0.02s(1 + 0.01s)} \cdot \underline{\hspace{2cm}}$$

$$H_{RIE}(s) = \underline{\hspace{2cm}} = \frac{1}{\underline{\hspace{1cm}} \cdot s} + \underline{\hspace{1cm}} + \underline{\hspace{1cm}} \cdot s$$

$$H_{RIE}(s) = \underline{\hspace{1cm}} \cdot \left(1 + \frac{1}{\underline{\hspace{1cm}} \cdot s} + \underline{\hspace{1cm}} \cdot s \right)$$

ceea ce reprezintă un regulator PID cu următorii parametri:

$$\begin{cases} V_{RIE} = \underline{\hspace{2cm}} \\ T_{iRIE} = \underline{\hspace{2cm}} [sec] \cong \underline{\hspace{2cm}} [sec] \\ T_{dRIE} = \underline{\hspace{2cm}} [sec] \cong \underline{\hspace{2cm}} [sec] \end{cases}$$

c) Bucă internă C

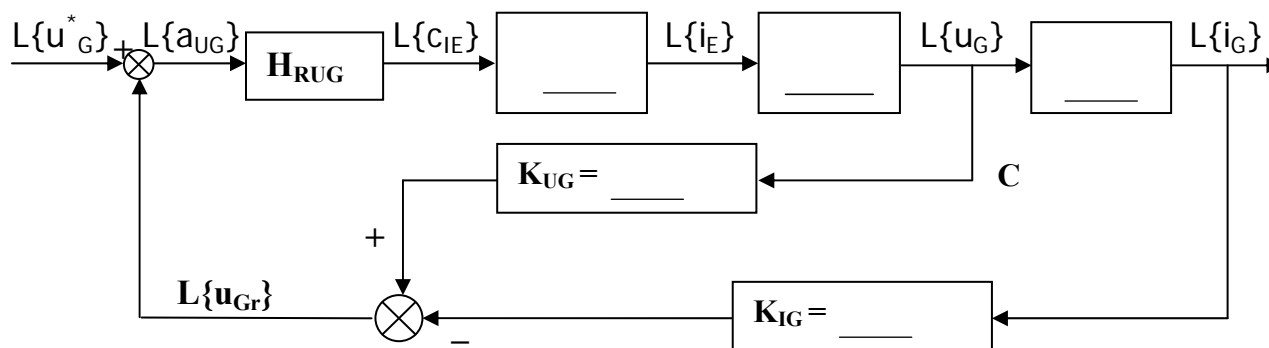
Funcția de transfer a buclei interne B, $H_2(s)$, din schema bloc simplificată din figura anterioară, este:

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

$$H_2(s) = \frac{\underline{\hspace{2cm}} \cdot \underline{\hspace{2cm}} \cdot \underline{\hspace{2cm}}}{1 + \underline{\hspace{2cm}} \cdot \underline{\hspace{2cm}} \cdot \underline{\hspace{2cm}} \cdot \underline{\hspace{2cm}}} =$$

$$H_2(s) = \underline{\hspace{2cm}}$$

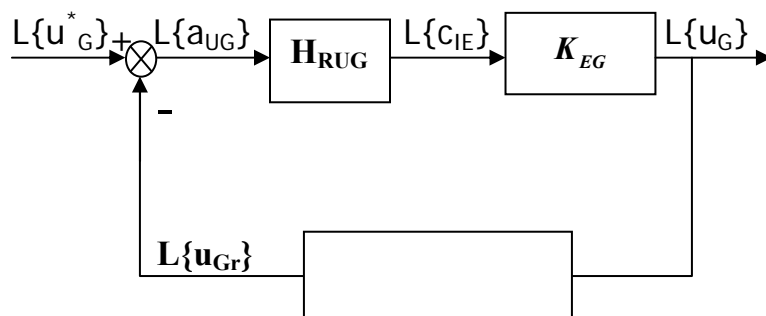
Ținând cont de $H_2(s)$, schema bloc va avea următoarea formă:



Se transfigurează schema:

$$H_{reactie}(s) = \underline{\hspace{2cm}} = \underline{\hspace{2cm}}$$

$$H_{direct}(s) = \underline{\hspace{2cm}} \cdot \underline{\hspace{2cm}} = \underline{\hspace{2cm}}$$



$$H_{Ex}(s) = \frac{\underline{\hspace{2cm}}}{\underline{\hspace{2cm}}} \cdot \frac{1}{(1 + T_{\Sigma} \cdot s)} \text{ cu } T_{\Sigma} = 0.01[\text{sec}]$$

$$\Rightarrow H_{Ex}(s) = \underline{\hspace{2cm}}$$

$$H_{RU_G}(s) = \frac{L\{c_{IE}\}}{L\{a_{UG}\}} = \frac{1}{2 \cdot T_{\Sigma} \cdot s \cdot (T_{\Sigma} \cdot s + 1)} \cdot \frac{1}{H_{Ex}(s)} = \underline{\hspace{2cm}} \Rightarrow$$

1. Dacă se consideră $\underline{\hspace{1cm}} \approx \underline{\hspace{1cm}} \Rightarrow$ un regulator de tip PI :

$$H_{RU_G}(s) = \underline{\hspace{1cm}} \cong \underline{\hspace{1cm}} \cdot \left(1 + \frac{1}{1 + \underline{\hspace{1cm}} \cdot s}\right)$$

$$\begin{cases} V_{RRUG} = \underline{\hspace{1cm}} \\ T_{IRUG} = \underline{\hspace{1cm}}[\text{sec}] \end{cases}$$

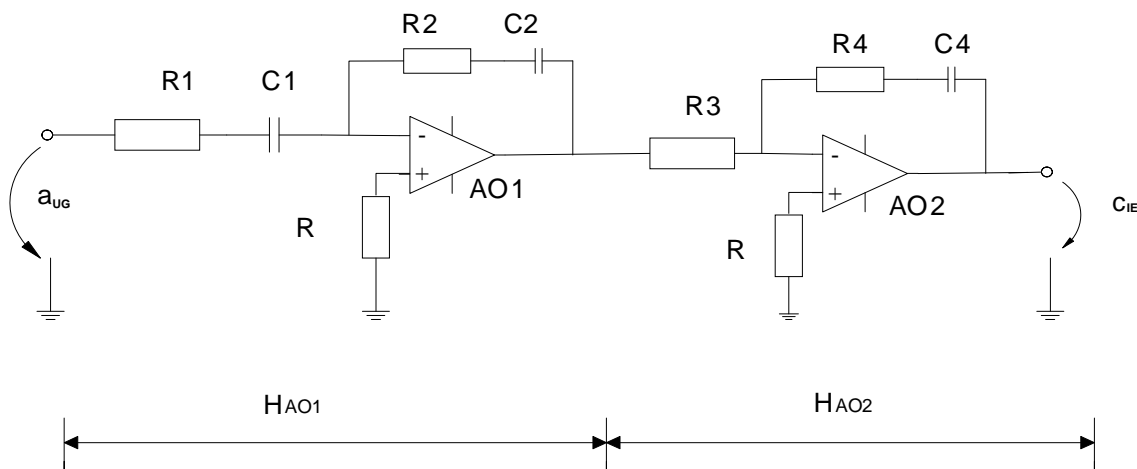
2. Altfel, rezultă un regulator PID cu filtru de ordinul I :

$$H_{RU_G}(s) = \underline{\hspace{1cm}} \cdot \frac{1 + \underline{\hspace{1cm}} \cdot s + \underline{\hspace{1cm}} \cdot s^2}{s \cdot (1 + \underline{\hspace{1cm}} \cdot s)} = \underline{\hspace{2cm}} .$$

$$\Rightarrow \begin{cases} V_{RRUG} = \underline{\hspace{1cm}} \\ T_{IRUG} = \underline{\hspace{1cm}}[\text{sec}] \\ T_{DRUG} = \underline{\hspace{1cm}}[\text{sec}] \\ T_N = \underline{\hspace{1cm}}[\text{sec}] \end{cases}$$

Capitolul 8. Modelarea analogică a reguletoarelor

Modelarea regulatorului RU_G se bazează pe schema din figura următoare:



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

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

Prin identificare \Rightarrow

$$T_1 = R_1 \cdot C_1 = \text{---}[sec]; \text{ se alege } R_1 = \text{---}K\Omega \Rightarrow C_1 = \text{---} = \text{---}\mu F$$

[illegible]

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

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.

Capitolul 9. Exemplu de simulare a sistemelor de reglare a mărimilor electrice aferele unei termocentrale [4].

În capitolele anterioare este realizată descrierea funcționării proceselor tehnologice și a principiilor care stau la baza proiectării sistemelor de reglare automată din cadrul termocentralei, dar și partea de calcul efectiv a componentelor acestora. Pornind de la rezultatele obținute, se dorește simularea sistemului de reglare a puterii active și a frecvenței, respectiv a sistemului de reglare a tensiunii la bornele generatorului.

Datele preliminare de la care s-a pornit proiectarea într-o formă simplificată a principalelor circuite de reglare au fost:

- puterea grupului: $P = 360 \text{ MW}$;
- presiunea aburului viu : $p = 126 \text{ bar}$;
- consumul specific: $1/\eta_0 = 2335 \text{ Mcal/MWh}$;
- entalpia aburului viu : $i_2 = 818 \text{ Mcal/to}$.

Simulările se vor realiza presupunând că pornirea sistemului termoelectric este ideală fiind valabile două ipoteze simplificatoare:

1. Se neglijează inerțiile electro-mecanice din componența termocentralei și a sistemului electro-energetic conectat.
2. Se neglijează toate problemele generate de pornirea în sarcină a instalației.

