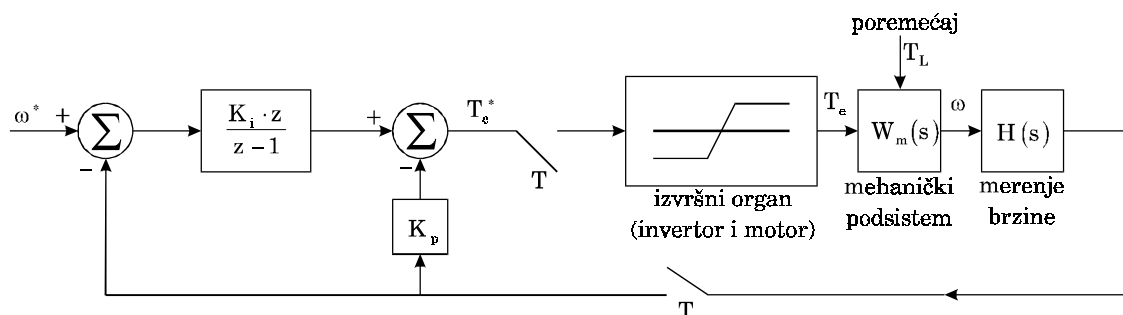


## 6. STRUKTURA I PODEŠAVANJE PARAMETARA REGULATORA BRZINE

Algoritam upravljanja asinhronim motorom, opisan u poglavlju 2.2., omogućuje nezavisnu kontrolu rotorskog fluksa i elektromagnetnog momenta. Brzina uspostavljanja momenta zavisi od karakteristika regulatora statorske struje. U slučaju eksperimentalnog prototipa, motor se napaja iz strujno regulisanog naponskog invertora. Prekidački algoritam za upravljanje invertorom, dat u okviru poglavlja 3., omogućava uspostavljanje nominalne struje i momenta za  $\cong 500$  ms. Kašnjenje između trenutka odabiranja i uspostavljanja komandovanih vrednosti struja i momenta je uvećano za  $\cong 160$  ms, zbog neophodnih izračunavanja u digitalnom mikrokontroleru. Brzina uspostavljanja struje i momenta je za dva reda veličine manja od vremenske konstante mehaničkog podsistema. Asinhroni motor, napajan iz strujno regulisanog naponskog invertora i upravljan po algoritmu vektorske kontrole možemo posmatrati kao proporcionalni izvršni organ sa zanemarljivim transportnim kašnjenjem. Mogućnost direktnog upravljanja momentom olakšava sintezu regulatora brzine, jer se prenosna funkcija objekta svodi na prenosnu funkciju mehaničkog podsistema pogona, koja je prvog reda. Radi postizanja nulte greške stacionarnog stanja, usvaja se proporcionalno–integralno dejstvo regulatora. Komandovana vrednost elektromagnetnog momenta, kao upravljačke promenljive, izračunava se na osnovu referentne i merene brzine. Regulator, izvršni organ i proces su prikazani u vidu blok dijagrama, na slici 6.1.. Da bi se izbegao nagli skok upravljačke promenljive (momenta) u trenutku delovanja poremećaja na ulazu, proporcionalno dejstvo se izmešta [120] u kolo lokalne povratne sprege. Moment koji se može razviti je ograničen strujnim kapacitetom invertora, pa blok dijagram 6.1. sadrži limiter. Prenosna funkcija  $H(s)$  određena je načinom merenja brzine. Metod merenja brzine pomoću impulsnog davača, opisan u poglavlju 4.1., omogućuje određivanje srednje vrednosti brzine u toku intervala odabiranja, što se može približno modelovati kao kašnjenje u iznosu od polovine intervala odabiranja.



