

KASKADNA REGULACIJA USMERNIŠKIH POGONOV

Dušan Hudnik

1. Uvod

V elektromotornih usmerniških pogonih se zelo pogosto uporabljajo kaskadne vezave pri regulaciji vrtilne hitrosti. S tako zgradbo regulacijskega kroga lahko hkrati reguliramo več veličin, ki nastopajo v samem sistemu. Omejili se bomo na izvedbo, ki v glavnem t.j. zunanjem regulacijskem krogu "skrbi" za vrtilno hitrost n , v notranjem (sekundarnem) pa za velikost toka I v rotorju motorja. Praksa kaže, da je najbolj primerno vzeti zaradi cene in enostavnosti enaka regulatorja s PI karakteristiko. Tako sestavljena regulacija pokriva široko področje zahtev elektromotornih pogonov.

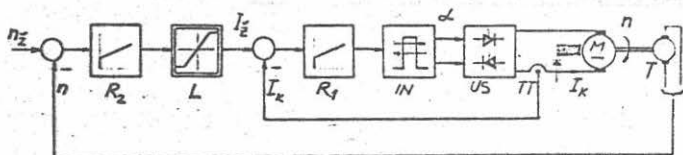
V članku želimo analizirati vpliv kombinacije simetričnih in nesimetričnih nelinearnosti na dinamiko regulacijskega kroga, če je bil ta optimiran z "orodjem" poznanim iz linearne teorije regulacij. Za teoretično obravnavo analize nelinearnega sistema so bile uporabljene metode z opisno funkcijo t.j. grafične in analitične.

Rezultati oziroma časovni diagrami bodo posneti s pomočjo analognega in digitalnega računalnika. Namen uporabe digitalnega simulacijskega programa (DSP) je ta, da nam lahko izpiše istočasno osem izhodov tabelarično ali registrira največ tri izhode grafično in štiri tabelarično. S tem nam je dana možnost na enostaven način spremljati dogajanja v samem regulacijskem krogu. Tako enostavno kot analogni, dopušča tudi DSP spreminjanje parametrov členov med samim simulacijskim tekom.

2. Izvedbe

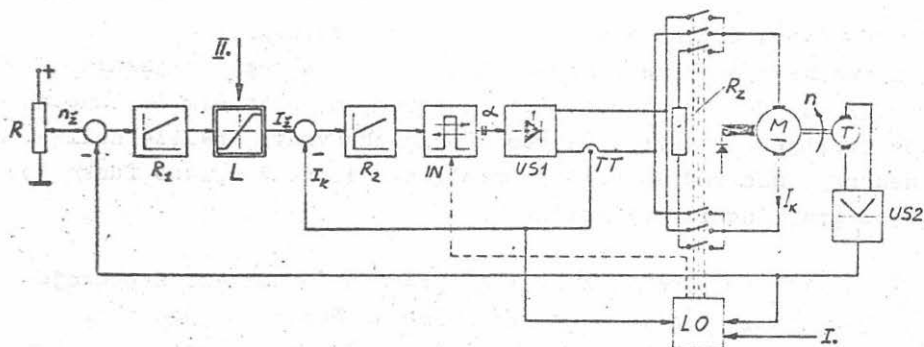
Za kakšen koncept kaskadne regulacije se bomo odločili je predvsem odvisno od specifičnosti elektromotorne pogona. Tako ločimo reverzirne - štirikvadrantne, enokvadrantne (sl.

1 a, b) in enokvadrantne s preklopom kotve (sl. 2).



Sl. 1 a,

- a) R_1, R_2 -PI regulator, M -tuje vzbujani motor, T -enosmerni tačo generator, TT -enosmerni tokovni transformator, IN -impulzna naprava, L -omejevalnik toka kotve, US -polnokrmiljeni usmerniški skupini v protivzporedni vezavi za štirikvadrantno obratovanje.
- b) US -polno ali polkrmiljeni usmernik za enokvadrantni pogon, ostalo enako kot pod tč. a).



Sl. 2

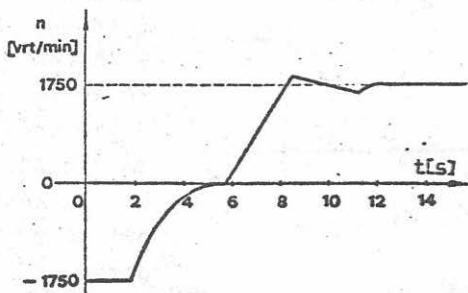
- R_1, R_2 -PI regulator, M -tuje vzbujani enosmerni motor, T -enosmerni tačo generator, TT -enosmerni tokovni transformator, IN -impulzna naprava, L -omejevalnik toka v rotorju, $US1$ -polkrmiljeni enofazni usmernik, $US2$ -usmernik za pravo polariteto merjene veličine, LO -logično vezje, R_2 -zaviralni upor, R -potenciometer za nastavljanje n_z v levo ali v desno smer, II .-nastavljanje maksimalnega toka v rotorju, I .-povelje za spremembo smeri vrtenja.