De asemenea, o precizare importantă este aceea că problema va fi abordată din punct de vedere al reglării automate, unele limitări fizice nefiind considerate în expunere. Se insistă asupra detaliilor de programare și a interpretării rezultatelor obținute.

a) Simularea sistemului de reglare a puterii active și a frecvenței

Schema bloc a sistemului de reglare a puterii active și a frecvenței este prezentată în figura 9.1.

Notațiile suplimentare care au fost introduse sunt următoarele:

- **a** – semnalul de abatere prelucrat de regulatorul puterii active **R_p**;
- **c_{qabv}** – semnalul de comandă a debitului de abur viu;
- **m_{qabv}** – semnalul de execuție a debitului de abur viu (deplasarea unghiulară pe care o dezvoltă axul cu came acționat hidraulic și care prin rotire deschide progresiv supapele de admisie parțială a aburului;
- **f₁** – frecvența care reprezintă semnalul de ieșire al sistemului energetic;
- **p_r** – perturbația în frecvență.

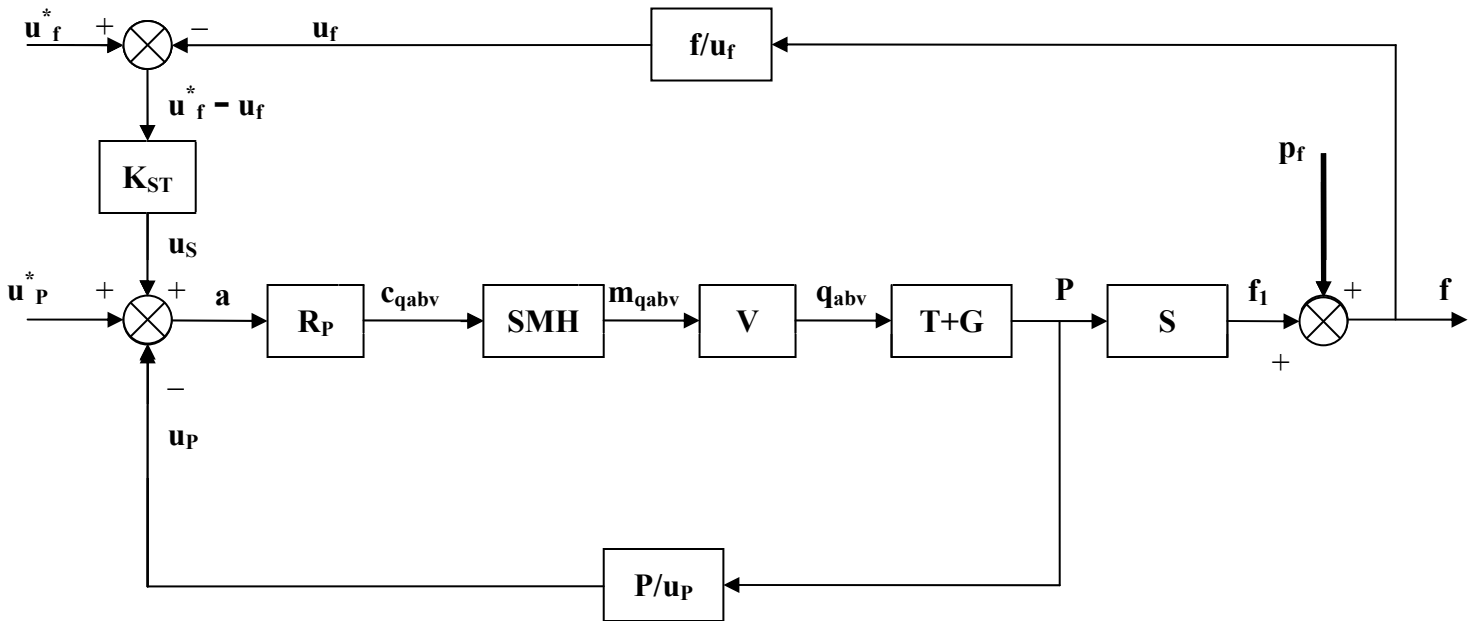


Figura 9.1. Schema bloc a sistemului de reglare a puterii active și a frecvenței

Funcționarea în regim dinamic a tuturor elementelor schemei din figura 9.1 se exprimă prin utilizarea funcțiilor de transfer. În procedura de modelare turbina și generatorul au fost considerate ca un ansamblu. După efectuarea calculelor, a rezultat:

$$H_{SMH}(s) = \frac{L\{m_{abv}(t)\}}{L\{c_{qabv}(t)\}} = K_{SMH} + \frac{1}{T_{SMH} \cdot s} = 0.01 + \frac{1}{20 \cdot s}, \quad (9.1)$$

unde constanta de proporționalitate K_{SMH} este exprimată în [m/V], iar constanta de timp T_{SMH} este exprimată în secunde;

$$H_V(s) = \frac{L\{q_{abv}(t)\}}{L\{m_{qabv}(t)\}} = K_V = 10667.51, \quad (9.2)$$

unde constanta de proporționalitate K_V este exprimată în [to/(m·h)];

$$H_{T+G}(s) = \frac{L\{P(t)\}}{L\{q_{abv}(t)\}} = \frac{K_{T+G}}{1 + T_{T+G} \cdot s} = \frac{0.337}{1 + 10 \cdot s}, \quad (9.3)$$

unde constanta de proporționalitate K_{T+G} este exprimată în [MW·h/to], iar constanta de timp T_{T+G} este exprimată în secunde;

$$H_S(s) = \frac{L\{f(t)\}}{L\{P(t)\}} = \frac{K_S}{(1+T_{1S} \cdot s) \cdot (1+T_{2S} \cdot s)} = \frac{0.139}{(1+s) \cdot (1+2 \cdot s)}, \quad (9.4)$$

unde constanta de proporționalitate K_S este exprimată în [Hz/MW], iar constantele de timp T_{1S} și T_{2S} sunt exprimate în secunde; această relație reprezintă o simplificare, dependența frecvenței de putere nefiind liniară;

$$H_{P/u_p}(s) = \frac{L\{u_P(t)\}}{L\{P(t)\}} = K_{P/u_p} = 0.027, \quad (9.5)$$

unde constanta de proporționalitate K_{P/u_p} este exprimată în [V/MW];

$$H_{f/u_f}(s) = \frac{L\{u_f(t)\}}{L\{f(t)\}} = K_{f/u_f} = 0.2, \quad (9.6)$$

unde constanta de proporționalitate K_{f/u_f} este exprimată în [V/Hz].

Prin utilizarea relațiilor (9.1), (9.2), (9.3), (9.5) și prin aproximarea sumei constantelor de timp, principal necompensabile (foarte mici), la valoarea $T_\Sigma = 0.01s$ rezultă funcția de transfer a părții fixate a procesului aferent buclei de reglare a puterii active, iar apoi prin aplicarea criteriului modulului rezultă funcția de transfer a regulatorului puterii active:

$$H_{R_p}(s) = \frac{L\{c_{qabv}(t)\}}{L\{a(t)\}} = K_R \cdot \frac{1+T_D \cdot s}{1+T_f \cdot s} = 10 \cdot \frac{1+10 \cdot s}{1+0.2 \cdot s}, \quad (9.7)$$

funcție de transfer ce corespunde unui regulator de tip PD cu filtru de ordinul 1. În relația (9.7) constanta de timp de derivare a regulatorului T_D și constanta de timp a filtrului T_f sunt exprimate în secunde, iar constanta de proporționalitate a regulatorului K_R este adimensională.

Pentru calculul coeficientului de statism s-a utilizat calculul funcției de transfer echivalente pentru bucla de reglare a puterii active și s-a impus procentul rezervei de putere reglantă a frecvenței la valoarea de 10% din puterea activă nominală a grupului. Dacă se folosește notația $\mathbf{a}_2 = \mathbf{u}_f^* - \mathbf{u}_f$, funcția de transfer a coeficientului de statism este:

$$H_{ST}(s) = \frac{L\{u_S(t)\}}{L\{a_2(t)\}} = K_{ST} = 125, \quad (9.8)$$

unde constanta de statism K_{ST} este adimensională.

Dacă perturbația în frecvență se consideră de tip treaptă, schema de reglare a puterii active și a frecvenței, implementată în Simulink, este prezentată în figura 9.2. Au fost introduse elemente de vizualizare și pentru câteva din variabilele intermediare.

Datorită faptului că, schema de reglare cuprinde componente a căror constante de proporționalitate au valori foarte mari, pentru ca simularea să ofere rezultate corecte este foarte importantă utilizarea mai multor zecimale în cazul tuturor constantelor de proporționalitate din schemă. Simulările au fost realizate setând semnalele de referință la valorile $u_p^* = 10V$, respectiv $u_f^* = 10V$, valori care sunt corespunzătoare puterii active nominale ($P = 360 MW$), respectiv frecvenței nominale ($f = 50 Hz$).

