

## Dinamička ispitivanja pogona uređaja za praćenje ciljeva

Dr Momčilo Milinović, dipl.inž.<sup>1)</sup>  
Dr Nenad Dodić, dipl.inž.<sup>2)</sup>

Dinamika pogona uređaja za praćenje cilja ima presudan uticaj na kvalitet celokupnog procesa praćenja cilja. Zahtevi koji se propisuju uređaju za praćenje su vrlo strogi, naročito u pogledu dinamike njegovog rada. To daje visok značaj određivanju pokazatelja dinamike pogona uređaja za praćenje na osnovu ispitivanja pogona u laboratorijskim uslovima. Definisan je niz pokazatelja kvaliteta dinamike pogona, koji treba da budu sastavni deo taktičko-tehničkih zahteva za uređaj za praćenje. Opisani su postupci ispitivanja dinamike pogona u vremenskom i frekventnom domenu, kao i postupak određivanja nepoznatih konstrukciono-tehničkih parametara pogona. Postupci su ilustrovani rezultatima ispitivanja eksperimentalnog modela uređaja za praćenje. Dat je niz preporuka za uspešnu realizaciju opisanih postupaka.

**Ključne reči:** Praćenje cilja, dinamika, pogon, motor, uređaj za praćenje, dinamička ispitivanja, laboratorijska ispitivanja, granične performanse, rezerva stabilnosti.

### Uvod

SAVREMENI borbeni sistemi se odlikuju visokim stepenom automatizacije radi pravovremenog otkrivanja neprijatelja, skraćivanja vremena reagovanja na iznenadnu pojavu opasnosti i povećanja tačnosti gađanja i efikasnog dometa. Klasično nišanje se zasniva na ljudskom vidu i svodi se na dovodenje određenih tačaka nišanskog uređaja i cilja na istu pravu liniju. Savremeno nišanje podrazumeva automatsku detekciju cilja (korišćenjem radarskog ili elektrooptičkih senzora), kontinuirano automatsko usmeravanje nišanske ose ka cilju i određivanje parametara kretanja cilja koji obezbeđuju visoku efikasnost vatrenog dejstva određenim oruđem.

I klasično i savremeno nišanje imaju istu namenu - da oruđe dovedu u pravac gađanja koji odgovara položaju i načinu kretanja cilja. Suštinska razlika je u tome što je klasično nišanje oslonjeno na subjektivni faktor i lišeno objektivnih informacija o kretanju cilja, dok je savremeno nišanje zasnovano na merenju položaja cilja. Osa senzora (nišanska osa) pri nišanjenju mora da prati kretanje cilja. Pored ovog fizičkog praćenja cilja, prati se i kinematičko stanje cilja - određuju se položaj i drugi parametri koji definišu njegovo kretanje. Zato je praćenje cilja prikladan naziv za nišanje zasnovano na merenju položaja cilja, a uređaj koji ostvaruje ovu funkciju nazvan je *uređaj za praćenje*.

Da bi praćenje cilja bilo uspešno, pogonski podsistem (pogon) uređaja za praćenje, koji pokreće osu senzora, treba da ima sledeće karakteristike:

- osu senzora rotiraju pogonski motori,
- rad pogonskih motora kontrolišu upravljački sistemi sa povratnom spregom (regulatori), sa zadatkom da minimiziraju greške fizičkog praćenja cilja i

- čovek je isključen iz neposrednog procesa pokretanja uređaja za praćenje.

Dinamika pogona uređaja za praćenje je određena:

- vrstom cilja i načinom kretanja cilja,
- vrstom i karakteristikama senzora za detekciju cilja i
- granicama efikasnog dejstva oruđa kome je uređaj namenjen.

Zadatak, koji se postavlja pogonskom podsistemu uređaja za praćenje, je da rotira osu senzora tako da cilj bude neprekidno u vidnom polju korišćenih senzora, pri zadatim uslovima kretanja cilja i zadatim uslovima rada uređaja. Pogon mora pouzdano i stabilno da ostvaruje postavljene zadatke. Postavljeni zadatak je, po pravilu, veoma složen i podrazumeva primenu vrhunске tehnologije.

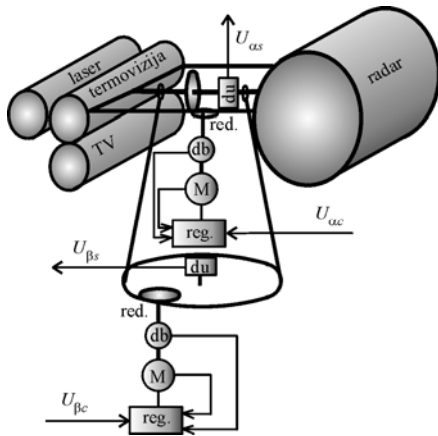
Na sl.1 je prikazana funkcionalna šema mogućeg rešenja pogona uređaja za praćenje. Senzori su postavljeni na obrtnom nosaču i zajedno s njim predstavljaju inercijalno opterećenje pogonskom podsistemu. Pogonski podsistem sadrži pogonske grupe za pokretanje po azimutu (pravcu) i elevaciji (visini). U svakoj pogonskoj grupi se nalaze: motor (M), regulator (reg.) i senzor (davač) brzine (db). Ako pogon nije direktan, onda sadrži i reduktor (red.). Motori savremenih uređaja za praćenje su gotovo isključivo električni. Regulatori su elektronski - analogni ili digitalni. U svakoj pogonskoj grupi obavezno je ugrađen i davač ugla (du) ose senzora, koji se koristi za merenje položaja cilja, ali i za neposrednu regulaciju pogona, kada je upravljanje kretanjem ose senzora poziciono.

Upravljanje pogonom je, po pravilu, brzinsko - računar regulatoru pogona zadaje ugaonu brzinu koju pogon treba da ostvari, s ciljem da osa senzora bude pravilno pozicionirana. Veličine  $U_{ac}$ ,  $U_{bc}$  na sl.1 predstavljaju signale srazmerne zadatim ugaonim brzinama ose senzora

<sup>1)</sup> Mašinski fakultet, 11000 Beograd, 27. marta 80

<sup>2)</sup> Vojnotehnički institut VJ, 11000 Beograd, Katanićeva 15

po elevaciji i azimutu ( $\dot{\alpha}_s, \dot{\beta}_s$ ), a  $U_{\alpha s}, U_{\beta s}$  signale srazmerne stvarnim uglovima ose ( $\alpha_s, \beta_s$ ).



Slika 1. Pogonski podsistem uređaja za praćenje

Zahtevi koje treba da zadovolji pogonski podsistem treba da budu takvi da se što lakše mogu ispitati u neborbenim, po mogućstvu laboratorijskim uslovima, a da njihovo ispunjenje garantuje izvršenje postavljenog zadatka. Pre nego što se pređe na osnovnu temu - laboratorijska (eksperimentalna) ispitivanja dinamike pogona, definišaće se zahtevi u vidu parametara, čije će određivanje biti predmet laboratorijskih ispitivanja. Zahtevi će se odnositi samo na dinamiku praćenja. Kvalitet i pouzdanost rada u otežanim ambijentalnim uslovima se neće razmatrati.

