

LABORATOR NR. 10: ACORDAREA REGULATORULUI UNEI BUCLE DE REGLARE A CURENTULUI LA UN MOTOR DE CURENT CONTINUU

1. Obiectivele lucrării

- a- studiul comportării temporale a procesului comandat, într-o buclă de reglare a curentului la un motor de curent continuu;
- b- acordarea regulatorului în conformitate cu criteriul modulului;
- c- acordarea regulatorului în conformitate cu criteriul optimului simetric.

2. Breviar teoretic

A. Reglarea vitezei și reglarea curentului unui motor de cc

Figura 1 prezintă schema uzuală a unui variator de viteză cu motor de cc. Se constată existența a două bucle de reglare: o buclă externă, numită majoră, având ca mărime de ieșire viteză, și o buclă internă, numită minoră, având curentul prin indus ca mărime de ieșire. O asemenea structură se numește sistem de reglare în cascadă.

Elementele incluse în cadrul schemei sunt :

- motorul de curent continuu, M ;
- convertizorul static destinat alimentării rotorului cu tensiune variabilă;

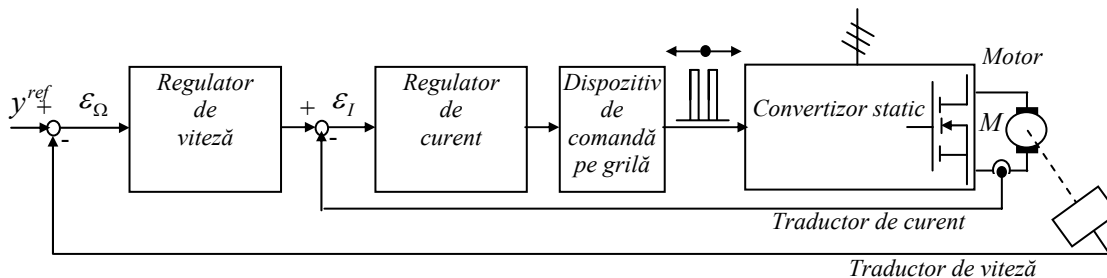


Fig. 1 Structura unui sistem de reglare a vitezei la un motor de cc

- dispozitivul de comandă pe grilă, prin care regulatorul de curent acționează asupra convertizorului static ;;
- traductoarele de viteză și de curent;
- regulatorul de curent – pentru bucla minoră – și de viteză – pentru bucla majoră.

În schema din fig. 2 sunt date modelele matematice ale elementelor din structura variatorului (cu excepția reguletoarelor). Vom comenta aceste modele, după cum urmează:

