

UTICAJ OGRANIČENE REZOLUCIJE DAVAČA POLOŽAJA NA PONAŠANJE BRZINSKOG SERVOMECHANIZMA

Milun Perišić, *Elektrotehnički fakultet Univerziteta u Beogradu*

Sadržaj - Savremeni brzinski servomehanizmi zahtevaju visoke vrednosti propusnog opsega brzinske petlje, naročito kada se primenjuju alatne mašine sa laserskim sečenjem i sečenjem pomoću vodenog mlaza.

Visok propusni opseg sistema sa zatvorenom povratnom spregom zahteva velika proporcionalna i integralna kružna pojačanja. S druge strane, porast pojačanja povećava šum koji postoji u referentnom signalu brzine, i na taj način doprinosi povećanju gubitaka snage i slabim performansama. Prema tome, treba napraviti kompromis između potrebe za postizanjem velikog propusnog opsega i neophodnosti postojanja niskog, prihvatljivog sadržaja šuma. U ovom radu je predložen kompjuterski model brzinskog servosistema, pogodnog za simulaciju gore navedenog izbora.

Ključne reči: brzinski servomehanizam / propusni opseg / asinhroni motor / simulacija

1. UVOD

Savremene primene elektromotornih servoaktuatora u oblasti alatnih mašina, robotike i uopšte uzevši automatizacije u industriji zahtevaju visoke vrednosti propusnog opsega brzinskih i pozicionih servoregulatora. Kratko vreme reagovanja, visoka preciznost i ponovljivost zahtevaju kvalitetne senzore brzine i položaja, savremene algoritme za upravljanje kretanjem kao i mogućnost za brzo i tačno upravljanje elektromagnetnim momentom servomotora. Ovakve performanse zahtevaju se pre svega u slučajevima kada se materijal obrađuje i seče vodenim mlazom ili laserskim snopom, pa naknadna dorada nije moguća.

Visok propusni opseg implicira primenu visokih vrednosti kružnog pojačanja. U slučaju konvencionalnog PI regulatora brzine detektovana brzinska greška biva pomnožena koeficijentom proporcionalnog pojačanja K_p i u sadejstvu sa integralnom akcijom regulatora definiše vrednost zadatog elektromagnetnog momenta. Kako integrator ima niskopropusna svojstva, to će visokofrekventni šum, prisutan u signalu brzinske greške, biti prenesen na elektromagnetni momenat prvenstveno zahvaljujući proporcionalnom dejstvu. Praktična upotreba servoaktuatora iziskuje minimizaciju visokofrekventnih komponenti i šuma u elektromagnetnom momentu, jer ovi činioci dovode do neželjenog zagrevanja motora kao i do odstupanja u brzini i položaju. Iz ovih razloga prisustvo šuma u signalu greške ograničava proporcionalno pojačanje i propusni opseg servopetlje.

U okviru ovog rada analizira se uticaj rezolucije osovinskog senzora na dozvoljeni opseg promene koeficijenta proporcionalnog pojačanja i na rezultujući propusni opseg.

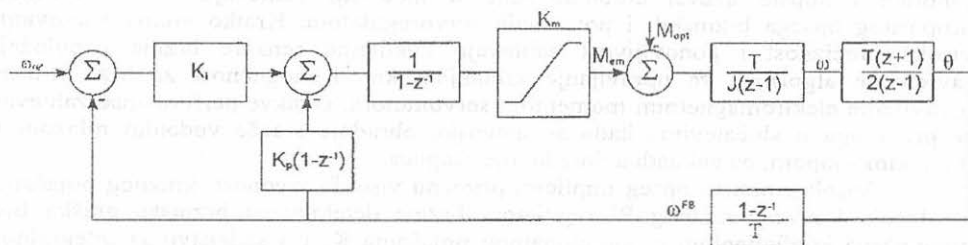
U drugom delu rada dat je analitički pristup određivanju parametara regulacije. Usvajajući kao imperativ aperiodičnost odziva i specificirajući minimalno vreme odziva kao kriterijum za izbor parametara regulacije, dolazi se do optimalnih vrednosti pojačanja koja će kod proizvodnog servosistema obezbediti aperiodičan odziv maksimalne brzine.