Slika 6.1.: *Proporcionalnointegralni regulator brzine*

Postupak određivanja parametara regulatora izveden je za dva različita slučaja. Ukoliko je moment opterećenja proporcionalan brzini, prenosna funkcija mehaničkog podsistema  $W_m(s)$  se može predstaviti kao  $K / (1+s \cdot T_1)$ . Ako je trenje zanemarljivo, a moment opterećenja nezavisan od brzine (potencijalni, pulsacioni itd.), prenosna funkcija mehaničkog podsistema je  $W_m(s)=1 / (s \cdot T)$ . Tada se opterećenje  $T_L$  tretira kao spoljni poremećaj. Određivanje parametara za prvi i drugi slučaj je dato u poglavljima 6.1. i 6.2.. Prilikom izvođenja koriste se normalizovane vrednosti momenta, brzine i pozicije:

$$T_e(p.u.) = \frac{T_e(Nm)}{T_n} \quad ; \quad T_n = \text{nominalni momenat}$$

$$\omega(p.u.) = \frac{\omega(rad/s)}{\omega_n} \quad ; \quad \omega_n = \text{nominalna brzina}$$

$$\theta(p.u.) = \frac{\theta(rad)}{\theta_n} \quad ; \quad \theta_n = \omega_n \cdot T \quad ; \quad T = \text{perioda odabiranja}$$

$$K_f = \text{koeficijent frikcije} \quad ; \quad T_m = J \cdot \frac{\omega_n}{T_n}$$

## 6.1

---

Dinamika mehaničkog podsistema je opisana jednačinom 6.1.. Prelaskom na normalizovane veličine, prenosna funkcija  $\omega(s) / T_e(s)$  uzima oblik 6.2.:

$$J \cdot \frac{d\omega}{dt} = T_e - K_f' \cdot \omega \quad (6.1)$$

$$W_m(s) = \frac{\omega(s)}{T_e(s)} = \frac{K}{1+s \cdot T_1} \quad ; \quad K = \frac{1}{K_f} \quad ; \quad T_1 = \frac{T_m}{K_f} \quad (6.2)$$

Vremenske konstante mehaničkog podsistema su za jedan ili dva reda veličine veće od kašnjenja usled izračunavanja, merenja brzine i uspostavljanja momenta. Izvršni organ je proporcionalan. Ukoliko se želi postići aperiodičan odziv sa vremenom smirenja  $\tau=1 / \lambda$ , podešavanje parametra proporcionalnointegralnog regulatora brzine se može izvršiti po Dahlinovom algoritmu [103],[120]. Prenosna funkcija regulatora data je izrazom 6.3.. Parametri  $K_p$  i  $T_i$  se izračunavaju prema izrazima 6.4. i 6.5.:

$$D(z) = K_p \cdot \left( 1 + \frac{T/T_i}{1 - z^{-1}} \right) \quad (6.3)$$

$$K_p = \frac{1 - e^{-\lambda T}}{K \cdot \left( e^{\frac{T}{T_i}} - 1 \right) \cdot (1 + N \cdot (1 - e^{-\lambda T}))} \quad (6.4)$$

$$T/T_i = e^{\frac{T}{T_i}} - 1 \quad (6.5)$$

Broj  $N$  predstavlja maksimalni ceo broj intervala odabiranja sadržanih u transportnom kašnjenju  $T_d$ . Kašnjenje usled izračunavanja i uspostavljanja momenta vektorski kontrolisanog asinhronog motora je znatno manje od intervala  $T$ . Ako se brzina meri kao srednja vrednost u toku intervala  $T$ , ekvivalentno kašnjenje iznosi  $\cong T/2$ , pa je  $N=0$ .