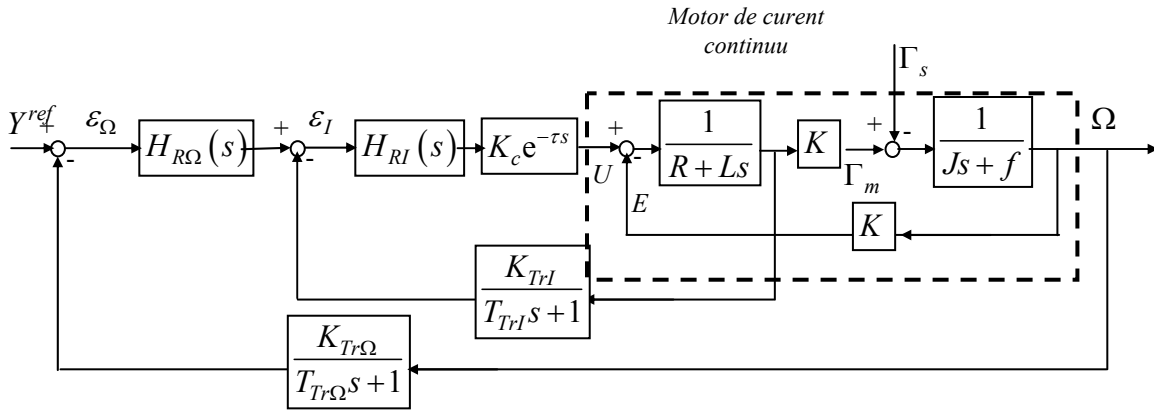


Fig. 2 Modelul matematic al variatorului de viteză

- **motorul de curent continuu** are modelul prezentat sub forma schemei bloc încadrate cu linie întreruptă. Presupunem o mașină de cc cu magneți permanenți. Parametrii care intervin în modelul matematic sunt : rezistența și inductivitatea circuitului rotor, R respectiv L , constanta electromecanică a mașinii, momentul de inerție la arbore, J , și coeficientul de frecări vâscoase f . Coeficientul f are, de regulă, valori foarte mici și se va considera $f \approx 0$;

- **ansamblul convertizor static-dispozitiv de comandă pe grilă** este considerat ca un element cu amplificarea statică K_c , având un timp mort mic, notat prin τ . Valorile medii ale timpului mort sunt : 5 ms – pentru un redresor bifazat; 3,3 ms – pentru un redresor trifazat; 1,67 ms – pentru un redresor în punte trifazată. Dacă motorul este alimentat printr-un coppers, atunci se poate considera $\tau = 0$. Întrucât timpul mort este foarte mic, funcția de transfer $e^{-\tau s}$ este aproximată printr-un element aperiodic:

$$e^{-\tau s} = \frac{1}{e^{\tau s}} = \frac{1}{1 + \tau s + \frac{1}{2} \tau^2 s^2 + \dots} \approx \frac{1}{1 + \tau s} \quad (1)$$

- **traductoarele de viteză și de curent** sunt modelate ca niște elemente aperiodice, definite prin coeficienții statici de amplificare și prin constantele de timp $K_{Tr\Omega}$, $T_{Tr\Omega}$ și, respectiv, K_{TrI} , T_{TrI} .

Obiectivul principal urmărit în cadrul lucrării de laborator constă în realizarea calculului regulatorului buclei de curent.

În fig. 3 este desenată numai bucla de curent. Se constată că, aparent, procesul reglat este pur electric. Această apreciere este valabilă numai dacă rotorul este calat, deci $\Omega = 0$, implicând $E = 0$. În acest caz, schema buclei de curent este reprezentată în fig. 4, în care $T_e = L/r$ este constanta de timp electrică a mașinii.

Vom calcula regulatorul și vom verifica îndeplinirea cerințelor de calitate impuse, prin observarea evoluției mărimii de la ieșirea traductorului (informația oferită de echipamentul de măsurare). Presupunând că ieșirea buclei este mărimea măsurată de traductor, structura buclei de reglare este cea din fig. 5. Vom considera că ansamblul elementelor din buclă, cu excepția regulatorului, formează procesul (obiectul) reglat. Constantele de timp ale procesului se clasifică în : constante de timp principale și constante de timp parazite (sensibil mai mici decât cele principale). În cazul concret al buclei de curent se consideră o constantă de timp