Z ozirom na kasnejšo obravnavo konkretnih izvedb s sl. 1 si podrobneje oglejmo le izvedbo s sl. 2. Kaskada je bila optimirana po kriteriju λ_{\max} v Bodejevem in Nicholsovem diagramu s predpostavko, da je $L = 1$ in da so prisotni tudi negativni momenti zaradi bremena, t.j. kot linearni regulacijski sistem in sicer zunanji ter notranji regulacijski krog ločeno /2/. Tako dobljeni parametri regulatorjev so se za notranji regulacijski krog dobro ujemali s kasneje nastavljenimi na realnem modelu, za zunanji regulacijski krog pa je bilo potrebno glede na zahtevane dinamične lastnosti regulacije parametre ustrezno korigirati. Vzrok lahko pripisujemo neupoštevanju nelinearnosti, ki izhaja iz samega koncepta regulacije in zanemaritvi vpliva omejevalnika toka kotve, ki daje notranjemu regulacijskemu krogu želeno vrednost I_z . V splošnem ima omejevalnik še pomembnejšo vlogo. Z njim ščitimo kolektor motorja. Saj z ustrezno nastavitvijo lahko nazivno obremenjen motor zaženemo od vrtilne hitrosti $n = 0$ do $n = n_n$ s konstantnim tokom kotve ne da bi pri tem prekoračili maksimalni dopustni tok v rotorju motorja.

Enokvadrantni usmerniški elektromotorni pogon s preklopom kotve ima v primerjavi s štirikvadrantnim veliko slabše dinamične lastnosti. Pojavi se določen mrtvi čas T_m , saj v tem primeru pri reverziranju ni možno vračati energije v omrežje. Moramo jo uničevati na zaviralnem upor R_z . Pri spremembi nazivne vrtilne hitrosti iz smeri levo na nazivno vrtilno hitrost v smer desno ta upada po eksponencialni krivulji. Časovna konstanta T_m je odvisna od velikosti R_z , zaviralnega momenta M_b (v praznem teku ga določajo ventilacija, trenje in izgube v železu rotorja) ter od vztrajnostnih mas.

Sl. 3 kaže reverziranje prazno tekočega motorja moči 2 kW od $-n = 1750$ v/min na $+n = 1750$ v/min, $T_m \approx 2$ sek.

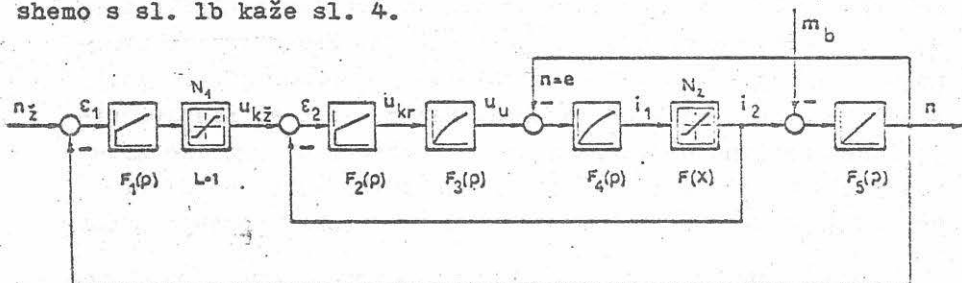
Sl. 3



Element IO na sl. 2 skrbi, da ne vežemo kotve na kratko. Ko pride povelje na IO za preklon, ta istočasno zapre usmernik US1 preko impulzne enote IN, odklopi kotvo in jo veže na upor R_2 . Pri tem meri tok kotve in ko ta zavzame vrednost nič izvrši vklop kotve z obratno polariteto na usmernik, ki ga odpre preko IN.

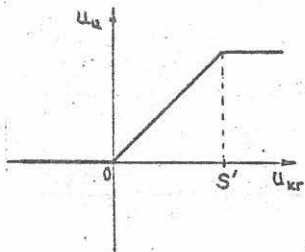
3. Enokvadrantni usmerniški pogon

Pri podrobni analizi fizikalne slike delovanja tega pogona lahko zaključimo, da kaskada ne predstavlja več linearne- ga temveč nelinearni regulacijski krog. Ustrezno blokovno shemo s sl. lb kaže sl. 4.



Sl. 4

Zaradi delovanja usmernika lahko teče tok i_2 samo v eno smer negativnega toka ne bo, saj edini možni zaviralni moment je moment ventilacije, trenja ter zaradi izgub v železu rotorja. Torēj nelinearnost izhajā iz samega usmernika s statično karakteristiko na sl. 5.