U trećem delu je sa optimalnim vrednostima pojačanja, načinjen dinamički model idealizovanog servosistema i ispitan u si nulacionom jeziku TUTSIM.

U četvrtom poglavlju razmatran je uticaj ograničene rezolucije osovinog senzora na sadržaj šuma u signalu brzinske greške. Pri ovome je razrađen i pristup modelovanju efekata ograničene rezolucije na signal povratne sprege po brzini. Utvrđeno je da su dozvoljene vrednosti koeficijenta proporcionalnog pojačanja znatno manje od optimalnih vrednosti određenih za idealizovani sistem. Polazeći od pretpostavke da nivo šuma u elektromagnetskom momentu nesme preći 1% nazivne vrednosti momenta utvrđena je gornja granica koeficijenta proporcionalnog pojačanja koji može biti primenjen. Za konkretnu vrednost rezolucije osovinog senzora optimizirana je i vrednost koeficijenta integralnog dejstva i za ovako definisan sistem utvrđen propusni opseg.

2. REGULATOR BRZINE

Posmatrani brzinski servomehanizam je ostvaren sa vektorski kontrolisanim asinhronim motorom koji se napaja iz strujno regulisanog naponskog invertora. Kod ovakvog sistema, vreme odziva elektromagnetskog momenta motora se može zanemariti u odnosu na vremensku konstantu uspostavljanja brzine mehaničkog podsistema [1]. S obzirom na to da se želi eliminacija greške stacionarnog stanja kako u prisustvu konstantnog referentnog signala brzine, tako i usled dejstva konstantnog momenta opterećenja na vratilu motora, u servomehanizmu je primenjen konvencionalni PI regulator u inkrementalnoj formi. Proporcionalno dejstvo je u kolu lokalne povratne sprege da bi se izbegla skokovita promena upravljačke promenljive pri zadavanju novih stacionarnih vrednosti brzine [2]. Strukturni blok dijagram je prikazan na slici 1.



Slika 1. Strukturni blok dijagram digitalnog sistema za regulaciju brzine vektorski upravljanog asinhronog motora

Nelinearni blok K_m modeluje ograničeni kapacitet strujnog invertora. Idealizovani dinamički model se može izvesti sa jediničnim nagibom u linearnom režimu rada strujnog invertora i K_m tada direktno utiče na vrednosti parametara PI regulatora. Tada se može reći da je uspostavljanje momenta u n -toj periodi posledica prethodnih veličina i rada regulatora u prethodnim trenucima:

$$M_{em_n} = M_{em_{n-1}} + \Delta M_{em_n} \quad (2.1)$$

Povratna sprega po brzini izračunava se preko inkrementa pozicije, iz sledeće diferencne jednačine:

$$\omega^{FB} = \frac{1}{T} \cdot (\theta_n - \theta_{n-1}) \quad (2.2)$$

i to je srednja brzina u intervalu odabiranja T . Pošto se u toku periode odabiranja elektromagnetski momenat ne menja, brzina se menja linearno:

$$\omega_{n+1} = \omega_n + M_n \cdot \frac{T}{J}, \quad (2.3)$$

dge je J moment inercije pogona. Ova brzina nije direktno merljiva.

Izbor koeficijenata K_p i K_i treba izvršiti tako da odziv sistema bude kritično aperiodičan. Iz strukturnog blok dijagrama na slici 1 određuje se kompleksni lik signala brzinske greške, kada je sistem pobuđen odskočnim signalom amplitude ω_{ref} na ulazu i kada je motor neopterećen:

$$E(z) = \omega_{ref}(z) \cdot (1 - W_p(z)) = \frac{z \cdot (z^2 + z \cdot (K_p \cdot K - 1) + K_p \cdot K)}{f(z)} \cdot \omega_{ref}, \quad (2.4)$$

gdje je $W_p(z)$ funkcija spregnutog prenosa, a $f(z)$ karakteristični polinom:

$$f(z) = z^3 + (K_p \cdot K + K_i \cdot K - 2) \cdot z^2 + (1 + K_i \cdot K) \cdot z - K_p \cdot K. \quad (2.5)$$