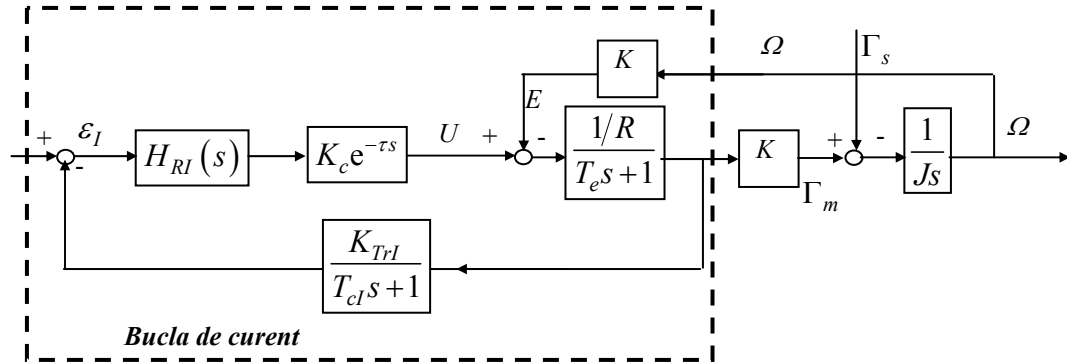


Fig. 3 Modelul matematic al buclei de curent

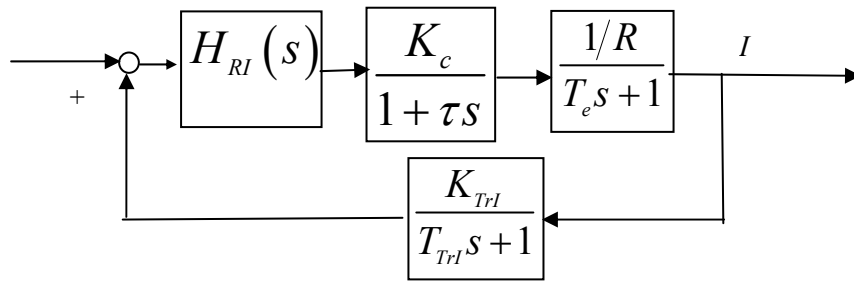


Fig. 4 Schema buclei de curent în ipoteza că rotorul este calat

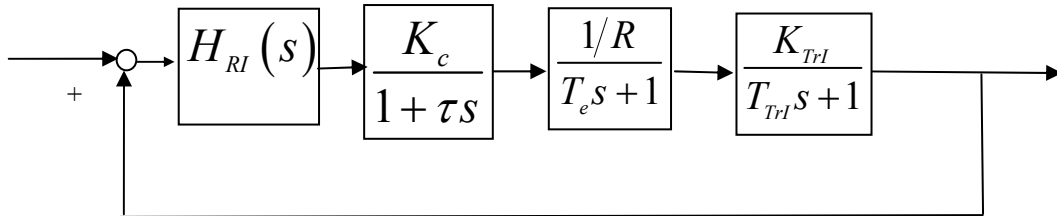


Fig. 5 Schema echivalentă a buclei de curent, considerând ieșirea traductorului ca mărime de ieșire a buclei

principală, T_e și două constante de timp parazite : τ și T_{TrI} . Funcția de transfer a procesului din cadrul buclei de curent este :

$$H_{PI}(s) = \frac{K_{PI}}{(T_e s + 1)(T_\Sigma s + 1)} \quad (2)$$

cu

$$K_{PI} = K_{ac} \cdot \frac{1}{R} \cdot K_{cl}; \quad T_e = \frac{L}{R}; \quad T_\Sigma = T_{cl} + \tau \quad (3)$$

]Dacă s-ar considera următoarele valori numerice ale parametrilor din modelul procesului reglat :

$$R=1 \text{ ohm}; L=25 \text{ mH}; K_c = 20; K=0,5; \tau=3,3 \text{ ms}; J=0.04 \text{ Kg.m}^2; f=0, \quad (4)$$

atunci forma răspunsului la treaptă al procesului reglat este dată in fig. 7.

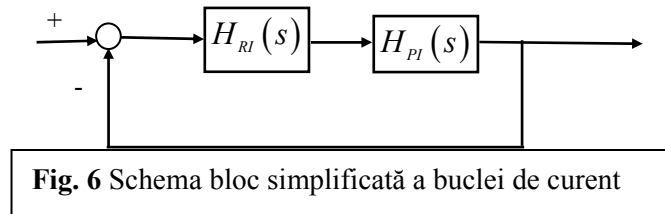


Fig. 6 Schema bloc simplificată a buclei de curent

Se constată că după 100 ms, regimul dinamic nu este stabilizat, fapt explicat prin valoarea constantei de timp principale din sistem : $T_e=25 \text{ ms}$.