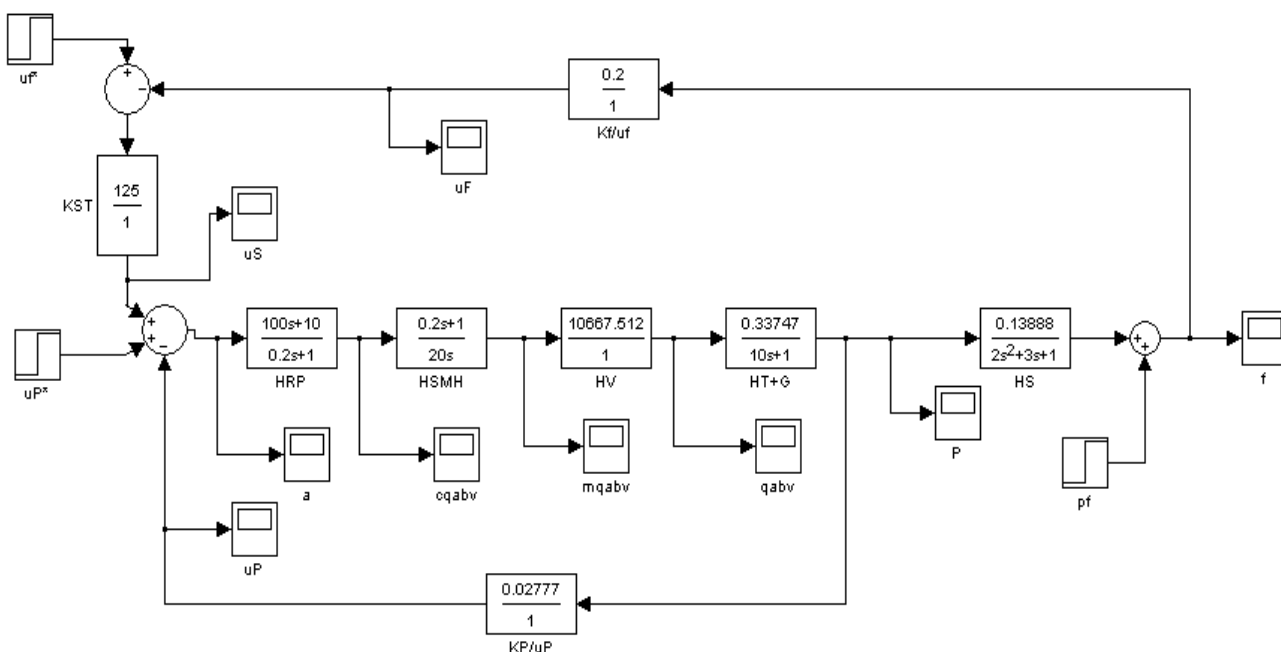


Figura 9.2. Schema de reglare a puterii active și a frecvenței

Răspunsul sistemului din figura 9.2 (evoluția semnalului de ieșire (frecvența)) dacă perturbația în frecvență de tip treaptă are valoarea $p_f = -5 Hz$ (semnul minus semnifică o scădere a frecvenței, nu frecvență negativă) și apare după 150 s de la începerea simulării se prezintă în figura 9.3.

Variația semnalului de comandă generat de regulator, corespunzător cazului tratat, este redată în figura 9.4.

Cele două figuri 9.3 și 9.4 relevă faptul că sistemul nu poate fi utilizat prin aplicarea unui semnal de referință de tip treaptă, chiar dacă valoarea frecvenței se stabilizează la 50 Hz ($a_{stp} = 0$) și efectul perturbației este rejectat. Șocul este foarte mare la pornirea sistemului, iar răspunsul este foarte oscilant cu variații extrem (nepermis) de mari în acest context. De asemenea semnalul de comandă prezintă chiar la începutul simulării o valoare foarte mare (proporțională cu 10^5) neacceptată de servomotorul hidraulic. O problemă o constituie și

faptul că valorile negative ale semnalului de comandă implică valori negative ale semnalului de ieșire din servomotorul hidraulic, respectiv ale semnalului de ieșire din ventil (debitul de abur viu q_{abv}), valori care nu au semnificație fizică.

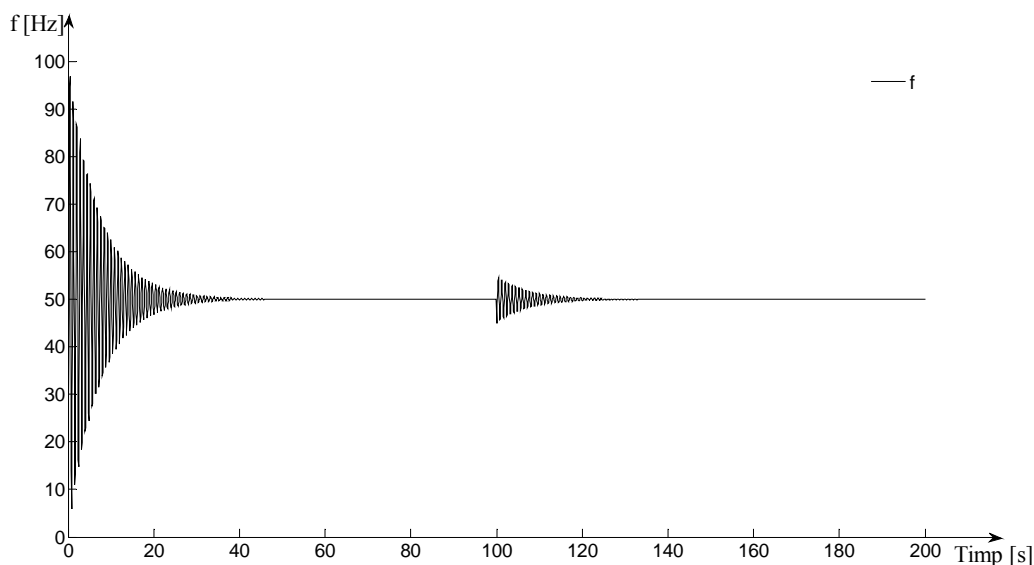


Figura 9.3. Evoluția frecvenței dacă p_f este de tip treaptă

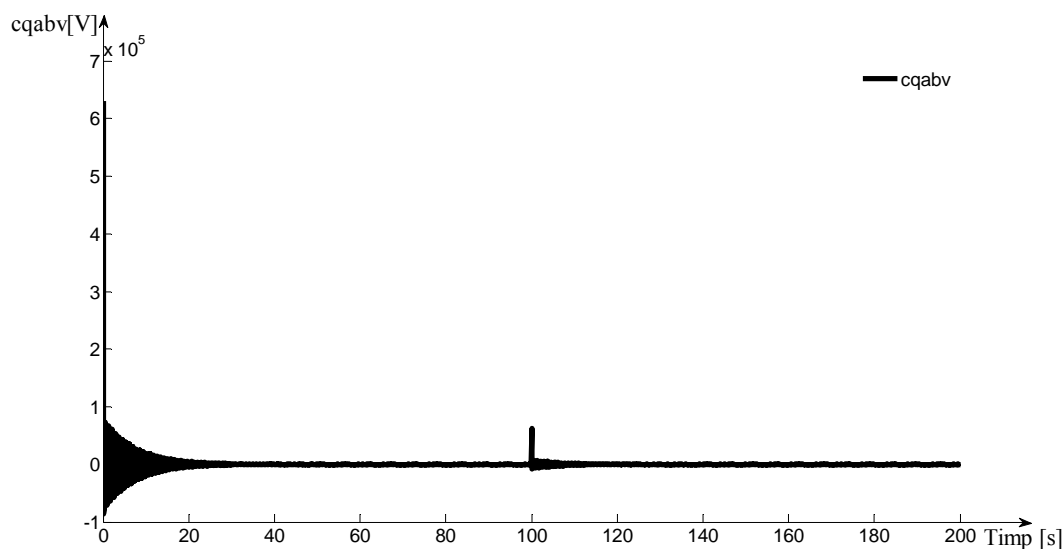


Figura 9.4. Variația semnalului de comandă dacă p_f este de tip treaptă

Răspunsul sistemului rămâne puternic oscilant și imediat după apariția perturbației când regulatorul forțează rejectarea efectului acesteia (prin intermediul unui semnal de comandă de valoare foarte mare). Aceste aspecte negative se datorează faptului că, saltul treptei de referință în ambele cazuri este brusc (corespunzător unei perioade de eșantionare), iar componenta derivativă amplifică foarte mult abaterea rezultată. În realitate, o instalație de

anvergura unui sistem de acest tip este pornită într-o perioadă de timp mult mai îndelungată (aproximativ șapte-zece ore).

O influență negativă asupra rezultatelor simulării o constituie și valoarea ridicată a perturbației (în general perturbația în frecvență nu are valori mai mari de ± 0.2 Hz.). Această valoare teoretică a fost utilizată pentru a fi mai vizibile performanțele sistemului de reglare automată și pentru o mai bună înțelegere a fenomenelor. Asemănător ca și în cazul referințelor, efectul perturbației nu apare instantaneu.

Pentru o apropiere de realitatea este necesară „întârzierea” semnalelor treaptă de referință și a semnalului treaptă de perturbație. Astfel între aceste semnale și sumatoarele în care sunt introduse, se intercalează în toate cele trei cazuri din schema din figura 9.2 elemente de „întârziere” a căror funcție de transfer a fost considerată de ordinul II cu doi poli reali negativi și cu valoarea constantei de proporționalitate 1 (valoarea semnalelor rămâne nealterată în regim staționar). Pentru „întârzierea” semnalelor de referință s-a utilizat funcția

de transfer $H_{REF}(s) = \frac{1}{(1+10 \cdot s) \cdot (1+20 \cdot s)}$, iar pentru „întârzierea” semnalului de perturbație

s-a utilizat funcția de transfer $H_{PER}(s) = \frac{1}{(1+5 \cdot s) \cdot (1+10 \cdot s)}$. Prin această procedură

semnalul de referință devine echivalent cu răspunsul unui sistem de ordinul II la semnal treaptă.

În figurile 9.5 și 9.6 se prezintă răspunsul sistemului, respectiv evoluția semnalului de comandă corespunzător dacă perturbația de tip treaptă (-5 Hz) apare la 150 s de la începutul simulării. În această simulare s-au utilizat funcțiile de „întârziere” anterior prezentate.