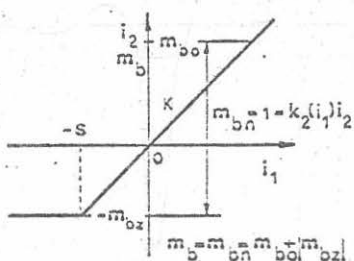
Sl. 5

Ta nesimetrična nelinearnost je še posebno izrazita pri velikih kotih α zakasnitve vžiganja ventilov, t.j. ko se začne tok na bremenu trgati. V tem primeru se nahaja delovna točka v bližini izhodišča karakteristike. Tako napajani enosmerni motor bo pri nizki vrtilni hitrosti postal za pogon neuporaben. Prične se zaganjati. V praksi si delovno točko izbere-

mo nekje na sredini karakteristike - v linearnem delu. Tako prēj omenjenega pojava ne bo in lahko usmernik ponazorimo z linearnim členom. Razumljivo je, da ni potrebno upoštevati nasičenja, saj imamo s primernim dimenzioniranjem usmernika navzgor še rezervo.

Preostane nam določitev mesta nelinearnemu členu v regulacijskem krogu. Ugotovili smo, da tok kotve mora teči kot $-i_2$, tok i_2 pa pošiljamo v motor, bo edino pravo mesto nesimetričnemu nelinearnemu členu kot je narisano v blokovni shemi na sl. 4.

Na regulacijski krog delujeta motilni veličini m_0 in n_z , zato se statična karakteristika s sl. 5 spremeni v statično karakteristiko na sl. 6. Saj se v trenutku nastopa motilne



Sl. 6

veličine na regulacijski krog v njem pojavi enosmerna komponenta x_0 , ki v bistvu premakne delovno točko na omenjeni karakteristiki oz. ji premakne koordinatno izhodišče. Enako statično karakteristiko imamo tudi če upoštevamo, da motor v praznem teku ima že določen moment vsled ventilacije, trenja in

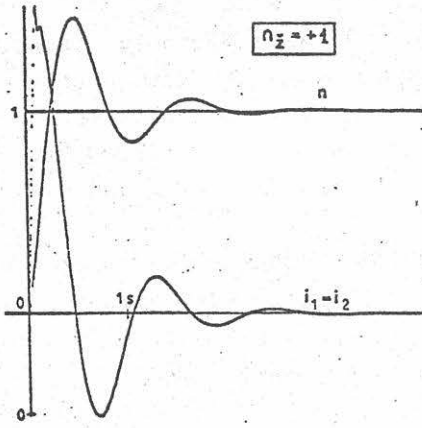
izgub v železu rotorja.

3.1 Primer

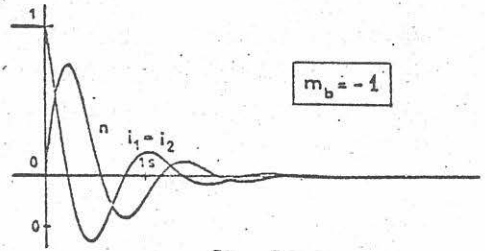
Na analognem računalniku smo modelirali regulacijski krog s sl. 4. Vpliv enosmerne komponente x_0 so nam potrdili časovni poteki na sl. 7 do sl. 12. PI regulatorja sta bila optimirana s kriterijem λ_{\max} v Bodejevem in Nicholsevem diagramu.

Regulatorja R imata prenosno funkcijo $F(p) = K_n(1+pT_{ip})/pT_{ip}$.

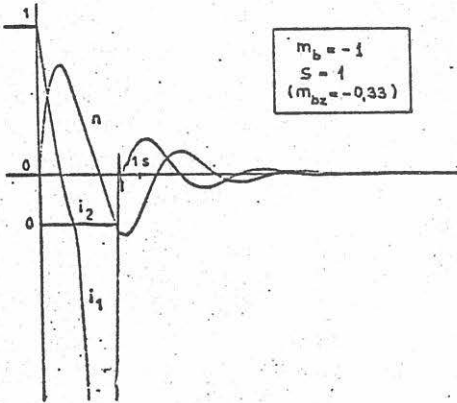
Regulator R_1 : $K_{p1} = 0,56$ in $T_{ip1} = 0,06$ s, ($\varphi_d = 0,017$;