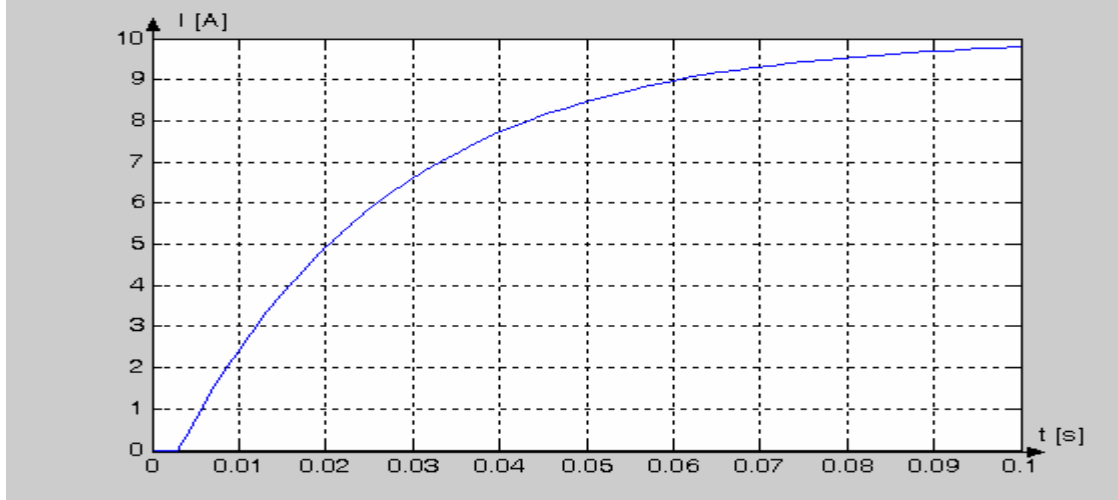


Fig. 7. Răspunsul la semnal treaptă al procesului reglat

Utilizând criteriul modului (variantea Kessler), rezultă necesitatea de a adopta un regulator de tip PI, a cărui funcție de transfer

$$H_{RI}(s) = K_R \left(1 + \frac{1}{T_I s} \right) \quad (5)$$

trebuie să satisfacă relația

$$K_R \left(1 + \frac{1}{T_I s} \right) \cdot H_{PI}(s) = \frac{1}{2T_\Sigma s (T_\Sigma s + 1)} \quad (6)$$

sau

$$K_R \left(\frac{T_I s + 1}{T_I s} \right) \cdot \frac{K_{PI}}{(T_e s + 1)(T_\Sigma s + 1)} = \frac{1}{2T_\Sigma s (T_\Sigma s + 1)} \quad (7)$$

Rezultă:

$$T_I = T_e; K_R = \frac{T_e}{2T_\Sigma K_P} \quad (8)$$

Răspunsul sistemului în buclă închisă, având regulatorul acordat după criteriul modulului, este dat în fig. 8. La intrarea buclei s-a aplicat o teaptă de amplitudine 10. Se constată următoarele:

- în regim staționar, valoarea referinței impuse se obține exact (eroarea staționară este nulă);
- durata regimului dinamic este mult mai mică, față de situația când procesul este comandat în circuit deschis (v. fig. 7). Acest fapt este datorat compensării constantei de timp principale a procesului, de către regulator (fact ;
- se obține un regim dinamic cu o suprareglare (teoretic – de 4,3%), însă fără oscilații.