K je parametar i izračunava se pomoću izraza:

$$K = \frac{T}{2J}. \quad (2.6)$$

Da bi odziv bio aperiodičan i sistem stabilan svi koreni karakterističnog polinoma moraju biti pozitivni, realni i unutar jediničnog kruga z ravni. Ako je to ispunjeno onda se karakteristični polinom može napisati u obliku:

$$f(z) = \prod_{i=1}^3 (z - \sigma_i), \quad 0 < \sigma_i < 1. \quad (2.7)$$

Saglasno graničnoj teoremi, u stacionarnom stanju vrednost sume odbiraka brzinske greške može se naći iz kompleksnog lika signala brzinske greške, po sledećem izrazu:

$$Q = E(z)|_{z=1} = \frac{K_p}{K_i} \cdot \omega_{ref}. \quad (2.8)$$

Minimum funkcije (2.8) se dobija pri vrednosti korena karakterističnog polinoma $\sigma_1 = \sigma_2 = \sigma_3 = 0.587$ [3]. Vrednosti parametara K_p i K_i koji obezbeđuju traženi odziv su:

$$K_p = \sigma^3 / K = 0.2027 / K, \quad (2.9)$$

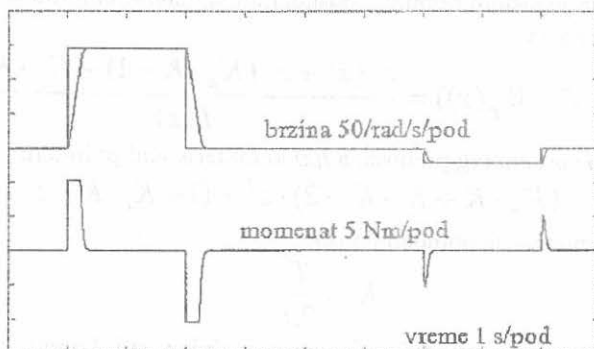
$$K_i = 3 \cdot \sigma^2 - 1 / K = 0.03512 / K. \quad (2.10)$$

3. SIMULACIJA IDEALIZOVANOG BRZINSKOG SERVOMEHANIZMA

Na osnovu dijagrama sa slike 1 i matematičkog modela prikazanog kroz jednačine (2.1) do (2.10), načinjena je simulaciona šema realizovana pomoću TUTSIM blokova. Za periodu odabiranja uzeta je vrednost 10 ms. Asinhroni motor čiji su parametri direktno iskorišćeni za određivanje konstanti u matematičkom modelu ima sledeće nominalne podatke: $P_n = 750 \text{ W}$, $U_n = 3 \times 380 \text{ V}$, $I_n = 2.1 \text{ A}$, $M_n = 5.152 \text{ Nm}$, $n_n = 1390 \text{ ob/min}$. Moment inercije pogona je $J = 0.01798 \text{ kg} \cdot \text{m}^2$. Na slici 2 prikazani su rezultati simulacije idealizovanog modela u kome nije razmatran uticaj ograničene rezolucije davača položaja. Zadata je referentna nominalna vrednost brzine od 145.5 rad/s . Gornji trag predstavlja referentnu i aktuelnu brzinu, a donji trag predstavlja elektromagnetski momenat. Izvršen je i revers motora sa brzinom od 20 rad/s . Može se primetiti da je odziv brzine aperiodičan i da se ograničenje momenta zbog ograničenog strujnog kapaciteta invertora javlja pri većim vrednostima referentne brzine.

Kao što je u uvodnom delu naglašeno, širina propusnog opsega servosistema sa zatvorenim povratnom spregom mora biti što veća. Za idealizovani model se može naći

širina propusnog opsega, eksitovanjem referentnog sinusnog signala promenljive učestanosti, umesto referentne brzine. Amplituda ovog signala može biti tolika da ne dozvoli izlazak servosistema iz linearnog režima rada. Širina propusnog opsega za ovaj model iznosi 24.6 Hz.