### Zahtevi za pogon

Sl.2 prikazuje uopšteno vidno polje senzora uređaja za praćenje. Ono se po pravilu definiše vidnim uglovima po azimutu ( $\beta_v$ ) i elevaciji ( $\alpha_v$ ). Da bi cilj mogao da se detektuje, odnosno da bi mogao da se izmeri njegov položaj, bar jedan njegov deo mora biti u vidnom polju senzora. Uglovi pod kojima se cilj vidi -  $\Delta\beta_c$  (azimut) i  $\Delta\alpha_c$  (elevacija) zavise od dužine ( $L_c$ ), odnosno visine ( $H_c$ ) siluete cilja i njegove daljine ( $d_c$ ). Neka je  $\Delta\beta$  uglovna greška pozicioniranja nišanske ose u odnosu na centar cilja po azimutu, a  $\Delta\alpha$  greška pozicioniranja ose po elevaciji.

Neophodan uslov da cilj bude detektovan je:

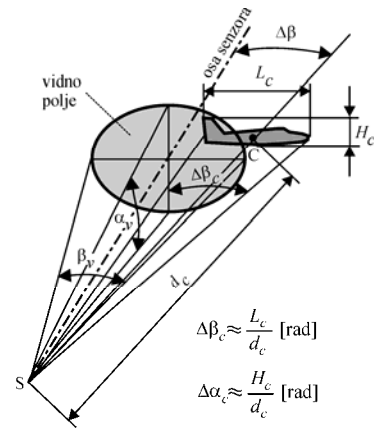
$$|\Delta\beta| < \frac{1}{2}(\beta_v + \Delta\beta_c), \quad |\Delta\alpha| < \frac{1}{2}(\alpha_v + \Delta\alpha_c) \quad (1)$$

S obzirom da silueta cilja varira zavisno od njegove prostorne orijentacije i da su uglovi pod kojima se vidi udaljeni cilj ( $\Delta\beta_c, \Delta\alpha_c$ ) mali u odnosu na  $\beta_v$  i  $\alpha_v$ , može se postaviti strožiji i jednostavniji uslov za detekciju cilja:

$$|\Delta\beta| < \frac{1}{2}\beta_v, \quad |\Delta\alpha| < \frac{1}{2}\alpha_v \quad (2)$$

Vidljivost cilja nije ista unutar celog vidnog polja. Ovo naročito važi za aktivne senzore, koji imaju najveću gustinu zračenja u centru vidnog polja i veliki gradijent smanjenja ove gustine u blizini granice deklarisanog vidnog polja senzora. Zato zahtev za tačnošću pozicioniranja ose senzora može da se postavi i strožije:

$$|\Delta\beta| < k\beta_v, \quad |\Delta\alpha| < k\alpha_v, \quad 0 < k < 0,5 \quad (3)$$



Slika 2. Vidno polje senzora i cilj

Ako uređaj za praćenje ima dva ili više senzora za detekciju cilja i merenje položaja cilja, zahtevi (1-3) se proveravaju za sensor sa najmanjim vidnim poljem.

Najmerodavnija verifikacija sposobnosti pogonskog sistema da obezbedi kontinuirano praćenje cilja je ispitivanje uređaja za praćenje na terenu, praćenjem realnih ciljeva pri zadatim uslovima. Uglove  $\Delta\beta$  i  $\Delta\alpha$  mere senzori za detekciju cilja, pa se na osnovu njih može lako da proveriti da li je ispunjen uslov (2) ili (3) na određenom vremenskom intervalu praćenja. Pri korišćenju izmerenih vrednosti  $\Delta\beta$  i  $\Delta\alpha$  treba voditi računa o slučajnim greškama (šumu) merenja. Treba, dakle, filtrirati merenja  $\Delta\beta$  i  $\Delta\alpha$  ili uslov (2), odnosno (3), ispitivati za srednje vrednosti  $\Delta\beta$  i  $\Delta\alpha$ .

Organizacija ispitivanja na terenu koja, između ostalog, zahteva i angažovanje borbenih letelica, je složena i skupa. Zato ispitivanjima na terenu treba da prethode laboratorijska ispitivanja pogona. Ispitivanja na terenu predstavljaju relevantnu, iako ne i konačnu verifikaciju uređaja.

U zahtevima za pogon uređaja za praćenje, pored uslova (1), (2) ili (3), treba definisati i pokazatelje čije se vrednosti mogu lako odrediti u laboratorijskim uslovima, tradicionalnim sredstvima i postupcima. Takvi pokazatelji su: *granične performanse, vremenske konstante, statička greška, preskok, propusni opseg, mrtav hod, statički moment trenja i rezerva stabilnosti*.

Ti se pokazatelji definišu za obe pogonske grupe - za azimut i elevaciju. Granične performanse su:

- *minimalna brzina* - najmanja srednja ugaona brzina rotacije ose senzora bez zastajanja (povremenog zaustavljanja),
- *maksimalna brzina* - ugaona brzina koju osa senzora dostiže pri maksimalnom dopuštenom napajanju motora, odnosno pri najvećoj dopuštenoj brzinskoj komandi i
- *maksimalno ugaono ubrzanje* - najveće ugaono ubrzanje koje je nišanska osa u stanju da razvije.

Vremenske konstante se definišu za odziv pogona na odskočni ulazni signal (komandu), odnosno ulaz koji trenutno prelazi sa jedne konstantne vrednosti signala na drugu konstantnu vrednost. Vremenske konstante su [1]:

- *dominantna vremenska konstanta* - vreme nakon koga envelope oscilacija odskočnog odziva opadne na 37% svoje početne vrednosti,
- *vreme kašnjenja* - vreme potrebno da odskočni odziv dostigne 50% svoje ustaljene vrednosti,
- *vreme uspona* - vreme potrebno da odskočni odziv

poraste sa 10% na 90% svoje ustaljene vrednosti,

- trenutak preskoka - trenutak kada oscilatorni odskočni odziv dostigne najveću vrednost i
- vreme smirenja - vreme nakon koga su greške odziva u odnosu na njegovu željenu vrednost manje od 5%.

*Statička greška* predstavlja razliku između ostvarenog i zadatog (željenog) izlaza posmatranog sistema (u ovom slučaju pogonske grupe), kada je zadati izlaz konstantan. Izlaz pogonske grupe je najčešće ugaona brzina ili signal proporcionalan ugaonoj brzini. *Preskok*, kao razlika najveće i ustaljene vrednosti odskočnog odziva, je pokazatelj koji se definiše za sisteme sa oscilatornim prelaznim procesom.