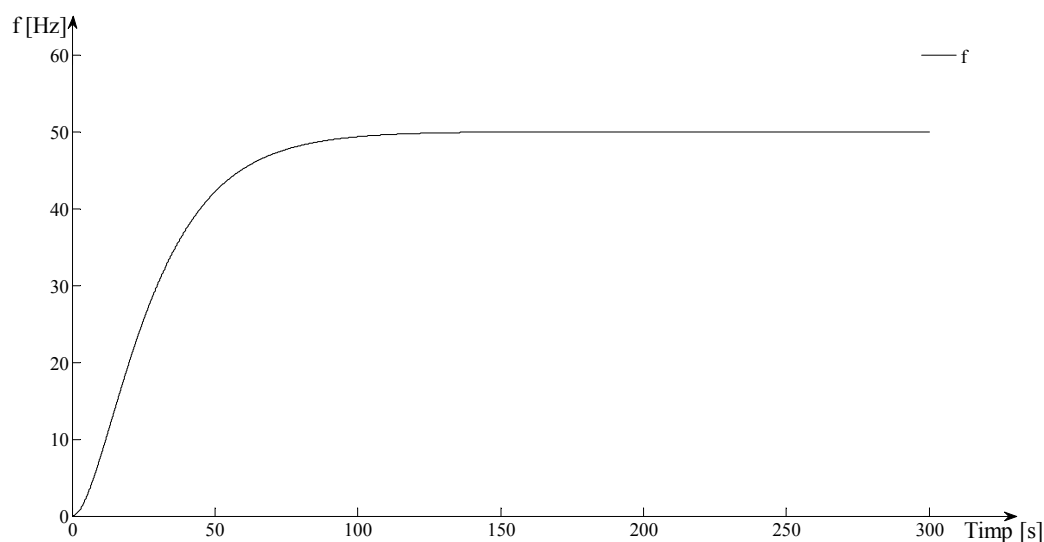


Figura 9.5. Răspunsul sistemului dacă semnalele de referință, respectiv semnalul de perturbație au fost „întârziate”

Din figura 9.5 rezultă că abaterea staționară la poziție este 0 ($a_{stp} = 0$) atât înainte de apariția perturbației, cât și după rejectarea totală a efectului acesteia. Răspunsul, deși mai lent

decât în cazul figurii 9.3 nu mai prezintă oscilații în prima parte a simulării, ceea ce implică un avantaj major.

Efectul perturbației este rejectat fără ca acesta să se propage semnificativ la ieșirea sistemului (în figura 9.5 practic nu se poate sesiza cu ochiul liber o variație a răspunsului sistemului după 150 s de la începerea simulării), fapt ce atestă eficiența sistemului de reglare automată.

Domeniul de variație a semnalului de comandă a fost mult redus (figura 9.6), atât la pornirea sistemului, cât și după apariția perturbației, dar problema oscilațiilor nu a fost rezolvată.

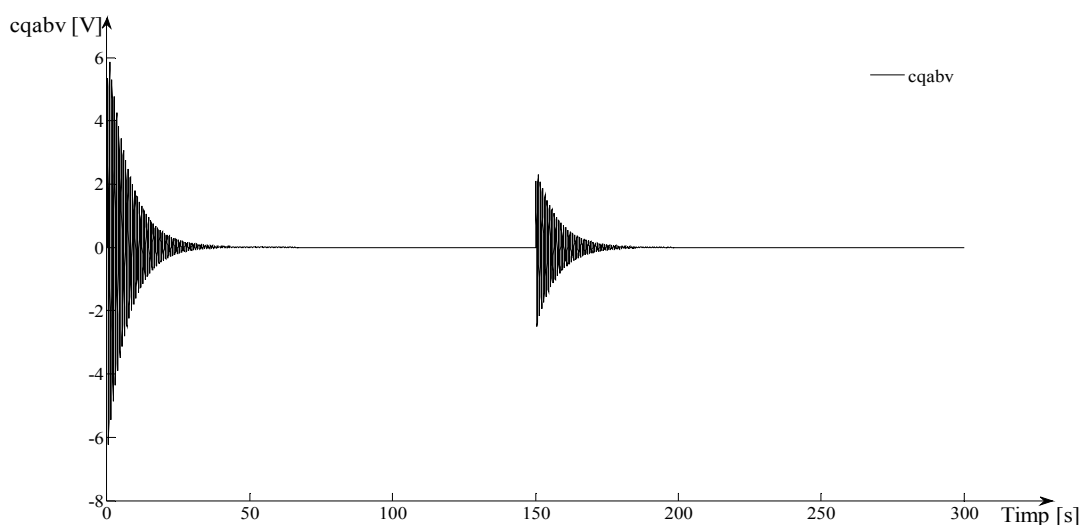


Figura 9.6. Variația semnalului de comandă dacă semnalele de referință, respectiv semnalul de perturbație au fost „întârziate”

O posibilitate pentru îmbunătățirea rezultatelor este ajustarea valorii constantei de timp a filtrului regulatorului.

Dacă se consideră $T_{f1} = 0.09$ s și aceleași condiții ca și pentru simulările din cazul figurilor 9.5 și 9.6, răspunsul sistemului diferă nesemnificativ față de răspunsul din cazul precedent (figura 9.5), dar forma de variație a semnalului de comandă se îmbunătățește, așa cum rezultă din figura 9.7.

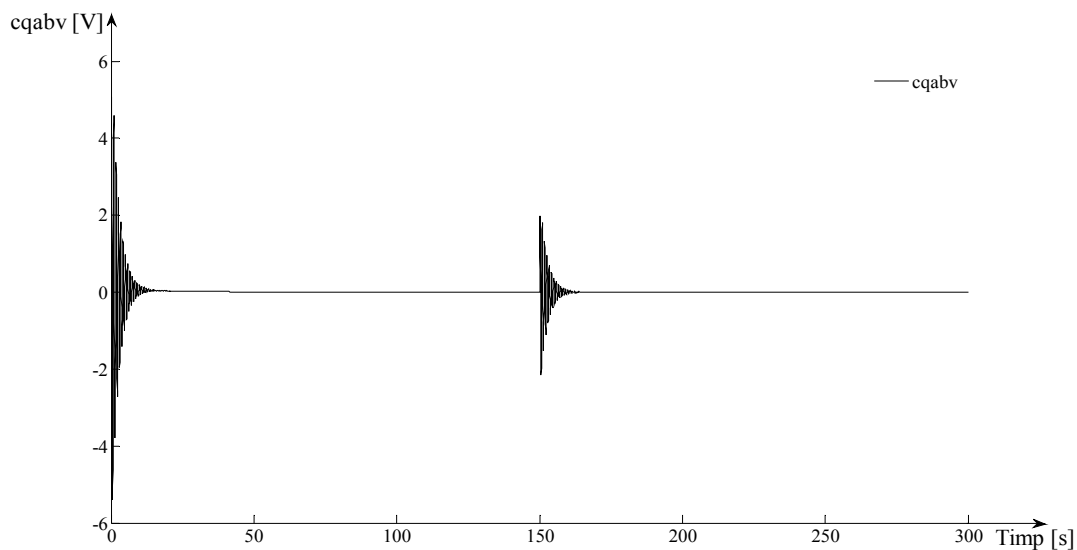


Figura 9.7. Variația semnalului de comandă dacă se modifică filtrul regulatorului

Domeniul de variație al semnalului de comandă este mai mic decât în cazul figurii 9.6, iar perioada de timp în care se manifestă oscilația este mult mai scurtă.

În figurile 9.8, respectiv 9.9 sunt redată evoluția semnalului de ieșire din servomotorul hidraulic (SMH), respectiv răspunsul buclei de reglare a puterii active, pentru ultimul caz studiat (cazul corespunzător condițiilor de simulare din figura 9.7) .

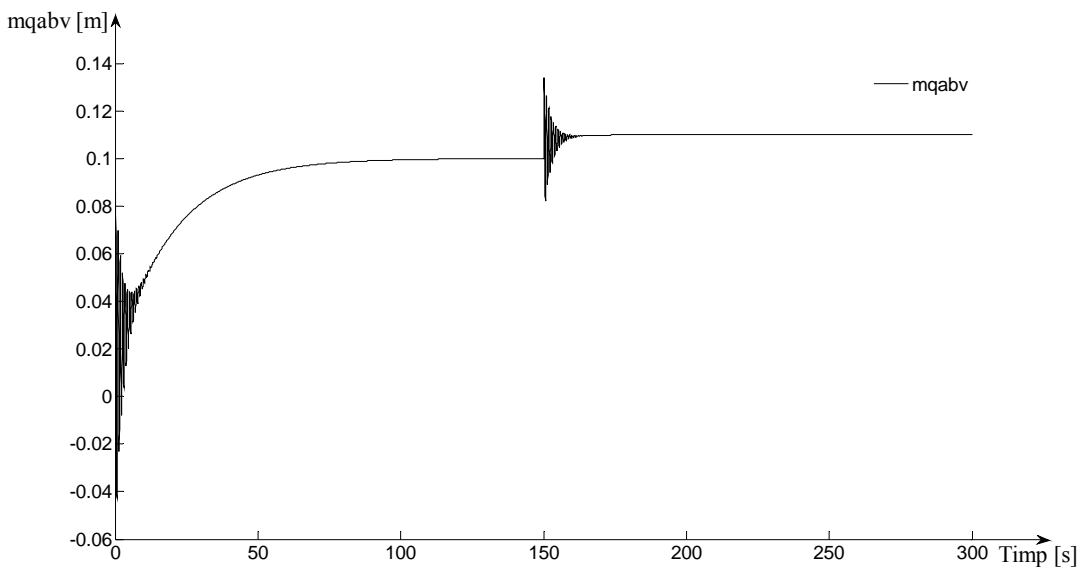


Figura 9.8. Variația semnalului de ieșire din SMH dacă se modifică filtrul regulatorului



Figura 9.9. Puterea activă livrată în sistem

Semnalul de ieșire din **SMH** este oscilant atât la începutul simulării, cât și după apariția perturbației. De asemenea, se poate observa că imediat după începerea simulării acest semnal prezintă valori negative, ceea ce nu corespunde cu realitatea ($m_{qabv} \in [0;0.1]m$), iar după apariția perturbației valoarea semnalului depășește limita superioară impusă (0.1 m). Problema limitei superioare va fi foarte mult simplificată în cazul scăderii semnificative a valorii perturbației în vederea obținerii unei situații realiste.