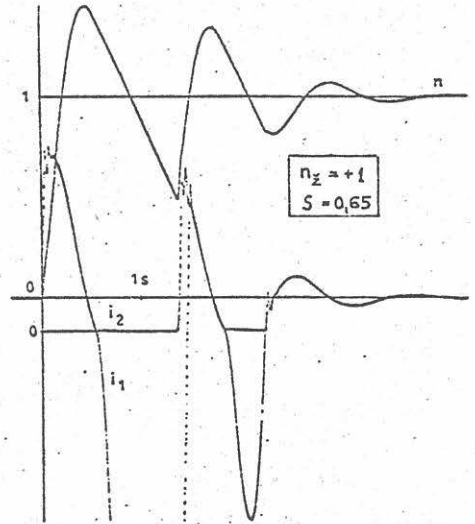
Sl. 7



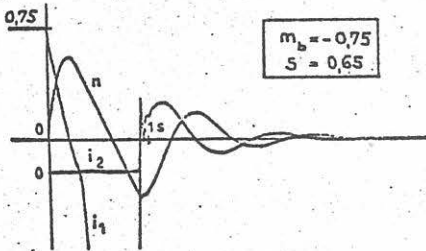
Sl. 8



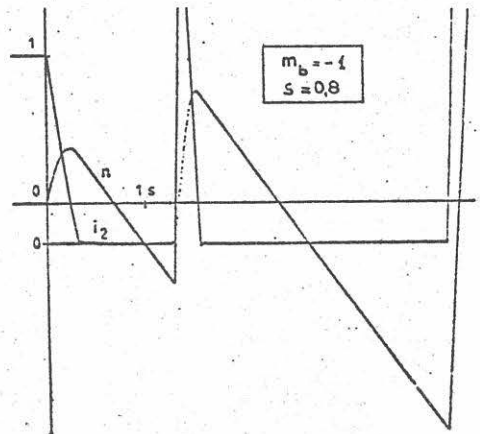
Sl. 9



Sl. 10



Sl. 11



Sl. 12

$\omega_{rz} \doteq 80 \text{ s}^{-1}$, $\lambda_{\max} = 3,5 \text{ dB}$; regulator $R_2 : K_{p2} = 4,33$,
 $T_{p2i} = 1,41 \text{ s}$ ($\varphi_d = 0,16$; $\omega_{rz} \doteq 110 \text{ s}^{-1}$, $\lambda_{\max} = 2,3 \text{ dB}$);
 ostale prenosne funkcije: $L = 1$; $F_3 : K_3 = 1$, $T_3 = 0,02 \text{ s}$;
 $F_4 : K_4 = 2,5$; $T_4 = 0,05 \text{ s}$ in $F_5 : T_5 = 0,3 \text{ s}$.

Za $\lambda_{\max} = 3,5 \text{ dB}$ in $\varphi_d = 0,017$ za glavni regulacijski krog smo se odločili zato, ker je bil sistem optimiran za $\lambda_{\max} = 2,3 \text{ dB}$ in $\varphi_d = 0,1$ preveč dušen in vpliv nelinearnega člena sl. 6 ni bil tako izrazit. Za tako optimirano kaskadno regulacijo smo z upoštevanjem nelinearnosti s sl. 6 narisali frekvenčno karakteristiko za faktor dušenja $z = 0$ in ustrezne opisne funkcije v kompleksni ravnini. Izkazalo se je, da regulacijski krog predstavlja neavtonomen sistem.

Iz časovnih potekov ugotovimo, da za manjši iznos točke nasičenja $-S$ nelinearnega člena postane regulacijski krog hitreje nestabilen in obratno. Z večanjem vrednosti m_{bz} se približujemo časovnemu poteku linearne regulacije. (sl. 7 in sl. 8). Za $m_{bz} = m_{b0}$ imamo že linearno regulacijo. Regulacijski krog postane nestabilen za vse vrednosti $m_{b0} > |0,69|$ (sl. 12). Vzrok lahko iščemo v dolžini trajanja toka $i_2 = 0$ (nadmestni mrtvi čas - T'_m). Čim daljši je T'_m bolj "živ" postaja sistem. Z gledišča linearne regulacije prinese mrtvi čas v regulacijski krog negativni fazni zaostanek $\varphi = -360^\circ$. Ker pa ima sam regulacijski krog že določen negativni fazni zaostanek potem ni potrebno več dodatnega, da bo ta zanihal. Kmalu lahko prekoračimo kritično točko $\varphi = -180^\circ$ in $\alpha = 1$. Torej obstaja zveza med T'_m in x_0 . Večji je x_0 daljši bo T'_m in obratno.

Iz nelinearne teorije regulacij, ki obravnava nesimetrične nelinearnosti z opisno funkcijo je znano, da vsaka zunanja motilna veličina, ki vpliva na regulacijski krog, povzroči na vходу v nelinearni člen enosmerno komponento x_0 . Ta se preko sistema in povratnih zvez prenaša po celem regulacijskem krogu. To pomeni, da nam na lineariziranih karakteristikah linearnega in nelinearnega dela regulacijskega kroga

premika delovne točke. Za primer vzemimo razbremenitev $-m_b$, ki povzroči povečanje vrtilne hitrosti n . Na izhodu se pojavi enosmerna komponenta $+x_0$, ki ima na vходу regulacijskega kroga in nelinearnega člana negativni predznak. Delovna točka se je tako spremenila, da ostane tok $i_2 = 0$ toliko časa, dokler ne zavzame x_0 vrednost nič. Kompenzacija x_0 se prične z vpadanjem vrtilne hitrosti n , t.j. ko n začne dobiti negativno vrednost gledano s strani delovne točke. Čas kompenzacije pa je ravno čas T_m' (glej časovne poteke).

3.2 Primer

Regulacijski krog s sl. 4 in podatki iz primera 3.1, $L \neq 1$ ima karakteristično enačbo.

$$1 + (F_2 F_3 F_4 + F_4 F_5) N_2 + F_1 F_2 F_3 F_4 F_5 N_1 N_2 = 0 \quad (1)$$

Ugotoviti želimo, če bo regulacijski krog stabilen in kako vpliva omejevalnik toka kotve na stabilnost regulacijskega kroga.