*Propusni opseg*, kao učestanost ulaza za koju količnik amplituda izlaza i ulaza opadne za tri decibela u odnosu na količnik izlaz/ulaz pri dejstvu statičkog ulaza, je pokazatelj filterskih svojstava pogona, odnosno sposobnosti da agilno prati kretanje cilja, a prigušuje uticaj smetnji u kanalima senzora i komandnim linijama na kretanje uređaja za praćenje.

*Mrtav hod reduktora* na strani opterećenja - predstavlja ugaonost koja se može zaokretati teret (nosač senzora) kada je pogonski motor zakočen, a da ne dođe do elastičnih deformacija. Mrtav hod je posledica zavora između zupčanika.

Komponenta dinamičke greške pozicioniranja izazvana mrtvim hodom se u praksi ne može uspešno kompenzovati upravljanjem. Vrednost mrtvog hoda varira u toku rotacije senzora, zbog nepravilnosti pri obradi zupčanika.

Mrtav hod i pojava statičkog trenja, zbog koga se pri pokretanju motora iz stanja mirovanja javlja dodatni moment - *statički moment trenja*, povećavaju minimalnu brzinu praćenja cilja, što se nepovoljno odražava na tačnost praćenja udaljenih ciljeva. Jedino efikasno rešenje za eliminisanje mrtvog hoda i smanjenje statičkog trenja je primena direktnog pogona (pogona bez reduktora), koji je skuplji i složeniji za upravljanje.

Pri projektovanju pogona se ne mogu tačno predvideti svi uticaji i poremećaji koji u toku rada mogu delovati na uređaj za praćenje. Zato podsistem pogona mora imati određenu rezervu stabilnosti, koja se propisuje kao pretek faze i pretek pojačanja [1]. Ove veličine su vezane za frekventnu karakteristiku otvorenog kola pogonskog podsistema.

### Laboratorijska ispitivanja

Potreba za dinamičkim ispitivanjem pogona uređaja za praćenje javlja se u sledećim slučajevima:

- konstruisan je nov ili modernizovan postojeći uređaj za praćenje,
- nabavljen je probni primerak uređaja za praćenje i razmatra se njegova kupovina,
- obavljena je popravka ili remont uređaja i potrebno je proveriti njegov rad i podesiti njegove parametre i
- uočeni su određeni nedostaci u toku rada uređaja i treba proveriti njegove performanse itd.

Uobičajeno je i ekonomski isplativo da se prva ispitivanja obave u laboratoriji (radionici, garaži). Poželjno je da se pri tom koristi standardna merna oprema. Ispitivanja na terenu treba da uslede tek kada laboratorijska ispitivanja daju pozitivne rezultate.

Osnovna namena laboratorijskih ispitivanja dinamičkog ponašanja pogona uređaja za praćenje je da se odrede vrednosti pokazatelja datih u zahtevima koji su uređaju

postavljeni, ali i vrednosti drugih pokazatelja merodavnih za ocenu kvaliteta rada uređaja. Laboratorijska ispitivanja mogu poslužiti i za određivanje nepoznatih strukturnih i tehničkih parametara uređaja i njegovog pogona. Naime, neki parametri se teško mogu s izvesnošću proračunati, kao na primer:

- koeficijent viskoznoeg trenja pogonske grupe i
- moment inercije obrtnih delova uređaja.

Pored ispitivanja parametara čije se vrednosti propisuju razmatraće se i laboratorijsko ispitivanje prethodno nabrojanih parametara. Postupci eksperimentalnog ispitivanja biće ilustrovani na primeru pogona za elevaciju jednog laboratorijskog modela uređaja za praćenje ciljeva u vazduhu.

Pogonski motor navedenog modela uređaja je električan, sa stalnim magnetskim fluksom. Napaja se jednosmernom strujom. Usvaja se linearni model ponašanja pogonskog motora [2]:

$$\omega_m(s) = \frac{K}{1 + \tau_m s} I_m(s) \quad (4)$$

$$I_m(s) = K_2 \frac{1 + \tau_{m1} s}{1 + \tau_m s} U_t(s) \quad (5)$$

gde su:

$$K = \frac{K_m}{B}, \quad \tau_m = \frac{J}{B}, \quad \tau_{m1} = \frac{RB}{K_e K_m + RB} \quad (6)$$

$$K_2 = \frac{B}{K_e K_T + RB} \frac{K_m}{B}, \quad B = B_m + B_L, \quad J = J_m + \frac{J_L}{i^2} \quad (7)$$

$i_m$  je struja motora,  $U_t$  napon napajanja motora, a  $\omega_m$  ugaona brzina vratila motora.  $I_m(s)$ ,  $U_t(s)$ ,  $\omega_m(s)$  su njihove Laplasove transformacije [3].  $J$  je ukupan moment inercije, a  $B$  ukupan koeficijent trenja obrtnih delova, svedeni na vratilo motora. Poznate vrednosti parametara su date u tabeli 1. Vrednosti momenata inercije opterećenja  $J_L$  i koeficijenta trenja opterećenja  $B_L$  nisu poznate.

Tabela 1. Parametri pogonske grupe

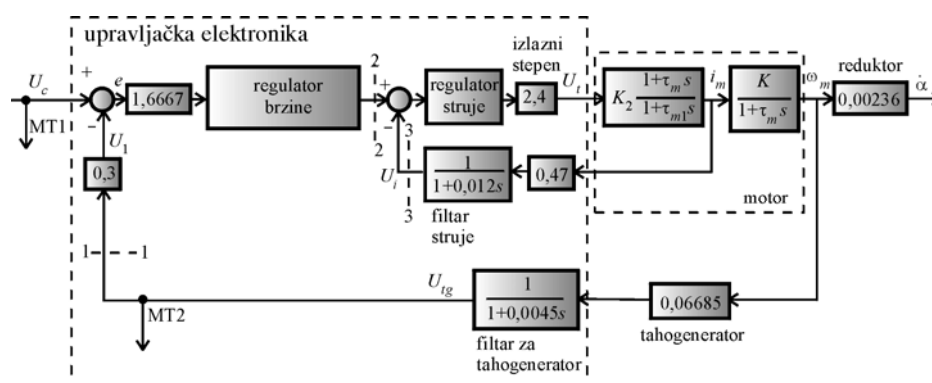
Parametar	Oznaka	Vrednost	Mera
Moment inercije motora	$J_m$	$5,75 \cdot 10^{-6}$	kgm <sup>2</sup>
Koeficijent trenja motora	$B_m$	$5,675 \cdot 10^{-5}$	Nms/rad
Otpor namotaja rotora motora	$R$	4,3	$\Omega$
Električna konstanta	$K_e$	0,0406	Vs/rad
Mehanička konstanta	$K_m$	0,0248	Nm/A
Prenosni odnos reduktora	$i$	424	-

Blok dijagram posmatranog podsistema pogona za elevaciju je prikazan na sl.3. Veličine prikazane na ovoj slici imaju sledeća značenja:  $U_c$  - komandni napon proporcionalan zadatoj (željenoj) ugaonoj brzini,  $\dot{\alpha}$  - ugaona brzina nišanske ose po elevaciji,  $U_{ig}$  - napon koji daje tahogenerator (senzor ugaone brzine vratila motora),  $U_1$  - napon koji daje povratna sprega,  $U_i$  - napon srazmeran struji motora. MT1 i MT2 su merne tačke.