Pentru menținerea între limitele impuse a variabilelor intermediare și pentru evitarea evoluțiilor oscilante ale acestora, trebuie respectate următoarele indicații:

1. Trebuie mărite constantele de timp ale funcțiilor de „întârziere” la valori realiste.
2. Este recomandată ajustarea valorii constantei de timp a filtrului regulatorului astfel încât să fie influențate în sens pozitiv valorile semnalelor intermediare.
3. Este necesară utilizarea elementelor de saturație, acolo unde este cazul (de exemplu în cazul semnalului de ieșire a servomotorului hidraulic).
4. Este necesară utilizarea unei valori corespunzătoare pentru perturbația în frecvență.

În figura 9.9, în prima etapă (înainte de apariția perturbației) răspunsul sistemului se stabilizează la valoarea de 360 MW (puterea activă nominală), iar după apariția perturbației în frecvență, valoarea răspunsului crește până la un nou punct de stabilizare (396 MW) cu scopul de a readuce valoarea frecvenței la valoarea dorită (50 Hz). Dacă s-ar considera o valoare mai mică pentru perturbația în frecvență și creșterea valorii puterii peste 360 MW ar fi mult mai mică. Cazul prezentat este unul foarte particular și restrictiv deoarece s-a lucrat la putere activă nominală. Generatoarele pot funcționa pentru o scurtă perioadă de timp peste valoarea nominală a puterii active, deși nu este indicat, dar în general nu se depășește cu mai mult de 10% această valoare. Dacă se lucrează la o valoare mai mică decât cea nominală (în

marea majoritate din cazuri), adică se păstrează o rezervă de putere activă, se crează posibilitatea rejectării efectului perturbației în frecvență fără ca regimul nominal de funcționare a generatorului să fie atins.

Remarcă: Componenta integratoare care asigură abatere staționară la poziție nulă este conținută în funcția de transfer a servomotorului hidraulic. Astfel se justifică și faptul că regulatorul nu conține componentă integratoare.

b) Simularea sistemului de reglare a tensiunii la bornele generatorului

Schema bloc a sistemului de reglare a tensiunii la bornele generatorului este prezentată în figura 9.10.

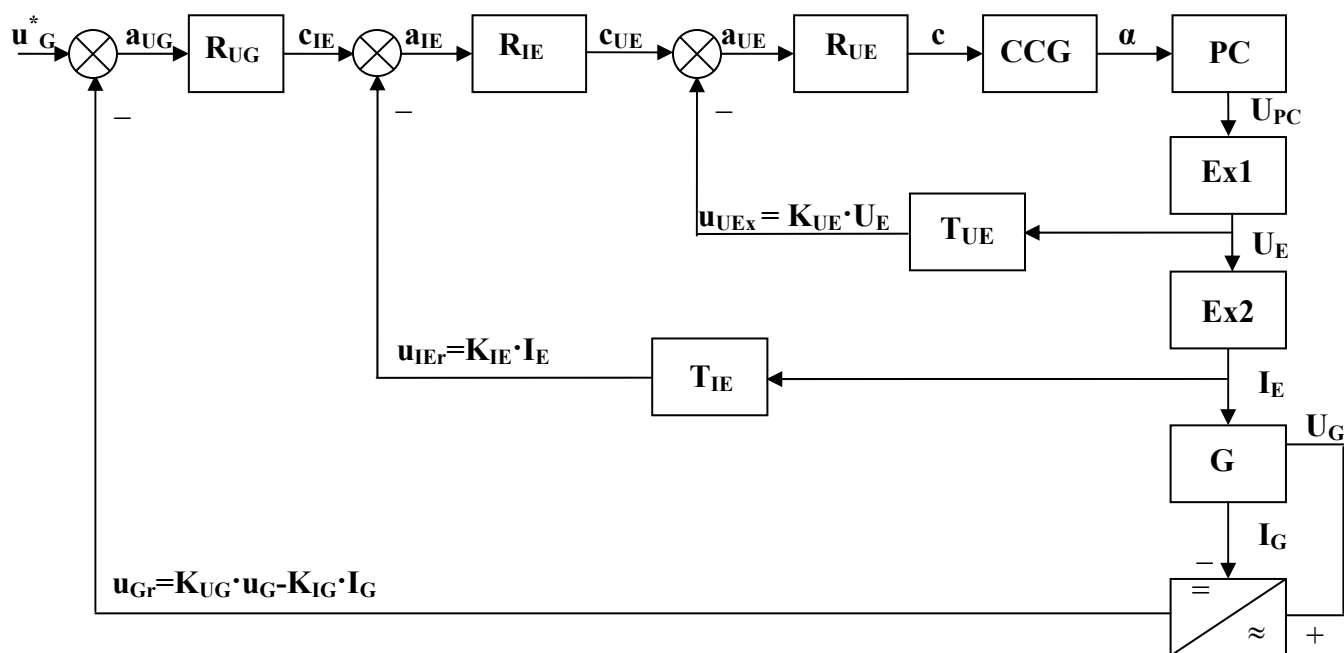


Figura 9.10. Schema bloc a sistemului de reglare a tensiunii la bornele generatorului

Au fost utilizate următoarele notații:

- R_{IE} – regulatorul curentului de excitație;
- R_{UE} – regulatorul tensiunii de excitație;
- CCG – complexul de comandă pe grilă;
- PC – puntea redresoare comandată;
- $Ex1$ și $Ex2$ – subprocessele aferente elementului de excitație a generatorului (EE_x);
- T_{UE} – traductor de măsură + adaptor de tensiune – tensiune unificată;
- T_{IE} – traductor de măsură + adaptor de curent – tensiune unificată;

- I_G – curentul de sarcină;
- a_{UG} , a_{IE} , a_{UE} – abaterile prelucrate de regulatoarele R_{UG} , R_{IE} și R_{UE} ;
- c_{IE} , c_{UE} , c – semnalele de comandă generate de regulatoarele R_{UG} , R_{IE} și R_{UE} ;
- α – semnalul de ieșire din complexul de comandă pe grilă (unghi de amorsare a tiristoarelor redresorului comandat);
- K_{UE} , K_{IE} – constantele de proporționalitate a traductoarelor de măsură a tensiunii de excitație, respectiv a curentului de excitație;
- K_{UG} , K_{IG} – coeficienți de ponderare a reacției după tensiunea la bornele generatorului, respectiv după curentul de sarcină;
- u_{UEx} , u_{IEr} , u_{Gr} – semnalele de reacție în tensiune unificată, corespunzătoare celor trei bucle de reglare (a tensiunii de excitație, a curentului de excitație, respectiv a tensiunii la bornele generatorului).

Figura 9.10 relevă faptul că reglarea tensiunii la bornele generatorului se realizează prin utilizarea unei scheme de reglare în cascadă cu trei regulatoare, respectiv trei bucle de reglare. În acest caz, referința regulatorului R_{IE} este semnalul de comandă generat de regulatorul R_{UG} , iar referința regulatorului R_{UE} este semnalul de comandă generat de regulatorul R_{IE} . Regulatorul R_{UE} comandă prin intermediul complexului de comandă pe grilă redresorul comandat. Semnalul de ieșire în tensiune continuă din redresorul comandat reprezintă semnalul de execuție care se aplică elementului de excitație a excitatricei generatorului. Ponderea reacției pozitive de compundare este de 5% (în raport cu curentul de sarcină) din reacția dublă care generează semnalul de reacție u_{Gr} .

Semnalul c generat de regulatorul R_{UE} asigură comanda în domeniul $[0;8]V$, spre deosebire de celelalte semnale de comandă, respectiv celelalte semnale în tensiune unificată din sistem, toate acestea permițând variația între $[0;10]V$.

Funcționarea în regim dinamic a tuturor elementelor schemei din figura 9.10 a fost modelată prin utilizarea funcțiilor de transfer, a căror relații sunt:

$$H_{EE}(s) = \frac{L\{U_E(t)\}}{L\{U_{PC}(t)\}} = \frac{K_{EE}}{1 + T_{EE} \cdot s} = \frac{1.388}{1 + 0.1 \cdot s}, \quad (9.9)$$

unde constanta de proporționalitate K_{EE} este adimensională, iar constanta de timp T_{EE} este exprimată în secunde;

$$H_E(s) = \frac{L\{I_E(t)\}}{L\{U_E(t)\}} = \frac{K_E}{1 + T_E \cdot s} = \frac{3.6}{1 + 0.5 \cdot s}, \quad (9.10)$$

unde constanta de proporționalitate K_E este exprimată în $[A/V]$, iar constanta de timp T_E este exprimată în secunde;

$$H_{EG}(s) = \frac{L\{U_G(t)\}}{L\{I_E(t)\}} = K_{EG} = 13.888, \quad (9.11)$$

unde constanta de proporționalitate K_{EG} este exprimată în [V/A];

$$H_G(s) = \frac{L\{I_G(t)\}}{L\{U_G(t)\}} = \frac{K_G}{1+T_G \cdot s} = \frac{0.403}{1+4 \cdot s}, \quad (9.12)$$

unde constanta de proporționalitate K_G este exprimată în [A/V], iar constanta de timp T_G este exprimată în secunde;

$$H_{CCG+PC}(s) = \frac{L\{U_{PC}(t)\}}{L\{c(t)\}} = K_{CCG+PC} = 45, \quad (9.13)$$

unde constanta de proporționalitate K_{CCG+PC} este adimensională;

$$H_{T_{UE}}(s) = \frac{L\{u_{UE}(t)\}}{L\{U_E(t)\}} = K_{UE} = 0.02, \quad (9.14)$$

unde constanta de proporționalitate K_{UE} este adimensională;

$$H_{T_{IE}}(s) = \frac{L\{u_{IEr}(t)\}}{L\{I_E(t)\}} = K_{IE} = 0.0055, \quad (9.15)$$

unde constanta de proporționalitate K_{IE} este exprimată în [V/A];

$$H_{T_{UG}}(s) = \frac{L\{u_{Gr}(t)\}}{L\{U_G(t)\}} = K_{UG} = 0.4 \cdot 10^{-3}, \quad (9.16)$$

unde constanta de proporționalitate K_{UG} este adimensională;

$$H_{T_{IG}}(s) = K_{IG} = 4.96 \cdot 10^{-5}, \quad (9.17)$$

unde constanta de proporționalitate K_{IG} este exprimată în [V/A].