Z vstavitvijo prenosnih funkcij dobimo

$$p^5 0,000026 + p^4 0,00175 + p^3 0,0017 + (p^3 0,356 + p^2 0,275)\alpha + (p^2 0,516 + p 8,92 + 6,065)\beta = 0 \quad (2)$$

$$\alpha = N_2 \quad \text{in} \quad \beta = N_1 N_2 = N \quad (3)$$

V en. 2 vstavimo za p izraz $p = -\omega z + j\omega\sqrt{1-z^2}$ oz. za $z = 0$ vstavljamo $p = j\omega$ in izračunamo parametre kompleksne ravnine α in β . Z drugimi besedami povedano izračunamo imaginarni del α in realni del β karakteristične enačbe

$$\alpha = \frac{\omega^4 0,000026 - \omega^2 0,0017 + 8,92}{\omega^2 0,356} \quad (4)$$

$$\beta = \frac{\omega^4 0,0006 + \omega^2 0,000026 - 0,0017}{\omega^2 0,184 + 3,81} \quad (5)$$

Nelinearnost $N = N_1 N_2$ iz en. 1 predstavljata v serijo vezani nelinearnosti N_1 in N_2 . S premislekom ju lahko nadomestimo z novo, ki jo kaže sl. 13.

Opisno funkcijo $N_2'(A, x_0)$ podaja en. 6 s sl. 6 $N_1'(A, x_0)$ podaja en. 7 s sl. 13.

$$N_2(A, x_0) = \frac{K}{2} + \frac{K}{\pi} \left[\frac{S+x_0}{A} \sqrt{1 - \left(\frac{S+x_0}{A}\right)^2} + \arcsin \frac{S+x_0}{A} \right] \quad (6a)$$

$$F_{02}(A, x_0) = \frac{Kx_0}{2} + \frac{K}{\pi} \left[A \sqrt{1 - \left(\frac{S+x_0}{A}\right)^2} + (S+x_0) \arcsin \frac{S+x_0}{A} \right] \quad (6b)$$

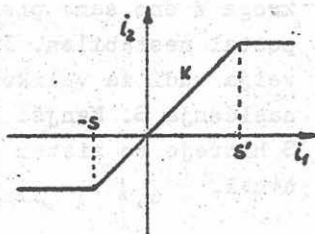
$$N(A, x_0) = \frac{K}{2} \left[\arcsin \frac{S'-x_0}{A} + \arcsin \frac{S+x_0}{A} + \frac{S'-x_0}{A} \cdot \right.$$

$$\left. \sqrt{1 - \left(\frac{S'-x_0}{A}\right)^2} + \frac{S+x_0}{A} \sqrt{1 - \left(\frac{S+x_0}{A}\right)^2} \right] \quad (7a)$$

$$F_0(A, x_0) = \frac{K}{\pi} \left\{ (S+x_0) \arcsin \frac{S+x_0}{A} - (S'-x_0) \arcsin \frac{S'-x_0}{A} + \right.$$

$$\left. + \left[A \sqrt{1 - \left(\frac{S+x_0}{A}\right)^2} - \sqrt{1 - \left(\frac{S'-x_0}{A}\right)^2} \right] \right\} \quad (7b)$$

Z ustrezno frekvenčno karakteristiko za $z=0$ in opisnima funkcijama izračunanima iz en. 6 in en. 7, ter narisanimi v kompleksni ravnini smo ugotovili, da je regulacijski sistem stabilen.