### Ispitivanje graničnih performansi

Minimalna ugaona brzina senzora se određuje tako što se komandni signal pogonskog podsistema smanjuje sve dok motor ne počne da se zaustavlja. Meri se signal senzora brzine kada se motor obrće najmanjom mogućom brzinom, bez zaustavljanja. Sl.4 prikazuje izmereni signal

tahogeneratora, koji odgovara minimalnoj brzini



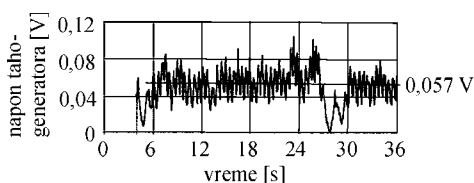
Slika 3. Blok dijagram pogonskog podsistema

eksperimentalnog uređaja. Srednja vrednost tog signala je 0,0565 V, odgovarajuća ugaona brzina rotora motora:

$$\omega_{m,\min} = \frac{U_{ig}}{0,06685 \frac{\text{Vs}}{\text{rad}}} = \frac{0,0565 \text{ V}}{0,06685 \frac{\text{Vs}}{\text{rad}}} = 0,845 \frac{\text{rad}}{\text{s}} \quad (8)$$

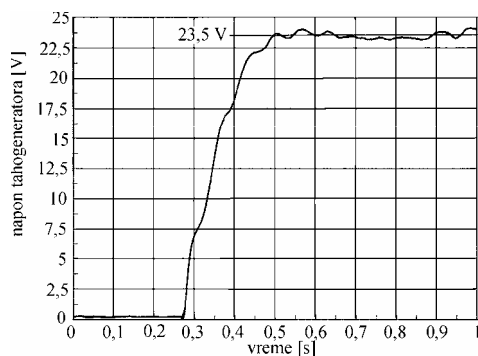
a odgovarajuća ugaona brzina nišanske ose:

$$\dot{\alpha}_{\min} = \frac{\omega_{m,\min}}{i} = \frac{0,845 \frac{\text{rad}}{\text{s}}}{424} = 0,002 \frac{\text{rad}}{\text{s}} \quad (9)$$



Slika 4. Merenje minimalne brzine

Maksimalna ugaona brzina se određuje tako što se pogonskom podsistemu zada najveći dopušteni komandni signal, sačeka da prestane prelazni proces i odredi srednja vrednost brzine na intervalu na kome je ona približno konstantna. Na sl.5 je prikazan odziv pogona na odskočni komandni (ulazni) signal koji uzima maksimalnu vrednost.



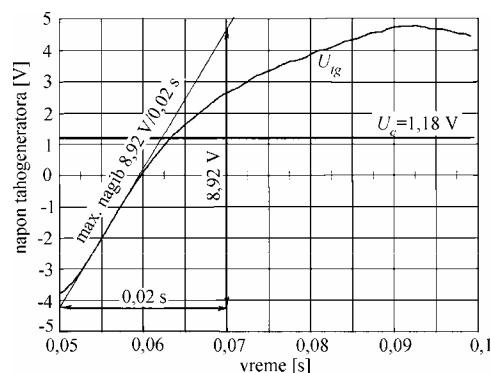
Slika 5. Merenje maksimalne brzine

Dobijene su sledeće vrednosti maksimalnih ugaonih brzina rotora motora i nišanske ose:

$$\omega_{m,\max} = \frac{23,5 \text{ V}}{0,06685 \frac{\text{Vs}}{\text{rad}}} = 351,1 \frac{\text{rad}}{\text{s}} \quad (10)$$

$$\dot{\alpha}_{\max} = \frac{\omega_{m,\max}}{i} = \frac{351,1 \frac{\text{rad}}{\text{s}}}{424} = 0,78 \frac{\text{rad}}{\text{s}} \quad (11)$$

Pogonskom podsistemu pri određivanju maksimalnog ubrzanja treba zadati trenutnu (odskočnu) promenu komandnog signala. Pri tom komandni signal treba da bude dovoljno mali da pogon ostane u normalnom (linearnom) domenu rada, kako se neka od komponenti podsistema ne bi primakla svojoj granici zasićenja i time smanjila ubrzanje pogona. Maksimalno ubrzanje se određuje kao maksimalni nagib krive brzine, pri odskočnoj promeni komandnog signala. Na sl.6 je prikazano određivanje nagiba signala tahogeneratorskog ispitivanog uređaja za praćenje.



Slika 6. Određivanje maksimalnog ubrzanja

Maksimalna ugaona ubrzanja rotora motora i nišanske ose u posmatranom primeru su:

$$\dot{\omega}_{m,\max} = \frac{8,92 \text{ V}}{0,02 \text{ s}} \frac{1}{0,06685 \frac{\text{Vs}}{\text{rad}}} = 6671 \frac{\text{rad}}{\text{s}^2} \quad (12)$$

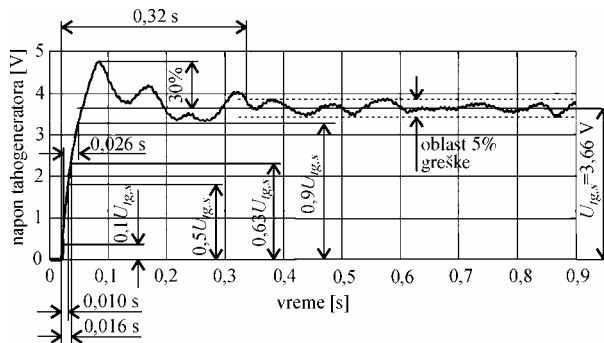
$$\ddot{\alpha}_{\max} = \frac{\dot{\omega}_{m,\max}}{i} = \frac{6671 \frac{\text{rad}}{\text{s}^2}}{424} = 15,73 \frac{\text{rad}}{\text{s}^2} \quad (13)$$

Postignuto maksimalno ubrzanje nišanske ose je znatno veće nego što je neophodno za praćenje brzih letelih

ciljeva, dok je maksimalna brzina dovoljna, s obzirom da se radi o pogonu za elevaciju, ali bi mogla da bude i veća, kako bi se obezbedilo efikasnije praćenje bliskih ciljeva pod velikim elevacionim uglovima. Minimalna brzina bi trebalo da bude manja, da bi se tačnije pratili mali ciljevi na velikim rastojanjima. Poboljšanje minimalne brzine ispitivanog uređaja se može postići smanjenjem prenosnog odnosa reduktora dva puta (po cenu još većeg smanjenja maksimalne brzine) ili ugradnjom snažnijeg motora, kao i tačnijom izradom i finijom završnom obradom zupčanika reduktora.