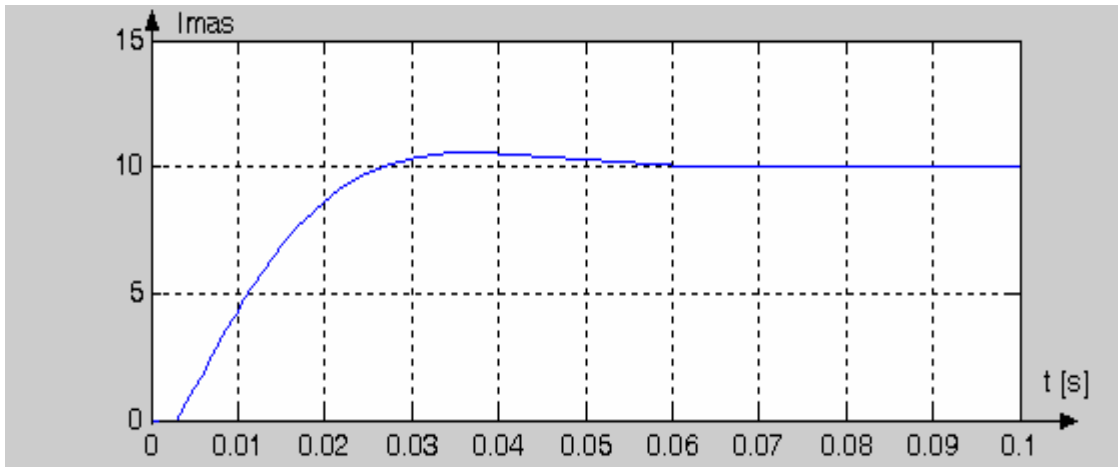


Fig. 8 Răspunsul la semnal traptă al buclei de curent (cu rotorul calat) ; bucla este acordată după criteriul modulului

Daca rotorul nu este calat, atunci variația vitezei $\Omega(t)$ în subsistemul electromecanic produce o variație a tensiunii electromotoare $E(t)$, cu o formă apropiată de o rampă. Aceasta acționează ca o perturbare la nivelul buclei de

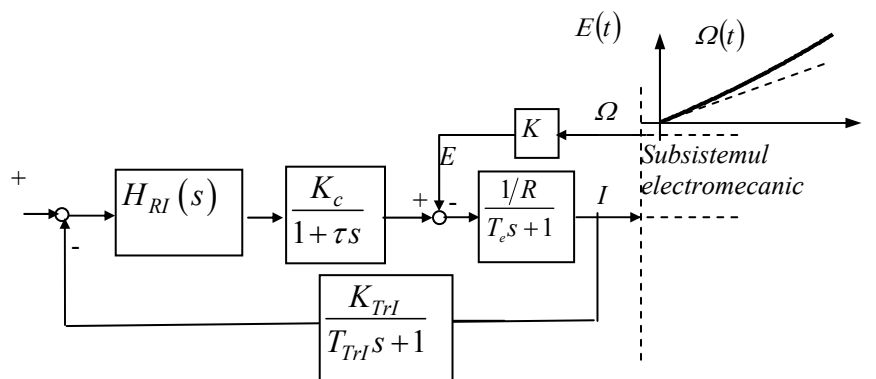


Fig. 9 Interacțiunea buclei de curent cu sub sistemul electromecanic

Curent (v. fig. 9). Evoluția sub formă apropiată de rampă a variabilei $E(t)=K \cdot \Omega(t)$, care are o acțiune de tipul unei perturbații la nivelul buclei de curent, face ca eroarea de regim permanent a buclei de curent cu regulator PI să fie ne-nulă. Acest