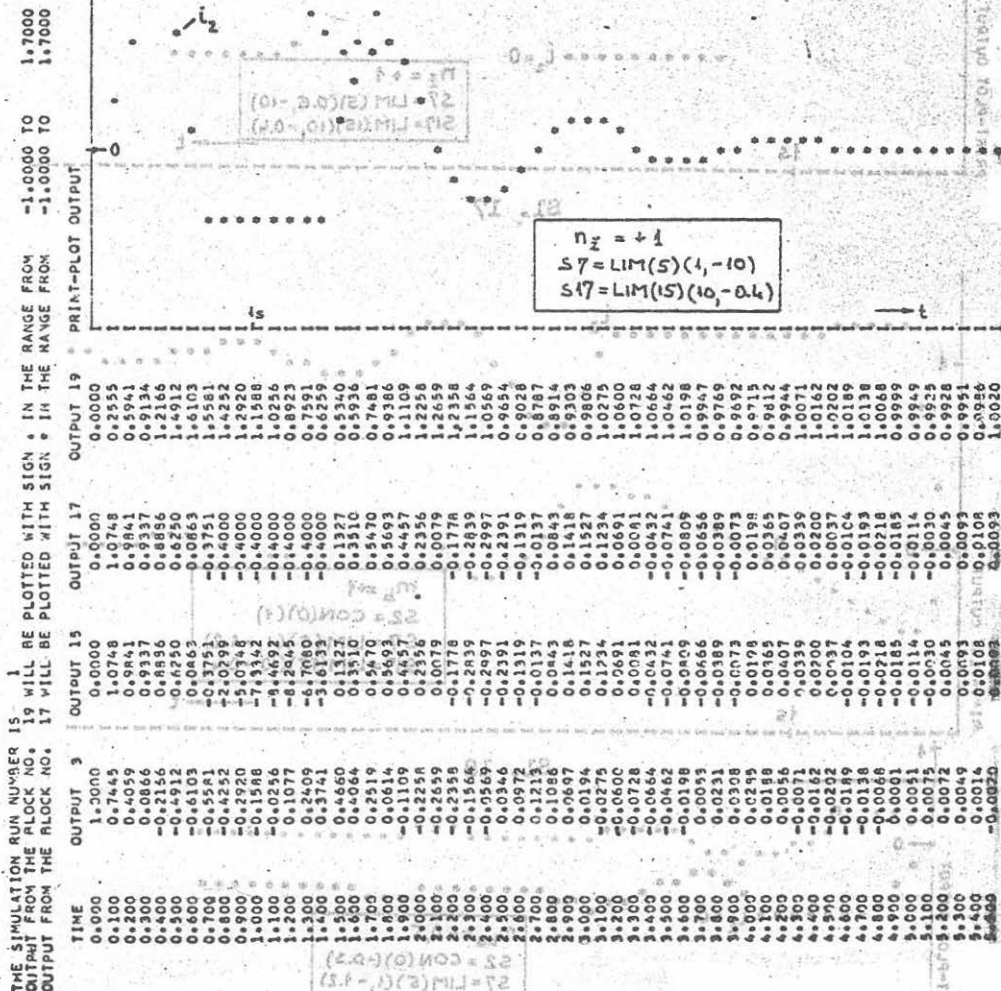


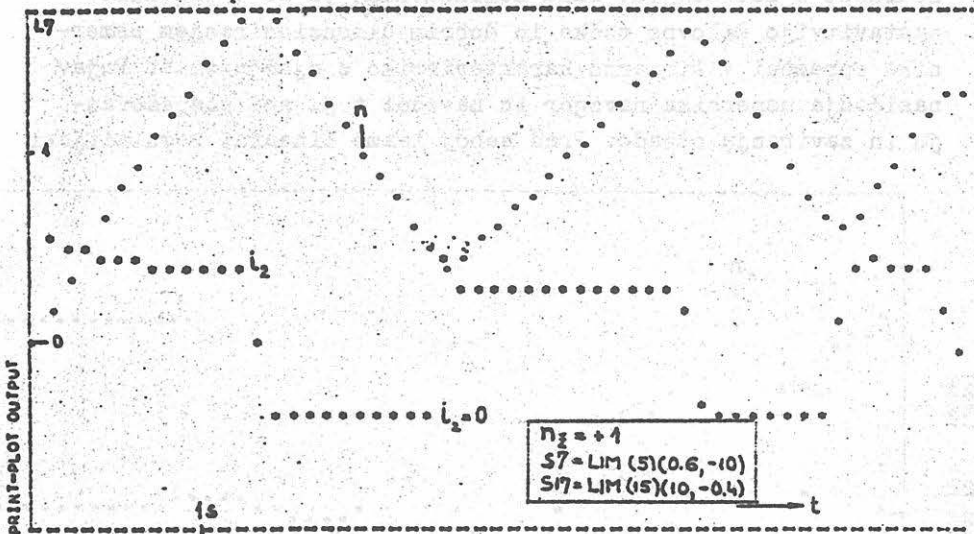
Sl. 13

Iz časovnih potekov na sl. 16 do sl. 19 lahko ugotavljamo vpliv omejevalnika toka na potek regulirane veličine. Izkaže se, da optimirani krog po kriteriju λ_{\max} da zadovoljive rezultate, samo za skočno spremembo vrtilne hitrosti ($+n_z$ in $-n_z$) in obremenitve ($+m_{b0}$). Pri razbremenitvi pos-

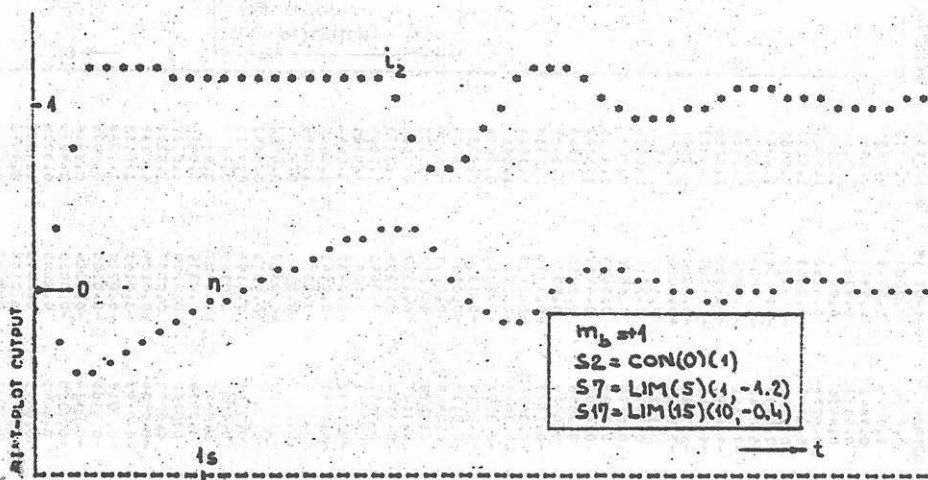
Vpliv nasičenj S in S' na dinamično obnašanje regulacijskega kroga smo raziskovali na digitalnem računalniku IBM 1130 s pomočjo DSP-ja (Digitalni simulacijski program) /3/. Ustrezno računalniško shemo regulacijskega kroga s sl. 4 kaže sl. 14, program pa sl. 15.