### Određivanje vremenskih konstanti, preskoka i statičke greške

Vremenske konstante, preskok i statička greška su pokazatelji dinamičkog ponašanja koji se određuju u vremenskom domenu. Određuju se merenjem odskočnog odziva pogonskog podsistema, odnosno promene izlaznog signala pri odskočnoj promeni ulaznog (komandnog) signala. Pri tom ulazni signal treba da bude dovoljno mali da sistem ostane u normalnom (linearnom) režimu rada. Sa snimljenog dijagrama odskočnog odziva se očitavaju navedeni pokazatelji. Na sl.7 je prikazano grafičko određivanje navedenih pokazatelja za posmatrani eksperimentalni uređaj.  $U_{igs,s}$  je napon tahogeneratorski koji odgovara ustaljenoj ugaonoj brzini nišanske ose. Napon tahogeneratorski koji odgovara zadatoj vrednosti ugaone brzine je  $U_{igs,z}=3,93$  V.



Slika 7. Određivanje pokazatelja dinamičkog ponašanja u vremenskom domenu

Procentualna statička greška se dobija korišćenjem izraza:

$$e_s = 100 \frac{U_{igs,z} - U_{igs,s}}{U_{igs,z}} \quad (14)$$

Vrednosti pokazatelja izračunatih na osnovu slike 7 date su u tabeli 2.

Tabela 2. Pokazatelji dinamičkog ponašanja

Parametar	Vrednost	Mera
Dominantna vremenska konstanta	0,016	s
Vreme kašnjenja	0,010	s
Vreme uspona	0,026	s
Vreme smirenja	0,32	s
Preskok	30	%
Statička greška	7,0	%

Može se uočiti da je odziv pogonske grupe veoma brz, ali da je statička greška brzine relativno velika. Ona se lako smanjuje promenom parametara upravljačke elektronike

pogona.

### Određivanje mrtvog hoda i momenta statičkog trenja

Mrtav hod reduktora i statički moment trenja nisu direktni pokazatelji dinamike, ali bitno utiču na dinamičko ponašanje pogona, naročito pri kretanju malim ugaonim brzinama. Mrtav hod reduktora se može odrediti na sledeći način:

- Na obrtnom nosaču senzora se ugradi senzor ugla nosača visoke preciznosti, ako takav senzor već nije sastavni deo nosača.
- Pogonskom podsistemu se zadaje ulazni signal takav da izaziva promenu smera obrtanja nosača pri sporoj promeni brzine motora. Zbog mrtvog hoda, pri promeni smera obrtanja motora, se neće odmah pokrenuti obrtni nosač senzora, već tek posle izvesnog vremena.
- Snimaju se signali sa senzora ugaone brzine motora i senzora ugla obrtnog nosača.
- Na osnovu snimljenih signala se određuju trenutak  $t_0$  kada je motor promenio smer i počeo ponovo da se obrće i trenutak  $t_1$  kada je obrtni nosač počeo da se obrće.
- Mrtav hod  $\psi_m$  na strani motora se dobija integraljenjem brzine motora:

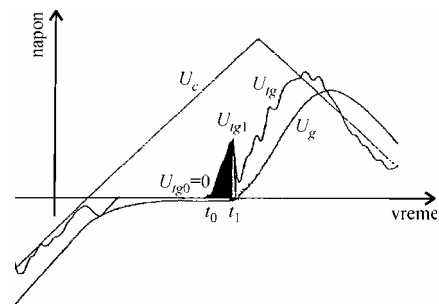
$$\psi_m = \int_{t_0}^{t_1} \omega_m(t) dt \quad (15)$$

- Mrtav hod  $\psi_L$  na strani opterećenja se dobija korišćenjem relacije:

$$\psi_L = \frac{\psi_m}{i} \quad (16)$$

Za određivanje mrtvog hoda reduktora za elevaciju eksperimentalnog uređaja za praćenje su korišćeni sledeći senzori: pozicioni žiroskop za merenje ugla obrtnog nosača i postojeći tahogenerator za merenje ugaone brzine motora. Na sl.8 su prikazani pobudni signal  $U_c$ , napon tahogeneratorski  $U_{ig}$  i napon žiroskopa  $U_g$ . Osenčena površina  $I$  ispod krive  $U_{ig}$  na intervalu  $(t_0, t_1)$  je približno trougaona:

$$I \cong \frac{1}{2} U_{ig2} (t_1 - t_0) \quad [Vs] \quad (17)$$



Slika 8. Određivanje mrtvog hoda reduktora

Mrtav hod reduktora na strani opterećenja je:

$$\psi_L = \frac{I}{0,06685 \frac{Vs}{rad} i} \quad [rad] \quad (18)$$

U posmatranom primeru su mrtvi hodovi računati za četiri različita ugla elevacije. Dobijena je srednja vrednost

$\bar{\psi}_L = 0,00064 \text{ rad}$ .

Statički moment trenja utiče na rotaciju uređaja vrlo malim ugaonim brzinama, pa je bitan za ocenjivanje kvaliteta dinamičkog ponašanja pogona. Ovaj moment se može meriti na sledeći način: na rastojanju  $L$  od ose rotacije se zakači dinamometar i na njegov slobodan kraj deluje silom  $F_s$  koja se povećava sve dok nosač senzora ne počne da rotira. Moment statičkog trenja  $M_s$  je jednak proizvodu kraka  $L$  i sile  $F_s$  pri kojoj je uređaj počeo da rotira:

$$M_s = LF_s \quad (19)$$

Na posmatranom uređaju za praćenje je izmeren moment  $M_s=4,95 \text{ Nm}$ . Nominalni moment motora sveden na izlazno vratilo reduktora je  $M_N=13,4 \text{ Nm}$ . Motor, dakle, postiže moment za startovanje obrtne mase, pri struji u iznosu 37% od nominalne struje. Statički moment  $M_s$  izaziva manje ili veće kašnjenje pri polasku iz stanja mirovanja ili pri promeni smera obrtanja (sl.8), zavisno od zakona upravljanja i zadatog oblika promene ugaone brzine.

Za kvalitetno praćenje malih letećih ciljeva na većim daljinama, mrtav hod i moment statičkog trenja posmatranog uređaja trebalo bi da budu manji od izmerenih. Ovo bi se moglo postići preciznijom izradom i kvalitetnijom obradom zupčanika i ležajeva prenosnog mehanizma.

### Određivanje pokazatelja dinamičkog ponašanja u frekventnom domenu

Najznačajniji pokazatelji dinamičkog ponašanja u frekventnom domenu su: propusni opseg, pretek faze i pretek pojačanja. Da bi se ispitali pokazatelji potrebno je izmeriti frekventne karakteristike zatvorenog i otvorenog kola pogonskog podsistema. Frekventna karakteristika  $F(j\omega)$  je kompleksna funkcija čiji moduo predstavlja amplitudno-

-frekventnu karakteristiku  $A(\omega)$  a ugaio  $\varphi(\omega)$  fazno-frekventnu karakteristiku:

$$F(j\omega) = A(\omega)e^{j\varphi(\omega)} \quad (20)$$

gde je  $\omega$  frekvencija signala.