În relația (9.13) se observă că, complexul de comandă pe grilă și puntea redresoare comandată au fost considerate ca un ansamblu.

Calculul reguletoarelor începe din bucla cea mai interioară. Astfel, utilizând relațiile (9.9), (9.13), (9.14) și aproximând suma constantelor de timp foarte mici la valoarea $T_{\Sigma} = 0.01\text{s}$, rezultă funcția de transfer a părții fixate a procesului aferent buclei de reglare a tensiunii de excitație, iar apoi prin aplicarea criteriului modulului rezultă funcția de transfer a regulatorului tensiunii de excitație:

$$H_{RUE}(s) = \frac{L\{c(t)\}}{L\{a_{UE}(t)\}} = K_{RUE} \cdot \left(1 + \frac{1}{T_{IRUE} \cdot s}\right) = 4 \cdot \left(1 + \frac{1}{0.1 \cdot s}\right), \quad (9.18)$$

funcție de transfer ce corespunde unui regulator PI cu constanta de proporționalitate K_{RUE} (adimensională) și constanta de timp de integrare T_{IRUE} (exprimată în secunde).

După calculul funcției de transfer echivalente a buclei de reglare a tensiunii de excitație se poate calcula funcția de transfer a părții fixate a procesului aferent buclei de reglare a curentului de excitație și implicit funcția de transfer a regulatorului curentului de excitație utilizând criteriul modulului. În calcul s-a aproximat valoarea $T_{\Sigma} = 0.01\text{s}$ pentru suma constantelor foarte mici. După efectuarea calculelor a rezultat:

$$H_{RIE}(s) = \frac{L\{c_{UE}(t)\}}{L\{a_{IE}(t)\}} = K_{RIE} \cdot \left(1 + \frac{1}{T_{IRIE} \cdot s} + T_{DRIE} \cdot s\right) = 26 \cdot \left(1 + \frac{1}{0.52 \cdot s} + 0.019 \cdot s\right), \quad (9.19)$$

funcție de transfer ce corespunde unui regulator PID ideal cu constanta de proporționalitate K_{RIE} (adimensională) și constantele de timp de integrare T_{IRIE} , respectiv de derivare T_{DRIE} (ambele exprimate în secunde). Pentru obținerea unei forme realizabile, regulatorului din relația (9.19) i se atașează un filtru de ordinal I, cu constanta de timp $T_{f2} = 0.05\text{s}$, astfel:

$$H_{RIE}(s) = \frac{L\{c_{UE}(t)\}}{L\{a_{IE}(t)\}} = \frac{K_{RIE} \cdot \left(1 + \frac{1}{T_{IRIE} \cdot s} + T_{DRIE} \cdot s\right)}{1 + T_{f2} \cdot s} = \frac{26 \cdot \left(1 + \frac{1}{0.52 \cdot s} + 0.019 \cdot s\right)}{1 + 0.05 \cdot s}. \quad (9.20)$$

Calculul funcției de transfer a părții fixate aferente buclei de reglare a tensiunii la bornele generatorului se realizează ținând cont de reacția de compundare și neținând cont de filtrul introdus în relația (9.20) (nu se ține cont de filtru la calculul funcției de transfer echivalente a buclei de reglare a curentului de excitație). Prin aproximarea sumei constantelor de timp principal necompensabile la valoarea $T_{\Sigma} = 0.01\text{s}$ și prin aplicarea criteriului modulului, rezultă:

$$H_{RUG}(s) = \frac{L\{c_{IE}(t)\}}{L\{a_{UG}(t)\}} = \frac{K_{RUG} \cdot (1 + \frac{1}{T_{IRUG} \cdot s} + T_{DRUG} \cdot s)}{1 + T_{f3} \cdot s} = \frac{212 \cdot (1 + \frac{1}{4.02 \cdot s} + 0.198 \cdot s)}{1 + 4.2 \cdot s}, \quad (9.21)$$

funcție de transfer ce corespunde unui regulator PID cu filtru de ordinul I, cu constanta de proporționalitate K_{RUG} (adimensională), constantele de timp de integrare T_{IRUG} , respectiv de derivare T_{DRUG} (ambele exprimate în secunde) și constanta de timp a filtrului $T_{f3} = 4.2$ s.

Dacă perturbația în tensiune se consideră de tip treaptă, schema de reglare a tensiunii la bornele generatorului, implementată în Simulink, este prezentată în figura 9.11, figură în care au fost introduse elemente de vizualizare și pentru câteva din variabilele intermediare.

Observația legată de utilizarea mai multor zecimale pentru o simulare corectă rămâne valabilă și în cazul acestei scheme. Perturbația în tensiune de tip treaptă negativă a fost notată cu p_U , apare după 70 s de la începutul simulării și are valoarea -1000 V. Simulările au fost realizate setând valoarea semnalului de referință în tensiune unificată u_G^* la valoare de 9.5 V. În acest fel, ieșirile sistemului (tensiunea la bornele generatorului și curentul de sarcină) se vor stabili la valorile nominale datorită ponderii de 5% (0.5 V) a reacției de compundare (referința de 10 V tensiune unificată implică funcționarea la valori nominale a instalației). În exploatarea uzuală se practică setarea valorii semnalului u_G^* la 10 V, astfel depășindu-se valorile nominale la ieșirea sistemului. Depășirea valorilor nominale se justifică deoarece există necesitatea compensării căderilor de tensiune din rețea. Cazul abordat în această expunere a fost ales pentru o mai ușoară urmărire a rezultatelor simulării.

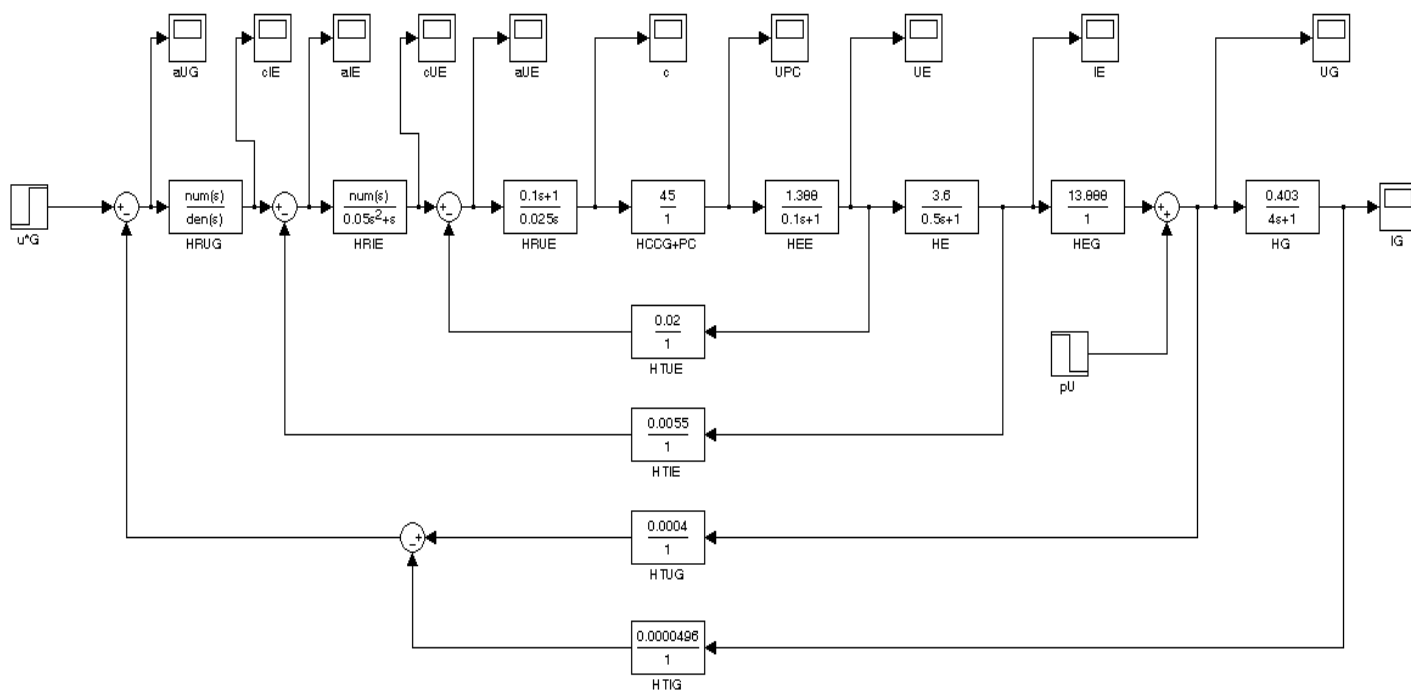


Figura 9.11. Schema de reglare a tensiunii la bornele generatorului

În figurile 9.12 și 9.13 sunt reprezentate grafic evoluțiile semnalului de ieșire (tensiunea la bornele generatorului) și a comenzii generate de regulatorul tensiunii de excitație R_{UE} și aplicate la intrarea complexului de comandă pe grilă.