nearnost z nasičenjem. Taka nelinearnost pa se s pravilno nastavitvijo delovne točke in dobrim dimenzioniranjem usmernika spremeni v linearno karakteristiko z ojačenjem K. Pojav nasičenja usmernika navzgor in navzdol t.j. pri pospeševanju in zaviranju odpade. Pred seboj imamo linearni regulacijski

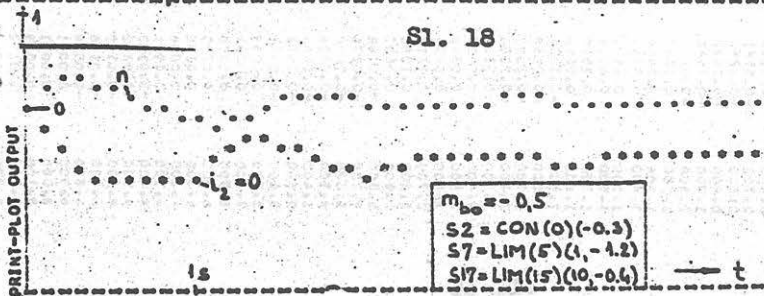




Sl. 17



Sl. 18



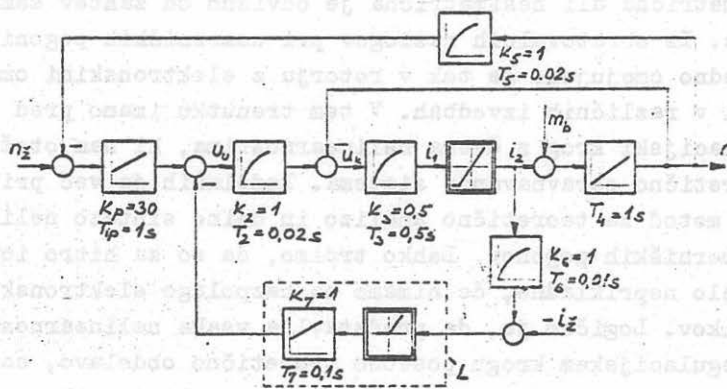
Sl. 19

Krog ($K = 1$). V primeru $L \neq 1$ pa nazivni tok i_2 motorju določa omejevalnik toka na izhodu regulatorja glavnega regulacijskega kroga. Torej rabi omejevalnik za referenco notranjemu regulacijskemu krogu. Za tako kaskadno regulacijo, ki vsebuje samo simetrično linearnost za nastavljanje toka kotve i_2 pa časovni poteki n dobljeni z optimiranimi PI-regulatorjema po kriteriju λ_{\max} in $L = 1$ dobro ustrezajo v primerjavi s časovnimi poteki ko je $L \neq 1$.

Napravljene so bile tudi raziskave vpliva sprememb parametrov posameznih regulatorjev na potek vrtilne veličine n .

5. Dodatno krmiljenje

Idejo kaže shema na sl. 21.



Sl. 21

To je v bistvu enozančna regulacija vrtilne hitrosti. S krmilnim tokokrogom vplivamo na velikost toka kotve preko nelinearnega elementa s statično karakteristiko s sl. 5 ($S = \infty$).

Parametri sistema so bili izbrani zelo neugodno. Časovna konstanta zaradi vztrajnostnih mas in električne časovne konstante so bile blizu skupaj. Upoštevali smo tudi filtre v povratni in krmilni veji, katerim se na realnem modelu ne moremo izogniti.

Regulacijski krog je bil optimiran po kriteriju "optimuma iznosa" /9/. Raziskave na digitalnem računalniku so pokazale, da je optimirana vrednost regulatorja K_p premajhna za približno 50%. V dinamičnem pogledu, če primerjamo časovne poteka s kaskado, so ti celo bolj ugodni. Kaže se večja dušenost sistema. Težava je le v praktičnem nastavljanju referenčne vrednosti krmiljenja, to je omejitve toka. Pri kaskadni regulaciji smo omejitve lahko pred štartom motorja nastavili na inštrumentu, v tem primeru tega ni mogoče. V pogledu cene je ta izvedba cenejša. Prihranimo en PI-regulator.