Ako se sistem pobuđuje sinusnim ulaznim signalom  $A_{ul}\sin(\omega t)$  određene učestanosti  $\omega$ , izlaz sistema će, nakon iščezavanja prelaznih procesa, takođe, biti sinusna funkcija  $A_{iz}(\omega)\sin(\omega t - \varphi(\omega))$ , pod uslovom da se nalazi u linearnom režimu rada. Odnos amplituda izlaza i ulaza u tom slučaju predstavlja amplitudno-frekventnu karakteristiku za datu učestanost  $\omega$ :

$$A(\omega) = \frac{A_{iz}(\omega)}{A_{ul}} \quad (21)$$

Fazni pomak  $\varphi(\omega)$  izlaznog u odnosu na ulazni signal predstavlja fazno-frekventnu karakteristiku.

Frekventna karakteristika kao funkcija učestanosti se može dobiti merenjem odziva sistema na sinusnu ulaznu funkciju i njegovim poređenjem sa ulaznom funkcijom, za različite vrednosti učestanosti. Merenje treba ponoviti više puta za svaku učestanost i koristiti srednje vrednosti  $A(\omega)$  i  $\varphi(\omega)$ , kako bi se umanjio uticaj smetnji.

Problem nastaje kada ulazni signal nije sinusni. To se, na primer, javlja kada se meri tzv. *frekventna karakteristika otvorenog kola* [3] zatvorenog sistema upravljanja, bez

raskidanja povratne sprege. U tom slučaju se zatvorena sprega pobuđuje sinusnom funkcijom. U normalnom radnom režimu je signal greške (koji predstavlja ulaz otvorenog kola) razlika dve fazno pomerene sinusne funkcije sličnih amplituda. To znači da je amplituda signala greške mala, uporediva sa amplitudom šuma prisutnog u povratnoj petlji, što značajno povećava greške merenja (izračunavanja) frekventne karakteristike.

Zato se za izračunavanje frekventne karakteristike na osnovu merenja ulaza i izlaza koriste savremenije tehnike, kao što je brza Furijeova transformacija. Bez obzira na to, greške merenja frekventne karakteristike otvorenog kola bez raskidanja povratne sprege, značajno su velike. Zato, ako je moguće, pri takvim merenjima treba raskinuti povratnu spregu, a merenje organizovati tako da sistem ostaje u granicama koje garantuju pravilno ponašanje i bezbedan i ispravan rad sistema.

Da bi se frekventna karakteristika efikasno odredila na širokom intervalu učestanosti, potrebna je izuzetno velika brzina merenja i obrade podataka, a poželjna je i mogućnost automatske kontrole trajanja i promene učestanosti pobudnog signala. Zato se u tu svrhu koriste specijalizovani uređaji koji se nazivaju *analizatori signala* ili *analizatori frekventnog odziva*.

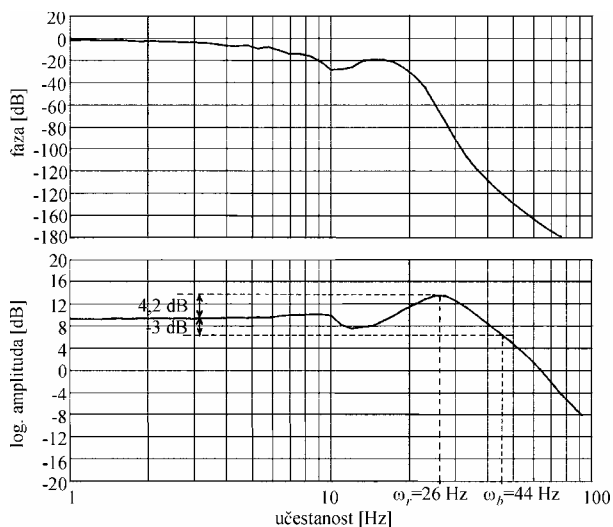
Propusni opseg zatvorenog sistema upravljanja, kakav je pogonski podsistem, se očitava sa frekventne karakteristike zatvorenog kola, a pretek faze i pretek pojačanja sa frekventne karakteristike otvorenog kola. Frekventne karakteristike se najčešće predstavljaju u vidu Bodeovog dijagrama, na kome se prikazuju fazno-frekventna  $\varphi(\omega)$  i logaritamska amplitudno-frekventna karakteristika:

$$L(\omega) = 20 \log_{10} A(\omega) \quad (21)$$

Bodeovi dijagrami sa frekventnim karakteristikama zatvorenog kola  $F(j\omega) = U_{ig}(j\omega)/U_c(j\omega)$  i otvorenog kola  $F_{ok}$

$(j\omega) = U_{ig}(j\omega)/E(j\omega)$  posmatranog pogonskog podsistema su prikazani na slikama 9 i 10.  $U_c(j\omega)$ ,  $U_{ig}(j\omega)$  i  $E(j\omega)$  su Furijeove transformacije komandnog signala  $U_c(t)$ , signala tahogeneratora  $U_{ig}(t)$  i signala greške  $e(t)$  (sl. 3), respektivno.

Sa dijagrama na sl.9 su očitane vrednosti: propusni opseg  $\omega_b=276 \text{ rad/s}=44 \text{ Hz}$ , rezonantna učestanost  $\omega_r=163 \text{ rad/s}=26 \text{ Hz}$  i rezonantni skok  $L_r=4,2 \text{ dB}$ .



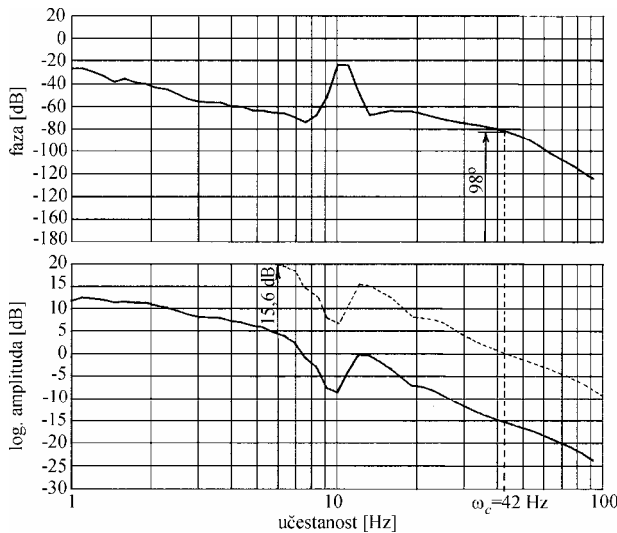
Slika 9. Bodeov dijagram zatvorenog kola

Da bi se izmerila frekventna karakteristika otvorenog kola, presečena je povratna sprega na mestu 1-1, sl.3. Tako  $F_{ok}(j\omega)$  predstavlja frekventnu karakteristiku  $U_{ig}(j\omega)/U_c(j\omega)$  sa prekidom signala u preseku 1-1, jer je tada  $e=U_c$ . Osim toga, pojačanje otvorenog kola je smanjeno dvadeset puta, da oscilacije uređaja po elevaciji pri manjim učestanostima pobude ne bi dovele do lomljenja graničnika uređaja. Bezbedno merenje frekventne karakteristike otvorenog kola moglo je da se ostvari i smanjenjem pobude  $U_c$  za dvadeset puta, ali bi tada odnos signal/šum bio nepovoljan.