Slika 2. Rezultati simulacije idealizovanog modela

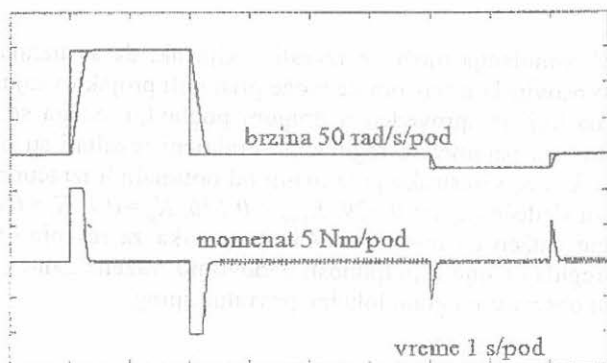
4. SIMULACIJA REALNOG BRZINSKOG SERVOMECHANIZMA

Vektorsko upravljanje asinhronim motorom se oslanja na podatak o ugaonoj brzini ili poziciji rotora, pa pored uticaja na tačnost u regulaciji brzine, tačnost merenja utiče i na regulaciju fluksa i momenta. Tačnost merenja direktno zavisi od rezolucije osovinskog senzora, kao i od mogućnosti sistema za izračunavanje brzine iz odbiraka pozicije. U ovom slučaju kao osovinski senzor koristi se inkrementalni optički enkoder sa 1250 impulsa po obrtaju i po fazi. Stvarna pozicija koja se može dobiti iz matematičkog modela se ne može verno predstaviti ovim senzorom, jer je njegov izlaz tačno određena vrednost i predstavlja ceo broj ugaonih segmenata koji odgovaraju jednom impulsu. Upravo ova činjenica se može iskoristiti za modelovanje ograničene rezolucije, po sledećem izrazu:

$$\theta_n^* = \left[\theta_n \cdot \frac{N}{2 \cdot \pi} \right] \cdot \frac{2 \cdot \pi}{N}, \quad (4.1)$$

gde je θ_n^* pozicija dobijena preko senzora. Na slici 3 su prikazani rezultati simulacije modela koji uzima u obzir ograničenu rezoluciju osovinskog senzora. Servomehanizam je pobuđen istim vrednostima brzine kao i u prethodnom slučaju. Vrednosti parametara PI regulatora su ostale iste. Vidno je prisutan ripl u signalu elektromagnetskog momenta, i on u ovom slučaju iznosi 10 % od nazivne vrednosti momenta. Razmere za referentnu i aktuelnu brzinu, kao i elektromagnetski momenat su iste kao i u prethodnom primeru. Propusni opseg ovakvog modela nije promenjen u odnosu na prethodni model.

Međutim, zbog prisutnosti velikog šuma u elektromagnetskom momentu koji izaziva povećanje gubitaka snage, a samim tim i pregrevanje motora, jasno je da optimalni parametri PI regulatora proračunati za idealizovani model ne mogu biti merodavni sa stanovišta optimizacije gubitaka i kvaliteta upravljanja servomehanizmom. Zadatak simulacije je da se odredi novi par parametara PI regulatora koji će zadovoljiti kriterijum da je ripl momenta manji od 1 % nazivne vrednosti momenta, a odziv sistema aperiodičan.