---

## 6.2.

---

Asinhroni motor snage 1 kW, upotrebljen kao pogonski motor u eksperimentalnom prototipu, ima gubitke usled trenja i ventilacije koji pri nominalnoj brzini opterećuju motor sa  $\cong 2\%$  nominalnog momenta. Mehanička vremenska konstanta grupe, koju čine asinhroni motor i opteretni generator, iznosi 1.11 sec. Ukoliko bi prenosnu funkciju mehaničkog podsistema pogona predstavili kao  $W_m(s) = K / (1 + s \cdot T_1)$ , koeficijent  $K$  i vremenska konstanta  $T_1$  bi imali vrednosti  $K=50$  i  $T_1 = 55.5$  sec. Ovo znači da bi idealizovani motor, pogonjen nominalnim momentom, dostigao brzinu 50 puta veću od nominalne uz eksponencijalni odziv sa vremenskom konstantom od 55.5 sec. Konstante  $K$  i  $T_1$  ne nose informaciju o karakteristikama pogona u oblasti nominalne brzine, pa prenosna funkcija  $W_m$  nije pogodna kao polazna osnova za određivanje parametara regulatora. U uslovima kada moment opterećenja nije direktno određen brzinom, prenosna funkcija mehaničkog podsistema je, praktično,  $1 / (s \cdot T_m)$ . Moment opterećenja predstavlja spoljni poremećaj.

Kao kriterijum za podešavanje parametara, usvaja se postizanje kritičnog odziva uz što širi propusni opseg. Posmatrano u  $z$ -ravni, polovi funkcije spregnutog prenosa treba, po mogućstvu, da budu na pozitivnom delu realne ose, i to što bliže koordinatnom početku. Širok propusni opseg regulatora brzine omogućuje potiskivanje fluktuacija brzine usled pulsacija momenta opterećenja. širinom propusnog opsega je uslovljen i izbor učestanosti odabiranja. Perioda

odabiranja brzinske petlje eksperimentalnog pogona je  $T=10$  ms, što je znatno manje od vremenske konstante  $T_m$ .

Transportno kašnjenje usled izračunavanja i ograničene brzine uspostavljanja struja je za red veličine manje od periode odabiranja, pa se može smatrati da vektorski kontrolisani motor trenutno uspostavlja komandovanu vrednost elektromagnetnog momenta i održava ga konstantnim do narednog trenutka odabiranja. Ne može se, međutim, zanemariti činjenica da se merenjem brzine pomoću impulsnog davača i metode iz poglavlja 4.1. zapravo meri srednja vrednost brzine u toku proteklog intervala odabiranja.

Uz zanemarenje gubitaka usled ventilacije i trenja u ležajevima, relaciju između elektromagnetnog momenta  $T_e$ , momenta opterećenja  $T_L$  i brzine daju izrazi 6.6. i 6.7.. Zbog karakteristika izvršnog organa, elektromagnetni moment je konstantan u okviru periode odabiranja. Pod veličinom  $T_L$  se podrazumeva srednja vrednost momenta opterećenja u intervalu  $T$ .

$$\omega_{n+1} = \omega_n + \frac{1}{T_m} \cdot \int_0^T (T_e - T_L) \cdot dt = \omega_n + \frac{T}{T_m} \cdot T_e - \frac{T}{T_m} T_L \quad (6.6)$$

$$\omega(z) = \frac{T/T_m}{z-1} \cdot (T_e(z) - T_L(z)) \quad (6.7)$$

Rezultat merenja brzine  $\omega^{\text{mer}}$  predstavlja srednju vrednost brzine  $\omega$  u okviru intervala  $T$ :

$$\omega_{n+1}^{\text{mer}} = \frac{\omega_{n+1} + \omega_n}{2} \quad ; \quad \omega^{\text{mer}}(z) = \omega(z) \cdot \frac{z+1}{2 \cdot z} \quad (6.8)$$

Proporcionalno–integralni regulator, čije parametre treba odrediti, dat je izrazom 6.9.. Proporcionalno dejstvo treba izmestiti u kolo lokalne povratne sprege [120], što nema uticaja na karakteristični polinom, dat izrazom 6.10..