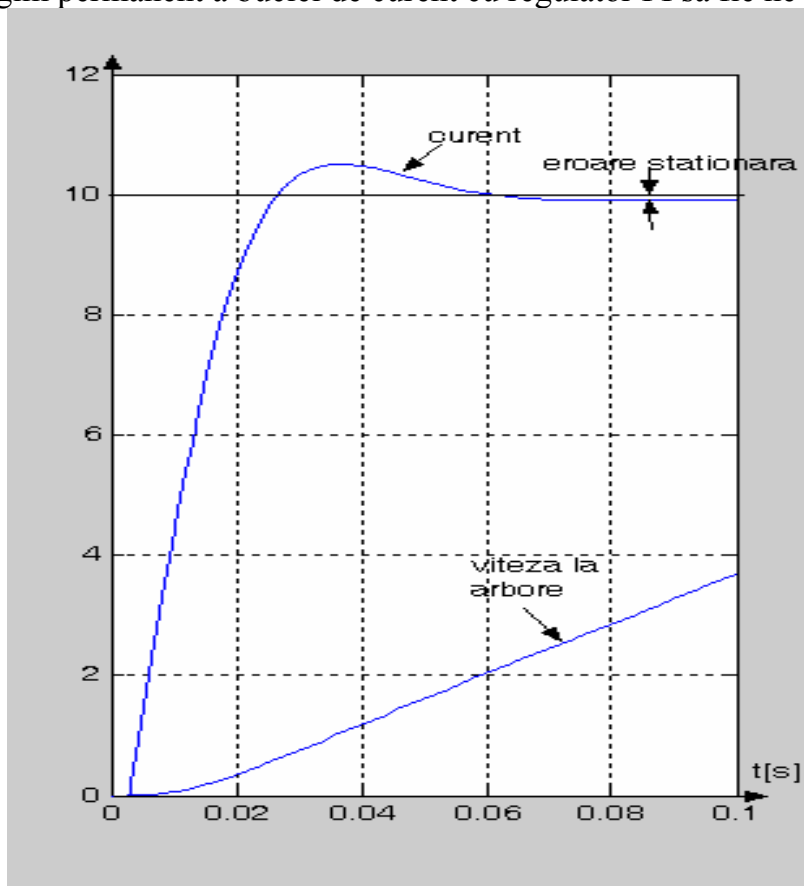


Fig. 10 Răspunsul la semnal traptă al buclei de curent când rotorul nu este cald; bucla este acordată după criteriul modulului

fapt este ilustrat în fig. 10, unde se prezintă răspunsul indicial al buclei de curent (în care procesul are parametrii (4)), împreună cu evoluția vitezei la arbore (variabila E care acționează asupra buclei este proporțională cu viteza). Se

constată din grafic existența unei erori staționare (de regim permanent). Este cunoscut că, pentru anularea erorii de regim permanent, atunci când perturbația la nivelul buclei este sub formă de rampă, trebuie să existe un element dublu integrator în buclă. În acest caz, calculul legii de reglare se face pe baza criteriului optimului simetric (criteriul simetriei – varianta Kessler). Funcția de transfer a buclei de curent trebuie să aibă forma

$$H_c(s) = H_{RI}(s) \cdot H_{PI}(s) = H_{RI}(s) \frac{K_{PI}}{(T_e s + 1)(T_\Sigma s + 1)} = \frac{4T_\Sigma s + 1}{8T_\Sigma^2 s^2 (T_\Sigma s + 1)} \quad (9)$$

Este evident că regulatorul trebuie să fie un dublu PI, cu funcția de transfer

$$H_{RI}(s) = K_R \left(\frac{T_I s + 1}{T_I s} \right) \cdot \left(\frac{T_{I1} s + 1}{T_{I1} s} \right) \quad (10)$$

Parametrul T_I comensează constanta de timp principală a procesului, iar T_{I1} alocă zeroul funcției de transfer (9). Înlocuind (10) în (9), se obține

$$H_c(s) = K_R \left(\frac{T_I s + 1}{T_I s} \right) \cdot \left(\frac{T_{I1} s + 1}{T_{I1} s} \right) \frac{K_{PI}}{(T_e s + 1)(T_\Sigma s + 1)} = \frac{4T_\Sigma s + 1}{8T_\Sigma^2 s^2 (T_\Sigma s + 1)} \quad (11)$$

din care rezultă

$$T_I = T_e ; T_{I1} = T_\Sigma ; K_R = \frac{T_e}{2T_\Sigma K_{PI}} \quad (12)$$

Funcția de transfer a sistemului închis, atunci când $H_c(s)$ are expresia (9), este

$$H_0(s) = \frac{4T_\Sigma s + 1}{(2T_\Sigma s + 1)(2T_\Sigma^2 s^2 + 2T_{\Sigma1} s + 1)} \quad (13)$$

pentru care distribuția poli-zero este dată în fig. 11.

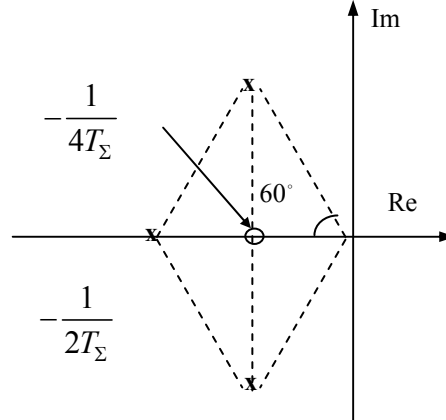


Fig. 11. Distribuția poli zero pentru sistemul acordat după criteriul simetriei

Calculul parametrilor regulatorului după criteriul simetriei asigură anularea erorii de regim permanent, însă – datorită zeroului din funcția de transfer (introdus de factorul $4T_\Sigma s + 1$) – răspunsul indicial în raport cu referința are o suprareglare inacceptabilă. Pentru reducerea suprareglării la un nivel acceptabil, referința este