S obzirom da je  $U_1=0,3U_{ig}$  (sl.3), a pojačanje je smanjeno dvadeset puta, normalna amplituda otvorenog kola veća je šest puta od izmerene. To znači da  $L_{ok}(\omega)$  treba podići za  $20\log 6=15,56$  dB da bi se odredio pretek faze otvorenog kola. Pretek faze otvorenog kola, određen korišćenjem sl.10, je:

$$\varphi_{pr} = 180^\circ + \varphi_{ok}(\omega_c) = 180^\circ - 82^\circ = 98^\circ \quad (22)$$

gde je  $\omega_c$  učestanost pri kojoj je  $L_{ok}(\omega_c)=0$ . Pretek pojačanja nije definisan za učestanosti do 100 Hz, jer je  $\varphi_{ok}(\omega) > -180^\circ$  za  $\omega \leq 100$  Hz.



Slika 10. Bodeov dijagram otvorenog kola

Može se zaključiti da posmatrani pogon ima veliki propusni opseg i veliku rezervu stabilnosti.

### Ocenjivanje nemerljivih parametara pogona

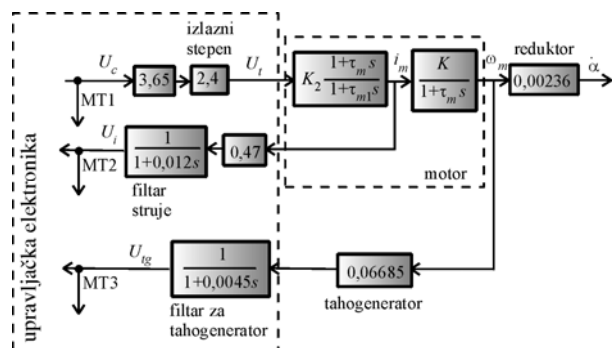
Izvesni parametri pogonske grupe ne mogu pouzdano i tačno da se izračunaju na osnovu raspoloživih tehničkih podataka, ali mogu da se izmere, kao što je slučaj sa mrtvim hodom reduktora i statičkim trenjem. Parametri koji ne mogu ni da se izračunaju na osnovu tehničkih podataka ni da se izmere, a imaju značajan uticaj na dinamičko ponašanje pogona, mogu da se ocene na osnovu merenja odziva komponenata pogona na vremenski promenljivi ulazni signal ili na osnovu merenja njihovih frekventnih karakteristika. Takvi parametri se pojavljuju u koeficijentima jednačina ponašanja i prenosnim funkcijama pogonskih komponenata i mogu se oceniti primenom nekog od brojnih postupaka iz teorije identifikacije sistema.

Opšti postupak za ocenjivanje nemerljivih parametara pogonske grupe je:

- Uoči se podsistem (deo) pogonske grupe najnižeg mogućeg reda, čije ponašanje zavisi od parametara koje treba oceniti.
- Raskinu se povratne sprege koje okružuju taj podsistem, ako je to moguće i bezbedno.
- Pobudni (komandni) signal se dovodi u tačku koja je što je moguće bliža posmatranom podsistemu.
- Biraju se dve merne tačke - jedna ispred, a druga iza posmatranog podsistema, tako da su one maksimalno blizu ulazu, odnosno izlazu podsistema. Time se minimizira broj i obim transformacija veličina koje su od interesa.
- Formira se matematički model dela sistema između dve izabrane merne tačke - u obliku diferencijalne jednačine, diferencne jednačine ili prenosne funkcije.
- Odabere se postupak koji obezbeđuje dovoljno tačno ocenjivanje parametara pomenutog dela sistema.
- Izaberu se oblik pobudnog signala, tip merenja i parametri merenja (npr. frekvencija pobudnog signala, period odabiranja itd), tako da najbolje odgovaraju odabranom postupku ocenjivanja.
- Izmere se odzivi podsistema i/ili njegova frekventna karakteristika (zavisno od odabranog postupka ocenjivanja).
- Primenom odabranog postupka se ocene koeficijenti formiranog matematičkog modela.
- Uspostavlja se matematička veza između ocenjenih koeficijenata i parametara koje treba odrediti. Korišćenjem tih veza izračunavaju se (ocenjuju) nepoznati parametri.

Opisani postupak je upotrebljen za ocenjivanje momenta inercije  $J_L$  i koeficijenta trenja  $B_L$  obrtnog dela posmatranog uređaja za praćenje na sledeći način:

- Parametri  $J_L$  i  $B_L$  javljaju se u prenosnim funkcijama motora (4,5). Prenosna funkcija napon-struja (5) je korišćena za ocenu parametara, a prenosna funkcija struja - brzina (4) za proveru ocena.
- Raskinete su veze 1-1, 2-2 i 3-3 u upravljačkoj elektronici pogona (sl.3). Time je dobijena blok-šema prikazana na sl.11.
- Pobudni signali su dovodeni u tačku MT1 (sl.11), koja je ujedno i merna tačka. To je merna tačka koja je najbliža kontaktima za napajanje motora, a omogućuje uvođenje pobudnih signala preko ulaza visoke impedanse.



Slika 11. Blok-šema preuređenog pogonskog podsistema

- Merne tačke MT2 i MT3 su korišćene za merenje struje motora  $i_m$  i njegove ugaone brzine  $\omega_m$ . Filtri, koji se

nalaze ispred mernih tačaka MT2 i MT3, smanjuju šum merenja, ali i menjaju donekle osobine signala koji se mere. O tome se pri ocenjivanju parametara mora voditi računa.

- Merene su frekventne karakteristike  $U_i(j\omega)/U_c(j\omega)$  i  $U_{ig}(j\omega)/U_i(j\omega)$ . Kretanje nosača senzora po elevaciji je ograničeno. Zato se pri merenju vodilo računa da on ne dolazi u granične položaje.
- Formirane su prenosne funkcije dela kola između tačaka MT1 i MT2 i dela kola između tačaka MT2 i MT3 (sl. 11):

$$\frac{U_i(s)}{U_c(s)} = 4,117K_2 \frac{1 + \tau_m s}{(1 + 0,012s)(1 + \tau_{m1}s)} = \frac{b_1 s + b_0}{a_2 s^2 + a_1 s + a_0} \quad (23)$$

$$\frac{U_{ig}(s)}{U_i(s)} = \frac{0,03142K}{1 + \tau_m s} = \frac{B_0}{A_1 s + A_0} \quad (24)$$

U prenosnoj funkciji (24) je zanemarena vremenska konstanta filtra za tahogenerator (0,0045 sekundi), jer se zna da je za red veličine manja od vremenskih konstanti motora. To ne važi za vremensku konstantu filtra struje (0,012 sekundi), pa se ona javlja u prenosnoj funkciji (23).