$$D(z) = K_p + K_i \cdot \frac{z}{z-1} \quad ; \quad (6.9)$$

$$f(z) = 1 + \left( K_p + K_i \cdot \frac{z}{z-1} \right) \cdot \frac{z+1}{z \cdot (z-1)} \cdot \frac{T}{2 \cdot T_m} \quad (6.10)$$

$$\text{smenom: } K_1 = K_p \cdot \frac{T}{2 \cdot T_m} \quad ; \quad K_2 = K_i \cdot \frac{T}{2 \cdot T_m}$$

$$f(z) = z^3 + (K_1 + K_2 - 2) \cdot z^2 + (1 + K_2) \cdot z - K_1 = 0 \quad (6.11)$$

$$f(z) = z^3 + a \cdot z^2 + b \cdot z + c$$

$$p = b - \frac{a^2}{3} ; \quad q = c - \frac{a \cdot b}{3} + 2 \cdot \frac{a^3}{27} ; \quad D = \frac{q^2}{4} + \frac{p^3}{27} \quad (6.12)$$

Pojačanja  $K_p$  i  $K_i$  treba odrediti tako da se postigne odziv bez prebačaja uz maksimalni mogući propusni opseg. To znači da koreni polinoma 6.11. treba da budu realni brojevi što manje apsolutne vrednosti, po mogućnosti pozitivni. Jednačina trećeg reda ima realne korene ukoliko je  $D \leq 10$  (6.12.). Optimalne vrednosti koeficijenata  $K_1$  i  $K_2$ , izračunate preko relacije 6.12., uz uslov da su koreni polinoma što manji pozitivni brojevi, date su jednakostima 6.13.. Određivanje parametara PI regulatora brzine za pogon sa mehaničkom vremenskom konstantom  $T_m$  i periodom odabiranja  $T$  dato je relacijama 6.14..

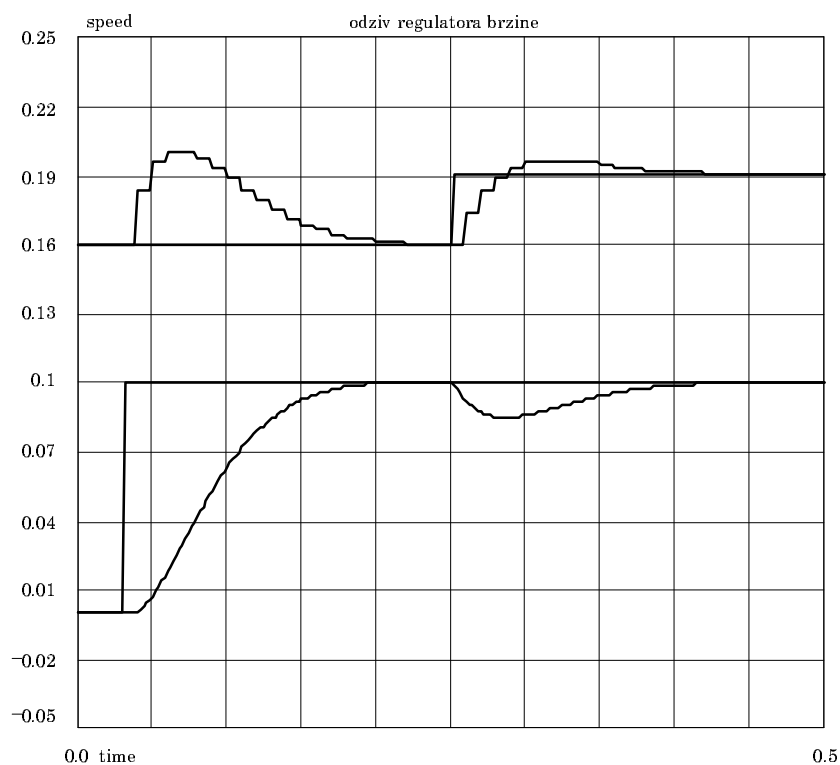
$$K_1 \approx 0.0350 \quad ; \quad K_2 \approx 0.2025 \quad (6.13.)$$

$$K_p = 0.2025 \cdot \frac{2 \cdot T_m}{T} \quad K_i = 0.0350 \cdot \frac{2 \cdot T_m}{T} \quad (6.14.)$$