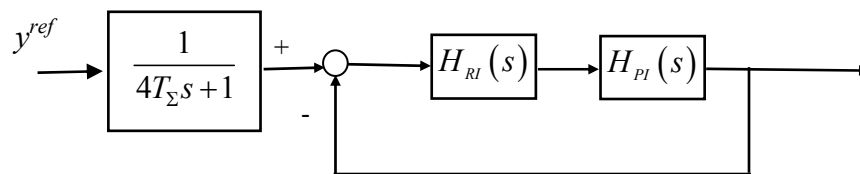


Fig. 12 Filtrarea referinței, pentru reducerea suprareglării

filtrată printr-un filtru cu constanta de timp $4T_{\Sigma}$. Numitorul funcției de transfer a filtrului compensează (se simplifică cu) numărătorul funcției de transfer (9) a sistemului în circuit închis, deci efectul zeroului menționat dispare. Pentru parametrii (4) ai procesului, în fig 13 este prezentat răspunsul la o traptă aplicată la referința buclei de reglare a curentului. Se observă că eroarea de regim permanent este nulă (în condițiile când viteza produce o perturbație în rampă la nivelul buclei), iar suprareglarea este în limite acceptabile.

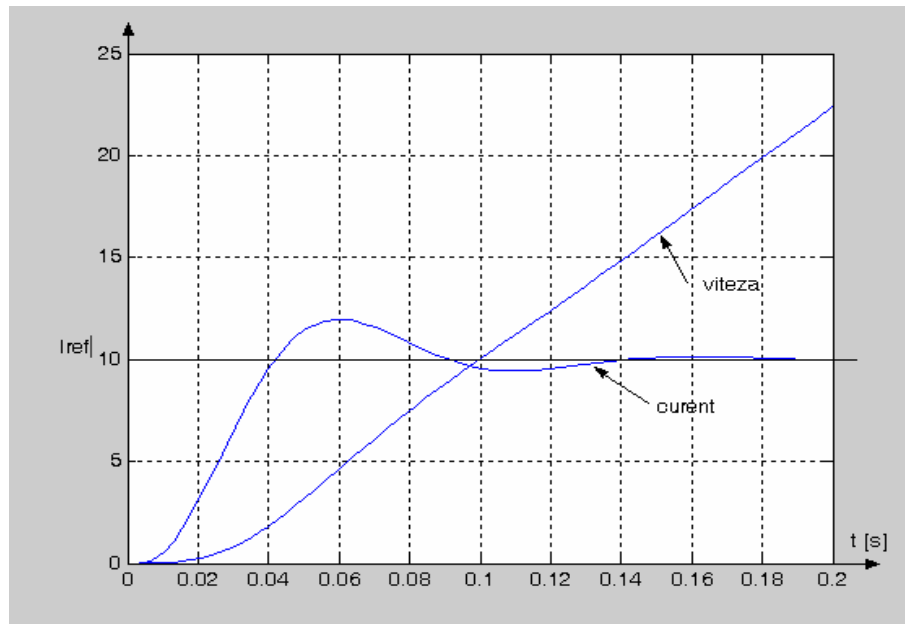


Fig. 13 Răspunsul la o variație în treapta a referinței buclei de curent, la utilizarea filtrului de intrare.

3. Mersul lucrării

I- Studiul comportării temporale a procesului reglat

I.1 Se vor considera următorii parametri ai procesului reglat:

$$R=1 \text{ ohm} ; L=25 \text{ mH} ; K_c = 20 ; K=0,5 ; \tau=3,3 \text{ ms} ; J=0.04 \text{ Kg.m}^2 ; f=0, K_{Tr}=1 ; T_{Tr}=5\text{ms}$$

Se va deduce răspunsul indicial al procesului reglat și se va reprezenta grafic. Pentru simularea elementului cu timp mort se va utiliza funcția *pade*. Se va compara rezultatul cu răspunsul din fig. 7.