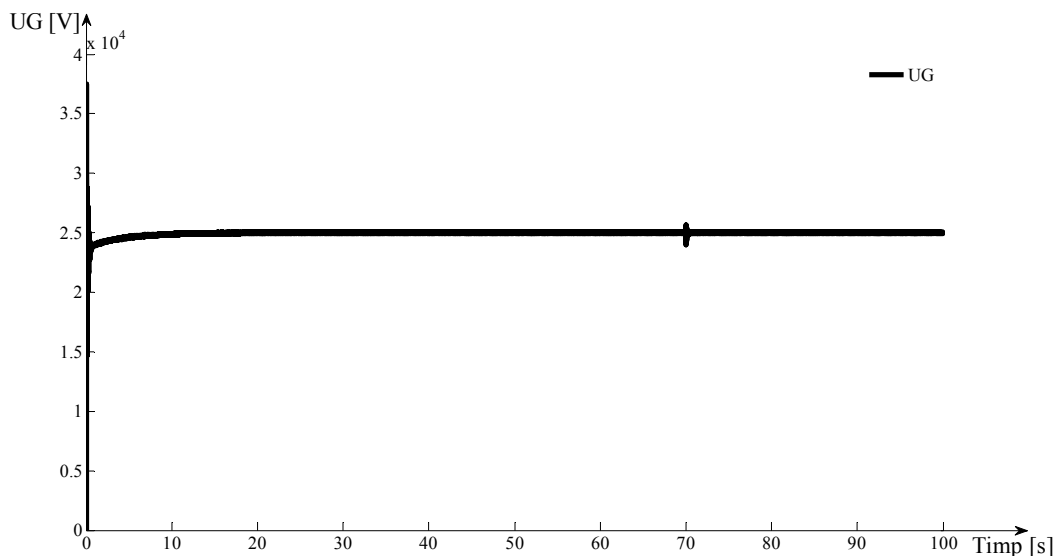


Figura 9.12. Evoluția tensiunii la bornele generatorului, dacă perturbația p_U este de tip treaptă

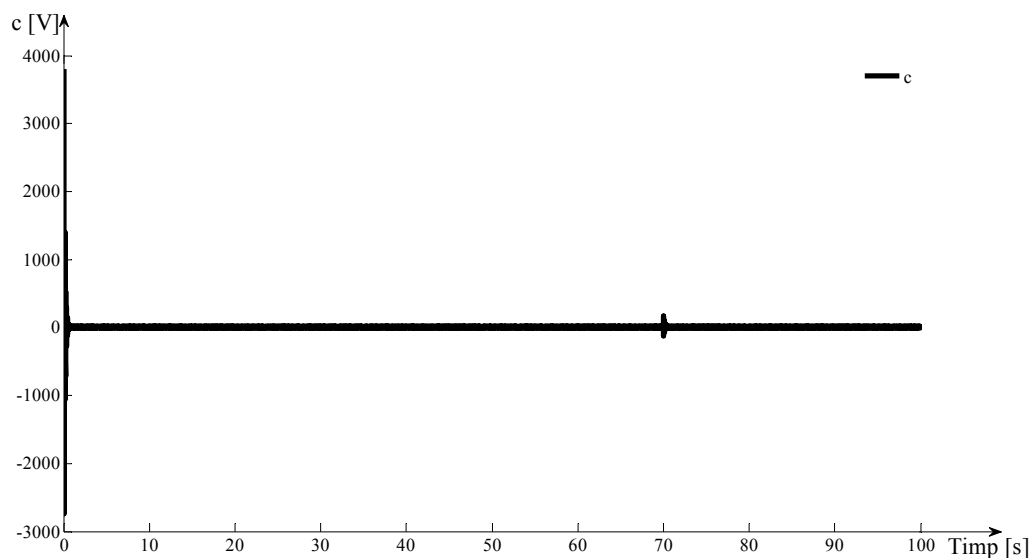


Figura 9.13. Evoluția semnalului de comandă generat de regulatorul R_{UE} , dacă perturbația p_U este de tip treaptă

Din figura 9.13 rezultă faptul că schema de reglare, deși valoarea tensiunii la bornele generatorului se stabilizează la valoarea dorită (valoarea nominală: $U_{Gnom} = 25 \text{ kV}$), iar după apariția perturbației efectul acesteia este rejectat foarte eficient (fără mari variații în jurul

valorii de 25 kV), nu este utilizabilă datorită valorilor foarte mari ale răspunsului (peste 37.5 kV) și a oscilațiilor puternice ale acestuia care apar chiar la începutul simulării, respectiv a oscilațiilor puternice ale răspunsului care apar imediat după ce perturbația își manifestă efectul. De asemenea semnalul de comandă generat de regulatorul R_{UE} prezintă valori nepermise de mari atât la începutul simulării, cât și imediat după apariția perturbației (ținând cont că domeniul de variație al acestuia este $[0;8]V$) precum și oscilații puternice în ambele situații. Problemele care au generat aceste aspecte negative sunt similare celor din cazul sistemului de reglare de la punctual *a*) și anume pornirea prea bruscă a instalației, respectiv aplicarea prea bruscă a semnalului de perturbație prin utilizarea semnalelor treaptă ideale.

„Întârzierea” semnalelor de referință, respectiv de perturbație s-a efectuat similar exemplului de la punctual *a*) prin utilizarea funcțiilor de transfer de ordinal II $H_{REF1}(s) = \frac{1}{(1+5 \cdot s) \cdot (1+8 \cdot s)}$ și $H_{PER1}(s) = \frac{1}{(1+s) \cdot (1+s)}$. După reluarea simulării în noile condiții, evoluțiile celor două semnale prezentate în figurile 9.12 și 9.13 suferă mari modificări sub aspect pozitiv, așa cum reiese din figurile 9.14 și 9.15.

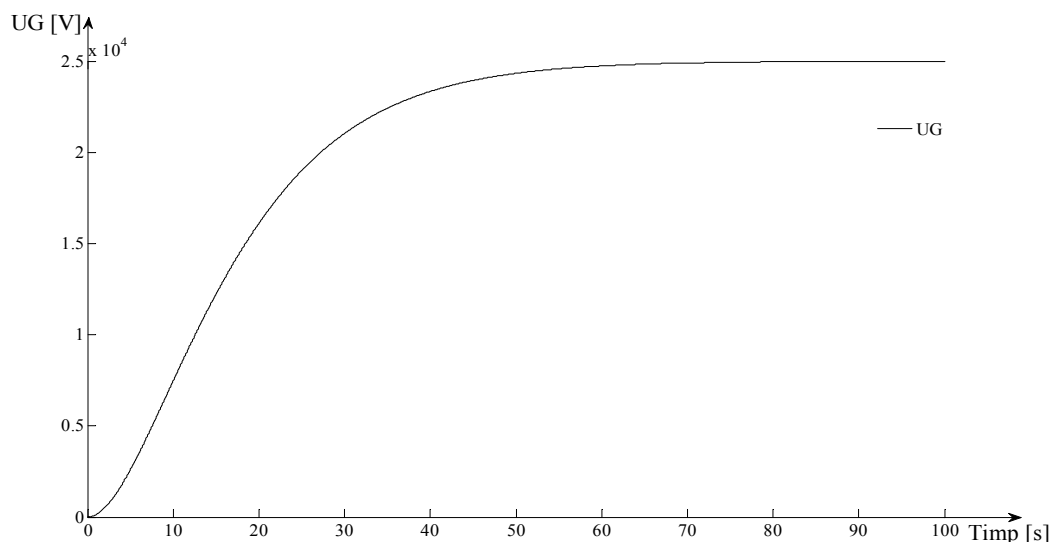


Figura 9.14. Evoluția tensiunii la bornele generatorului, dacă semnalele de referință, respectiv de perturbație au fost „întârziate”

Figura 9.14 relevă faptul că deși mai lent, valoarea tensiunii la bornele generatorului se stabilizează la valoarea nominală fără a atinge valori nepermise de mari la începutul simulării (în acest caz nici măcar nu există suprareglaj) și fără oscilații puternice. Efectul perturbației este rejectat foarte eficient, în figura 9.14, nefiind posibilă vizualizarea acestui fenomen cu ochiul liber, fapt ce demonstrează performanțele foarte ridicate a schemei de reglare cu trei regulatoare în cascadă. De asemenea, semnalul de comandă (figura 9.15) nu prezintă oscilații și nu depășește valorile limită admise înainte de apariția perturbației. După apariția perturbației valoarea comenzii crește peste limita superioară de 8V pentru a compensa efectul acesteia. În practică pot fi admise în unele cazuri depășiri sensibile ale semnalelor unificate.

În caz contrar acțiunea suplimentară necesară va fi realizată prin alte mijloace. Mărirea constantelor de timp de „întârziere” implică un timp de răspuns mai mare pentru semnalul de ieșire din proces.