Za eksperimentalni pogon je  $T_m = 1.11$  s,  $T = 0.01$  s,  $K_p \cong 45$  i  $K_i \cong 7.8$ . Na slici 6.2. su prikazani rezultati simulacije eksperimentalnog pogona. Maksimalni moment, koji motor može razviti, ograničen je programski na vrednost koja odgovara dvostrukom nominalnom momentu. Gornji trag na slici 6.2. predstavlja upravljačku promenljivu (elektromagnetni moment) i moment opterećenja. Donji trag prikazuje referentnu u aktuelnu brzinu. Trajanje simulacije je 500 ms. Najpre se referentna brzina skokovito promeni za 0.1 p.u., a nakon smirenja prelaznog procesa, događa se skok momenta opterećenja za 1 p.u.. Slika 6.3. prikazuje rezultate simulacije brzinskog regulatora za velike poremećaje. Referentna brzina se menja sa 0 na 1 p.u.. Momenat komandovan od strane PI regulatora prevazilazi dvostruki nominalni, pa je aktivirano programsko ograničenje momenta. U toku rada u oblasti ograničenja momenta, dolazi do akumulacije greške u integratoru PI regulatora, pa dolazi do prebačaja i oscilatornog odziva, uprkos činjenici da su polovi spregnutog prenosa realni. Ova neregularnost je posledica primene zakona upravljanja u pozicionoj formi. Problem se u potpunosti rešava ukoliko se primeni inkrementalna forma PI regulatora [120]. U trenucima odabiranja, izračunavaju se inkrementi upravljačke promenljive, vrši sabiranje sa prethodnom vrednošću a

zatim limitira rezultat. Slika 6.4. prikazuje simulaciju rada ovako modifikovanog regulatora brzine.

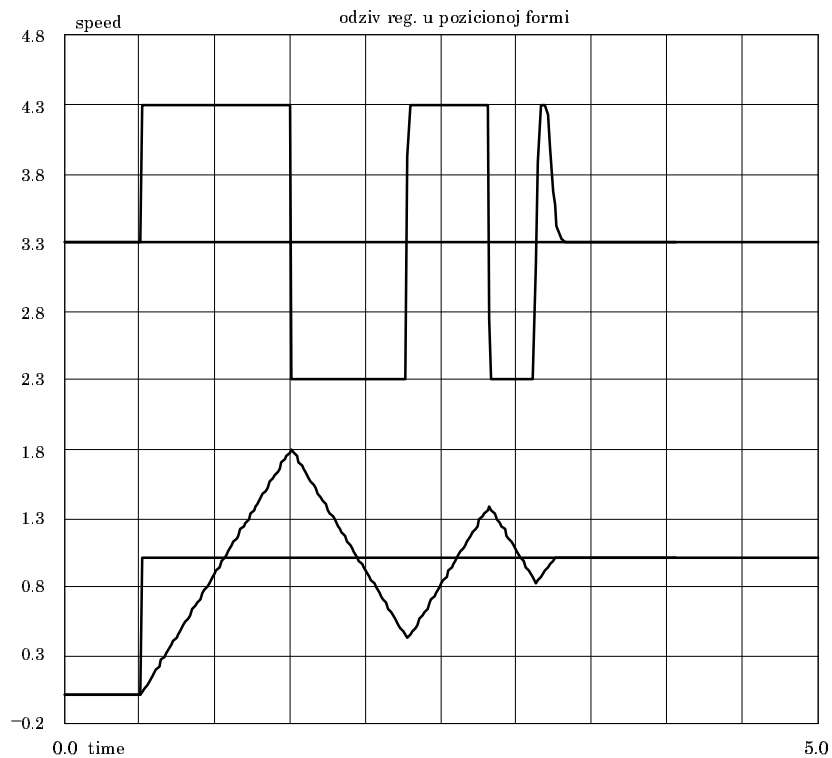
Predlog sinteze brzinskog regulatora, dat u okviru ovog poglavlja, polazi od zahteva da se minimizira uticaj pulsacija i srednje vrednosti momenta opterećenja na regulisanu promenljivu, brzinu. Pulsacije opterećenja u okviru propusnog opsega regulatora će biti kompenzovane pulsacijama elektromagnetnog momenta. Ukoliko su uslovi pogona takvi da tolerišu fluktuacije brzine a ne dozvoljavaju pulsacije momenta, treba odustati od gradnje brzog regulatora, smanjiti pojačanja i uvećati periodu odabiranja.