Observație: Toate răspunsurile la semnal treaptă se vor determina în intervalul de timp $[0, 0.2\text{sec.}]$.

II- Calculul parametrilor regulatorului utilizând criteriul modulului

II.1 Se va calcula regulatorul buclei de curent pe baza criteriului modulului.

III- Studiul comportării temporale a buclei acordate după criteriul modulului

III.1 Se va deduce răspunsul buclei la o treaptă egală cu 10, aplicată referinței, în situația când rotorul este calat. Se compară rezultatul cu răspunsul din fig. 8.

III.2 Se va deduce răspunsul buclei la o treaptă egală cu 10, aplicată referinței, în situația când rotorul este liber (deci, motorul se pune în mișcare). Se compară rezultatul cu răspunsul din fig 10.

IV- Calculul parametrilor regulatorului utilizând criteriul simetriei

IV.1 Se va calcula regulatorul buclei de curent pe baza criteriului simetriei (optimului simetric).

V- Studiul comportării temporale a buclei acordate după criteriul simetriei

V.1 Se consideră sistemul cu structura din fig.12. Se va deduce răspunsul buclei la o treaptă egală cu 10, aplicată la intrarea filtrului, în situația când rotorul este liber. Se compară rezultatul cu răspunsul din fig 13

4. Concluzii

Se vor menționa concluziile privind următoarele aspecte:

- comportarea procesului la comanda în circuit deschis și la comanda în circuit închis;
- performanțele unei bucle în care regulatorul este acordat după criteriul modulului;
- performanțele unei bucle în care regulatorul este acordat după criteriul simetriei.

Programul prin care se realizează lucrarea

%program unitar de studiu ai unei bucle de reglare a curentului la un motor de cc

% raspunsul la semnal treapta al procesului reglat

clear all; clg;

%parametrii procesului

R=1; L=0.025; tau=0.0033; J=0.08; f=0; K=0.5; KTr=1; TTr=0.005; Kc=10;

Te=L/R;

[n1,d1]=pade(tau,10); s1=Kc*tf(n1,d1);

n2=[1/R]; d2=[Te 1]; s2=tf(n2,d2);

n3=[KTr]; d3=[TTr 1]; s3=tf(n3,d3);

s_proc=s1*s2*s3;

t=[0:0.0001:0.2];

y=step(s_proc,t);

figure(1);

plot(t,y); grid;

pause;

%calculul regulatorului buclei de curent, in situatia cand rotorul este calat

Tsig=tau+TTr; Kp=(1/R)*Kc*KTr;

Ti=Te

Kr=Te/(2*Tsig*Kp)

pause;

%simularea buclei in ipoteza ca rotorul este calat

s_reg=tf(Kr*[Ti 1],[Ti 0]);

sys=feedback(s_reg*s_proc,1);

y=step(sys,t);

y=10*y;

figure(2);

plot(t,y); grid;

pause;

%simularea buclei in ipoteza ca rotorul este liber

s4=tf([1],[J 0]);

s2=feedback(s2,K*s4*K);

s_proc=s1*s2*s3;

sys=feedback(s_reg*s_proc,1);

y=step(sys,t);

y=10*y;

figure(3);

```
plot(t,y);grid;  
pause;
```

```
%calculul buclei de curent pe baza criteriului simetriei  
Ti=Te  
Ti1=4*Tsig  
Te/(2*Tsig*Kp)
```

```
%simularea buclei cu regulatorul calculat cu criteriul simetriei  
s_reg=tf(Kr*[Ti 1],[Ti 0])*tf([Ti1 1],[Ti1 0]);  
s_filtru=tf([1],[4*Tsig 1]);  
sys=s_filtru*feedback(s_reg*s_proc,1);  
y=step(sys,t);  
y=10*y;  
figure(4);  
plot(t,y);grid;
```