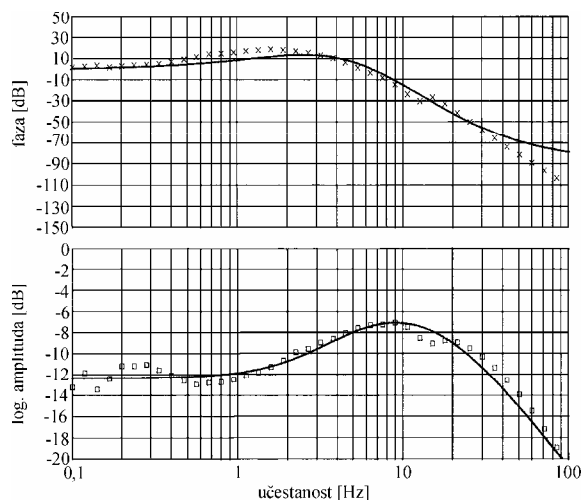
- Za ocenjivanje parametara je izabran postupak aproksimacije frekventne karakteristike racionalnom kompleksnom funkcijom [4].
- Izabranim postupkom su dobijene sledeće ocene parametara prenosnih funkcija (23,24):

$$b_0 = 0,24132, \quad b_1 = 0,015359 \quad (25)$$

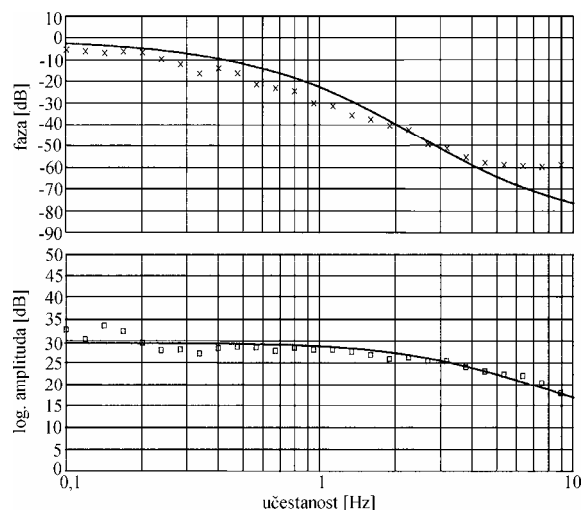
$$a_0 = 1, \quad a_1 = 0,0315, \quad a_2 = 0,00022205 \quad (26)$$

$$B_0 = 29,853, \quad A_0 = 1, \quad A_1 = 0,066 \quad (27)$$

Izmerene frekventne karakteristike i frekventne karakteristike odgovarajućih modela (23, 24), za vrednosti parametara (25-27) su prikazane na slikama 12 i 13. Pune linije označavaju frekventne karakteristike modela, a markeri (×, □) izmerene frekventne karakteristike.



Slika 12. Bodeov dijagram za deo sistema između tačaka MT1 i MT2



Slika 13. Bodeov dijagram za deo sistema između tačaka MT2 i MT3

S obzirom na (25), prenosna funkcija (23) se može napisati u obliku:

$$\frac{U_i(s)}{U_c(s)} = 0,2413 \frac{1 + 0,063s}{(1 + 0,0105s)(1 + 0,021s)} \quad (28)$$

Poređenjem (23 i 28) dobijene su sledeće ocene vremenskih konstanti motora:

$$\tau_{m1} = 0,021 \text{ s}, \quad \tau_m = 0,063 \text{ s} \quad (29)$$

Ocenjena vrednost vremenske konstante filtra za struju je 0,0105 s, što je blisko proračunskoj vrednosti 0,012 s. Iz (6) sledi:

$$J = \frac{\tau_{m1} K_e K_T}{R(1 - \frac{\tau_{m1}}{\tau_m})}, \quad B = \frac{J}{\tau_m} \quad (30)$$

Iz (29, 30) i tabele 1 sledi:

$$J = 7,376 \cdot 10^{-6} \text{ kgm}^2, \quad B = 1,1708 \cdot 10^{-4} \text{ Nms} \quad (31)$$

Iz (7), tabele 1 i (31) sledi:

$$J_L = 1,626 \cdot 10^{-6} \text{ kgm}^2, \quad B_L = 6,034 \cdot 10^{-5} \text{ Nms} \quad (32)$$

Ocena vremenske konstante motora  $\tau_m=0,066$  s, koja sledi iz ocene koeficijenta  $A_1$  (27) modela (24) dobro se slaže sa ocenom istog parametra ( $\tau_m=0,063$  s), dobijenom na osnovu koeficijenata (25, 26) modela (23). Frekventne karakteristike modela (23, 24) se dobro slažu sa izmerenim frekventnim karakteristikama - slike 12 i 13. Sve to potvrđuje da su ocene parametara  $J_L$  i  $B_L$  verodostojne.

## Zaključak

Dinamičko ponašanje i tačnost rada pogonskog podsistema uređaja za praćenje ciljeva su od suštinskog značaja za proces praćenja cilja i efikasnost sistema za upravljanje vatrom u celini. Kvalitetan rad pogona predstavlja neophodan uslov za kontinuirano merenje vektora položaja cilja savremenim senzorima, kao što su laserski daljinomer, termovizijska kamera i nišanski radar.

Predloženi postupci dinamičkog ispitivanja pogona uređaja za praćenje ciljeva omogućuju da se uspešno i za kratko vreme u laboratorijskim uslovima proveriti da li su ispunjeni tehnički zahtevi postavljeni određenom uređaju za praćenje. Postupci su tako definisani da omogućuju ispitivanje dinamike pogona korišćenjem standardne



laboratorijske opreme za merenje vremenskih odziva i frekventnih karakteristika sistema.

Date informacije, naročito praktični saveti za realizaciju opisanih postupaka ispitivanja i dijagrami dobijeni merenjima obavljenim na jednom konkretnom uređaju za praćenje, mogu korisno poslužiti inženjerima da uspešno obave ispitivanja različitih tipova sredstava za praćenje cilja.

- [2] DUBEY,G. *Power Semiconductor Controlled Drives*. Prentice-Hall, Englewood Cliffs, N.J, 1989.
- [3] MILOJKOVIĆ,B., GRUJIĆ,LJ. *Automatsko upravljanje*. Mašinski fakultet, Beograd, 1981.
- [4] DODIĆ,N. Određivanje prenosne funkcije sistema na bazi izmerenih vrednosti frekventne karakteristike. *Naučnotehnički pregled*, 1987, vol.37, no.9, p.24-28,

Rad primljen: 14.2.2000.god.

### Literatura

- [1] MILOJKOVIĆ,B., DEBELJKOVIĆ,D. *Projektovanje linearnih sistema*. Mašinski fakultet, Beograd, 1981..