Slika 6.2.: *Odziv PI regulatora brzine za mali ulazni poremećaj.*

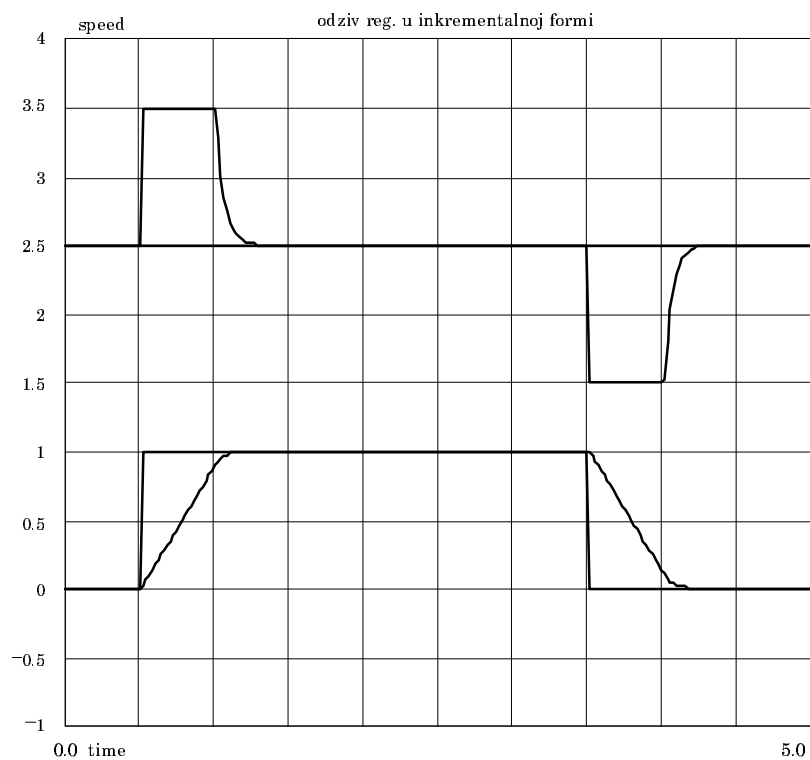
Detaljnija ispitivanja karakteristika regulatora brzine izvršena su eksperimentalno. Talasni oblici snimljeni pri radu regulatora brzine, implementiranom na eksperimentalnom prototipu pogona, dati su u okviru poglavlja 9..

Pri određivanju parametara regulatora zanemareni su gubici usled trenja i ventilacije. Ekvivalentni koeficijent trenja, koji odgovara ovim gubicima je  $\cong 0.02$ . Ovo znači da promena brzine za 1 p.u. prouzrokuje promenu momenta trenja za 0.02 p.u.. Proporcionalno dejstvo regulatora je tako podešeno da promena brzine od 1 p.u. prouzrokuje promenu komande momenta za  $\cong 45$ , pa je greška,



Slika 6.3.: Odziv PI regulatora u pozicionoj formi.

koja se čini zanemarenjem trenja, ekvivalentna promeni proporcionalnog pojačanja za 0.044%.



Slika 6.4.: Odziv PI regulatora u inkrementalnoj formi.