6. Zaključek

Usmernik v elektromotornem pogonu prinaša zaradi svojih karakteristik v regulacijski krog določeno nelinearnost. Če je to simetrična ali nesimetrična je odvisno od zahtev samega pogona. Iz obratovalnih razlogov pri usmerniških pogonih skoraj vedno omejujemo še tok v rotorju z elektronskimi omejevalniki v različnih izvedbah. V tem trenutku imamo pred seboj regulacijski krog z dvema nelinearnostima, ki nam otežujeta teoretično obravnavanje sistema. Izdelanih je več približevalnih metod za teoretično analizo in delno sintezo nelinearnih usmerniških pogonov. Lahko trdimo, da so za hitro inženirsko delo neprikladne, če nimamo na razpolago elektronskih računalnikov. Logično je, da predstavlja vsaka nelinearnost zase v regulacijskem krogu posebno teoretično obdelavo, saj ni poznane univerzalne metode za reševanje nelinearnih enačb.

V članku so obravnavani nekateri najbolj pogosti in značilni primeri usmerniških pogonov. Analize kažejo, da lahko z uporabljenimi metodami pričakujemo dovolj dobre rezultate v primeru štirikvadrantnega pogona, medtem ko pri enokvadrantnem pogonu teoretični rezultati za določena obratovalna stanja, predvsem pri razbremenitvah precej odstopajo od izmerjenih oziroma določenih na računalniku.

7. Literatura

1. Cajhen R.: Regulacije, Univerzitetna založba, Ljubljana, 1971

2. Cajhen R.: Optimiranje kaskadnih regulacij, EV, Ljubljana 1969, št. 11-12, str. 265-268
3. Divjak S.: Digitalni simulacijski program - DSP - IBM 1130, Fakulteta za elektrotehniko, Ljubljana, 1971
4. Hudnik D.: Dinamika sistemov z nesimetričnimi nelinearnostmi pri usmerniških pogonih, magistrsko delo, Fakulteta za elektrotehniko, Ljubljana, 1971
5. Jackson D.R.: Oscillations in Single convertor drives, Proceedings IEE, Vol.116, No.4, april 1969, P.633-638
6. Gelb A.: Limit Cycles in Symmetric Multiple Nonlinearity Systems, IEEE Trans. on Automatic Control, April 1963, P. 177 - 178
7. Gran R., Rimer M.: Stability Analysis of Systems with Multiple Nonlinearities, IEEE Trans. on Automatic Control, January 1965, P. 94 - 96
8. Gibson J.E.: Nonlinear Automatic Control, Mc Graw - Hill Book Company, New York, 1963
9. Kessler C.: Über die Vorausberechnung optimal abgestimmter Regelkreise, Regelungstechnik 12 (1954), 2(1955)
10. Popow P., Paltow J.: Näherungsmethoden zur untersuchung Nichtlinearer Regelungssysteme, Akademische Verlags gesellschaft Geet u. Portig K. - G., Leipzig 1963
11. Šiljak D.: Nonlinear Systems, John Wiley and Sons, Inc. New York, 1969
12. Šiljak D.: Analysis of Asymmetrical Nonlinear Oscillations in the Parameter Plane, IEEE Trans. on Automatic Control, Vol - AC 11, No 2, april 1966, P. 239 - 247
13. Jagodič F.: Usmerniške naprave v elektroenergetiki, Univerzitetna založba, Ljubljana, 1971
14. Podlesnik B.: Diplomsko delo, Fakulteta za elektrotehniko, Ljubljana, štev. 1606/69
15. Teodorescu D.: Berechnung von Regelkreisen mit mehreren Nichtlinearitäten durch die Methode der Beschreibungsreihen, Regelungstechnik, Heft 6, 1971, s. 245 - 250
16. Teodorescu D.: Describing - function series: a new means for nonlinear - control - system analysis, Proc. IEE, Vol. 117, No. 11, 1970, p. 2175-2180

Avtor: Asistent mag. Dušan Hudnik, dipl. ing.,
Fakulteta za elektrotehniko v Ljubljani

1. ...
2. ...
3. ...
4. ...
5. ...
6. ...
7. ...
8. ...
9. ...
10. ...
11. ...
12. ...
13. ...
14. ...
15. ...
16. ...
17. ...
18. ...
19. ...
20. ...
21. ...
22. ...
23. ...
24. ...
25. ...
26. ...
27. ...
28. ...
29. ...
30. ...
31. ...
32. ...
33. ...
34. ...
35. ...
36. ...
37. ...
38. ...
39. ...
40. ...
41. ...
42. ...
43. ...
44. ...
45. ...
46. ...
47. ...
48. ...
49. ...
50. ...
51. ...
52. ...
53. ...
54. ...
55. ...
56. ...
57. ...
58. ...
59. ...
60. ...
61. ...
62. ...
63. ...
64. ...
65. ...
66. ...
67. ...
68. ...
69. ...
70. ...
71. ...
72. ...
73. ...
74. ...
75. ...
76. ...
77. ...
78. ...
79. ...
80. ...
81. ...
82. ...
83. ...
84. ...
85. ...
86. ...
87. ...
88. ...
89. ...
90. ...
91. ...
92. ...
93. ...
94. ...
95. ...
96. ...
97. ...
98. ...
99. ...
100. ...

...
...