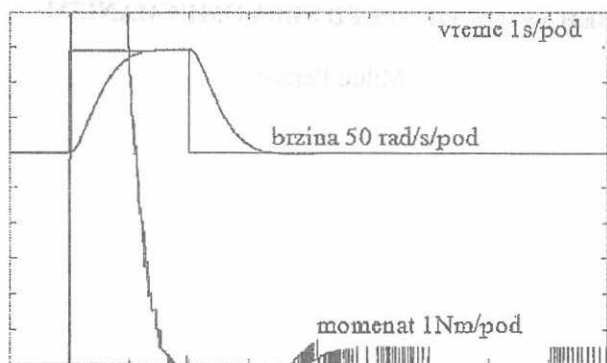


Slika 3. Rezultati simulacije realnog modela

Što se tiče aperioidičnog odziva sistema dovoljno je da polovi karakterističnog polinoma leže na realnoj osi, unutar jediničnog kruga z-ravni. Promenom realnih nula karakterističnog polinoma u intervalu koji omogućuje stabilan rad, mogu se u parametarskoj ravni K_p - K_i dobiti oblasti u kojima se nalaze ova dva parametra, da bi odziv sistema bio aperioidičan. Sistem sa polovima na pozitivnom delu realne ose unutar jediničnog kruga z-ravni ima najširi propusni opseg (najveću brzinu reagovanja) kada su ti polovi isti; što su polovi bliži koordinatnom početku z-ravni brzina reagovanja je veća [2]. Shodno ovom zaključku iz $f(z)$ se može dobiti kriva u K_p - K_i ravni na kojoj leže ova dva parametra da bi sistem imao aperioidičan odziv. Jednačina te krive je:

$$K_i = \frac{\sqrt[3]{(K_p \cdot K)^2 - 1}}{K} \quad (4.1)$$

Uslov da je ripl momenta manji od 1% nazivne vrednosti se ne može matematički izraziti u K_p - K_i ravni, što znatno otežava postupak nalaženja odgovarajućeg para parametara PI regulatora. Stoga se pribegava metodi slučajnog izbora za određivanje ovih parametara imajući jedan stepen slobode. Krajnji rezultat izbora parametara daje sledeće rezultate:



Slika 4. Rezultati simulacije realnog modela sa modifikovanim parametrima PI regulatora

5. ZAKLJUČAK

Iz ostvarenih simulacija može se izvesti zaključak, da se uzimanjem u obzir ograničene rezolucije osovinskog senzora ne može pristupiti projektovanju PI regulatora na osnovu kriterijuma koji je sproveden u drugom poglavlju. Stoga se mora pribeći simulacionom određivanju parametara regulacije. Praktični rezultati su pokazali da su vrednosti parametara K_p i K_i višestruko puta manji od optimalnih izračunatih vrednosti. Računske vrednosti su sledeće $K_{popt} = 0.729$, $K_{iopt} = 0.126$, $K_p = 0.1$, $K_i = 0.002$. Propusni opseg petlje je znatno snižen i iznosi 3Hz. Kao preporuka za rešenje ovog problema može se reći da PI regulator nije u potpunosti zadovoljio tražene zahteve, pa se mora pribeći projektovanju observera u grani lokalne povratne sprege.

LITERATURA

- [1] Slobodan N. Vukosavić, "Projektovanje adaptivnog mikroprocesorskog upravljanja brzinom i pozicijom asinhronog motora," *doktorska disertacija*, Elektrotehnički fakultet, Beograd, 1989.
- [2] Milić R. Stojić, "Digitalni sistemi automatskog upravljanja," *Nauka*, Beograd, 1994.
- [3] Milić R. Stojić, Slobodan N. Vukosavić, "Design of Microprocessor-Based System for Positioning Servomechanism with Induction Motor," *IEEE Trans. Indust. Electr.*, vol. 38. No. 5, October 1991, pp. 369-378.

Abstract: Modern speed control servomechanisms require an elevated level of the speed loop bandwidth, in particular when the laser cutting and the water cutting machine tool applications are required.

A high close loop bandwidth requires high proportional and integral loop gains. On the other hand, elevated gains give a rise to the noise present in the torque reference signal, and contribute to increased power losses and poor performance. Therefore, the compromise has to be made between the requirement for achieving a high loop bandwidth and the necessity of having a low, acceptable noise contents. In this paper we proposed a computer model of speed control servo system, suitable for making the above mentioned choice.

POSITIONING SENSOR LIMITED RESOLUTION INFLUENCE ON BEHAVIOR OF SPEED SERVOMECHANISM

Milun Perišić