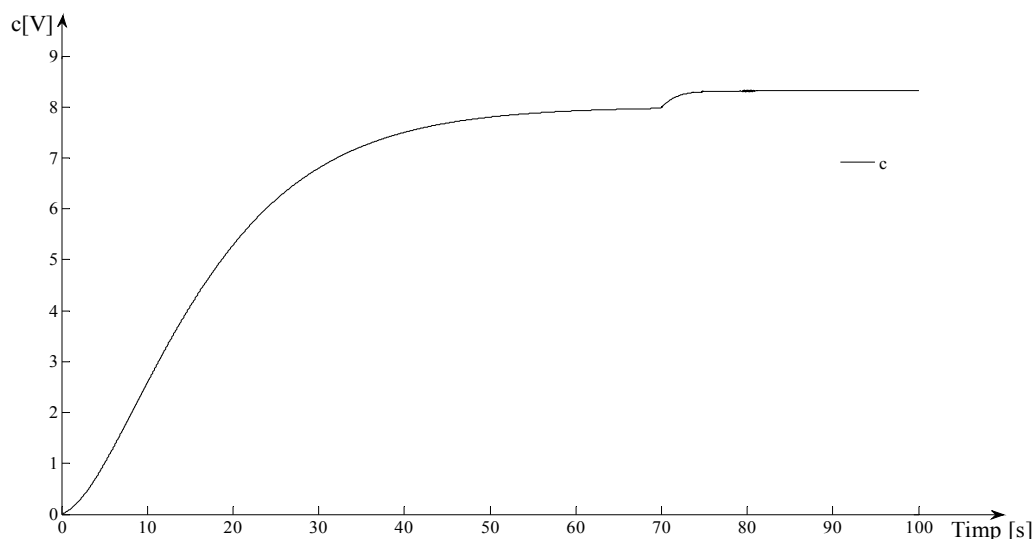


Figura 9.15. Evoluția semnalului de comandă generat de regulatorul R_{UE} , dacă semnalele de referință, respectiv de perturbație au fost „întârziate”

În figurile 9.16, 9.17 se prezintă evoluția semnalelor de comandă generate de regulatoarele R_{IE} și R_{UG} (pentru ultimul caz tratat). Concluziile sunt aceleași ca și în cazul semnalului c , cu diferența că domeniul de variație al acestora este $[0;10] V$.

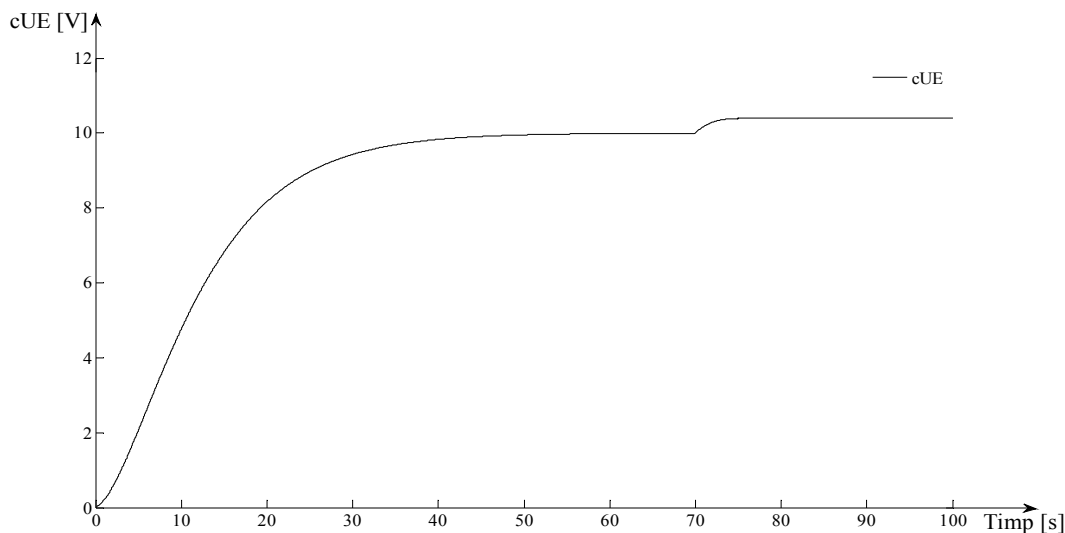


Figura 9.16. Evoluția semnalului de comandă generat de regulatorul R_{IE} , dacă semnalele de referință, respectiv de perturbație au fost „întârziate”

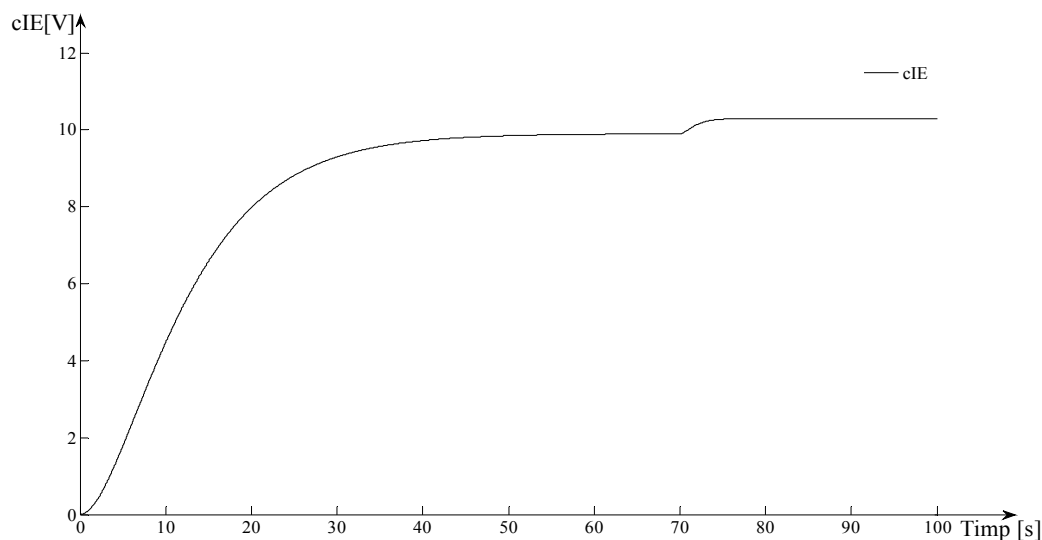


Figura 9.17. Evoluția semnalului de comandă generat de regulatorul R_{UG} , dacă semnalele de referință, respectiv de perturbație au fost „întârziate”

Remarcă 1: Tratarea celor două sisteme de reglare (de la punctele *a*) și *b*)) a fost realizată în scop didactic, astfel considerându-se un regim de funcționare ideal și realizându-se câteva simplificări. În exploatarea curentă, centralele nu se pornesc în sarcină și trebuie urmate mai multe etape și proceduri la pornire nesurprinse în simulări, dar obligatorii în practică.

Remarcă 2: În cazul ambelor scheme de reglare, în anumite condiții, unele semnale prezintă în zona de staționaritate oscilații de valori relative nesemnificative. Aceste oscilații pot fi parțial sau total eliminate prin ajustarea constantelor de timp ale filtrelor reglatoarelor (pentru cazul *a*) – valoarea constantei de timp T_f , iar pentru cazul *b*) – în principiu valoarea constantei de timp T_{f2} deoarece aceasta nu a rezultat prin calcul, ci a fost aleasă cu scopul obținerii formei realizabile a regulatorului R_{IE}).

Capitolul 10. Cerințe și observații

1. Studenții trebuie să își însușească cunoștințele teoretice expuse în documentația aferentă proiectului.
2. Fiecare student va primi un set inițial de date de proiectare (date diferite pentru fiecare student în parte) pentru care trebuie să efectueze toate calculele din cadrul proiectului.
3. Este necesară înlocuirea valorilor obținute în urma efectuării calculelor în locul spațiilor goale, pentru fiecare relație în parte.
4. Capitolele 2 și 3 se studiază în cadrul activității de proiect numărul 2.
5. La predarea proiectului se va verifica atât corectitudinea calculelor, cât și cunoștințele dobândite de student pe perioada studierii proiectului.
6. Capitolul 9 reprezintă un exemplu de efectuare a unor calcule specifice proiectului, respectiv un exemplu de efectuare a simulării celor două sisteme de reglare exemplificate, utilizând parametrii determinați. Formatul numerotării figurilor și a relațiilor este specific doar acestui capitol.

Bibliografie Proiect

- [1] Abrudean M., „*Teoria sistemelor și control automat*”, Editura MEDIAMIRA Cluj-Napoca, 1998.
- [2] Coloși T., Isoc D., Aștilean A., „*Automatizări Industriale Continue*”, Atelierul de multiplicare al Institutului politehnic Cluj-Napoca, 1983.
- [3] Coloși T., Ignat I., „*Elemente de teoria sistemelor și reglaj automat*”, Atelierul de multiplicare al Institutului politehnic Cluj-Napoca, 1981.
- [4] Mureșan V., „*Conducerea proceselor industriale Îndrumător de laborator*”, Editura U.T. PRESS, Cluj-Napoca 2011, 134 pag.
- [5] Vinătoru M., „*Conducerea automată a proceselor industriale, Vol. I*”, Editura Universitaria Craiova, 2001.
- [6] Iliescu S. S., „*Teoria reglării automate*”, Editura Proxima, București, 2006.
- [7] Vinătoru M., Iancu E., Maican C., Cănuț G., „*Conducerea automată a proceselor industriale – Îndrumător de laborator - Vol. I -*”, Editura Universitaria Craiova, 2007.
- [8] Coloși T., „*Documentații de proiect*”.
- [9] Dobra P., „*Sisteme neliniare*”, Editura U.T.PRES Cluj-Napoca, 1999.
- [10] Preitl Ș., Precup R.-E., Preitl Z., „*Structuri și algoritmi pentru conducerea automată a proceselor Volumul 2*”, Editura Orizonturi Universitare, Timișoara, 2009.
- [11] Golnaraghi F., Kuo C. B., „*Automatic Control Systems Ninth Edition*”, Wiley, SUA, 2010.
- [12] Coloși T., Abrudean M., Ungureșan M.-L., Mureșan V., „*Numerical Simulation of Distributed Parameters Processes*”, Editura SPRINGER, 363 pagini, 2013.
- [13] Love J., „*Process Automation Handbook, 1 edition*”, Editura Springer, 1200 pagini, 2007.
- [14] Mureșan V., Abrudean M., „*Conducerea proceselor industriale – Curs didactic*”, Editura Galaxia Gutenberg, Cluj-Napoca 2017, 181 pagini.

