

UDK: 681.58(047)=861
COSATI: 14-02, 14-07

Uticaj zazora u mehaničkim prenosnicima na pojavu i karakter oscilacija kod servosistema

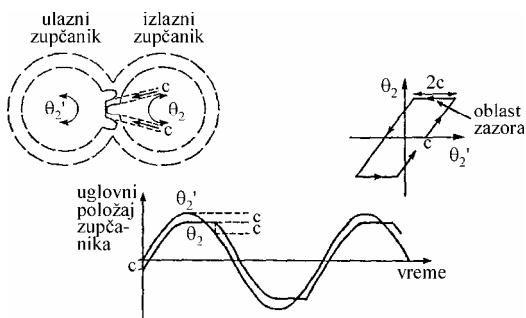
Petar Radović, dipl.inž.¹⁾
Dr Nenad Dodić, dipl.inž.¹⁾

Razmatran je uticaj nelinearnosti tipa zazora u izlaznom mehaničkom prenosniku (reduktoru) na pojavu oscilacija kod servosistema, koje dovode do sniženja njegovih izlaznih karakteristika. Analizom frekventne karakteristike, uzimajući u obzir nelinearnosti tipa zazora u reduktoru, razmotreni su uslovi za nastanak oscilacija u sistemu. Prikazan je postupak za određivanje delova frekventnog opsega u kojima je moguća pojava oscilacija, kao i za određivanje veličine amplituda i karaktera oscilacija. Prikazan je klasičan pristup rešavanju problema grafičkim metodama, a zatim i primenom računara. Dat je ilustrovani primer za upravljanje platformom vučnog artiljerijskog sistema PVO.

Ključne reči: Servosistem, mehanički prenosnik, reduktor, davač povratne sprege, nelinearnost, zazor u reduktoru, frekventne karakteristike sistema, oscilacije, artiljerijski sistem PVO.

Uvod

ZAZORI u mehaničkim prenosnicima (reduktorima) nastaju usled grešaka i netačnosti u izradi (greške u obliku profila, u koraku i debljini zubaca), u montaži reduktora (greške međuosnog rastojanja, ekscentričnost) ili istrošenosti zubaca tokom eksploatacije (usled mehaničkih i toplotnih naprezanja, vibracija i sl). Zazori u reduktoru, posebno zazori između zupčastih parova kojima se vrši sprezanje izlaznog vratila reduktora i rotora davača povratne sprege (razlagač, potencijometar ili optički enkoder), predstavljaju tip nelinearnosti koji izaziva pojavu nestalnih ili trajnih oscilacija kod servosistema. Pojava oscilacija dovodi do pogoršanja izlaznih karakteristika servosistema koje se ogleda u: smanjenju pojačanja, izobličenju i faznom kašnjenju izlaznog u odnosu na ulazni signal (sl.1), kao i podrhtavanju, odnosno nemogućnosti tačnog pozicioniranja objekta upravljanja.



Slika 1. Oblik ulaznog (sinusoidnog) i izlaznog signala servosistema kada postoje zazori u reduktoru

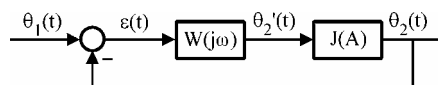
O ovoj pojavi mora da se vodi računa pri projektovanju i

integraciji servosistema namenjenih za pokretanje i upravljanje sredstvima NVO koja se koriste u PVO, od kojih se zahteva visoka tačnost pozicioniranja objekta upravljanja (senzori osmatračko-nišanskih uređaja i borbene platforme artiljerijskih sistema PVO), čak i pri minimalnim ugaonim brzinama praćenja i gađanja ciljeva u vazdušnom prostoru.

Prikazan je teorijski model uspostavljanja prenosne funkcije servosistema u frekventnom domenu nelinearnošću tipa zazora u mehaničkom prenosniku, kao uzročnika pojave neželjenih oscilacija u sistemu. Zatim su razmotreni uslovi u kojima dolazi do pojave oscilacija u sistemu i dati postupci (klasični, primenom grafičkih metoda - šablona i savremeniji postupak primenom računara) za određivanje frekvencije i veličine amplitude oscilacija. Razmatrana problematika je ilustrovana primerom iz oblasti elektrohidrauličnih servosistema za pokretanje i upravljanje vučnog artiljerijskog sistema PVO.

Određivanje prenosne funkcije nelinearnosti tipa zazora u reduktoru

Za određivanje parametara nelinearnosti servosistema, prema [1], koriste se blok - šema prikazana na sl.2.



Slika 2. Blok-šema servosistema sa uticajem nelinearnosti izlaznog reduktora

Prenosna funkcija linearnog dela sistema označena je kao $W(j\omega)$, a prenosna funkcija nelinearnosti tipa zazora u

¹⁾ Vojnotehnički institut VJ, 11000 Beograd, Katanićeva 15

reduktoru kao $J(A)$. Za formiranje teorijskog modela nelinearnosti koristi se poznati princip harmonijske linearizacije [2]. Suština postupka harmonijske linearizacije se sastoji u tome, da se signal na izlazu iz nelinearnog dela sistema razloži u Furijeov red i zameni prvim harmonikom tog reda. Ta zamena je validna ako se linearni deo servosistema ponaša kao filter niskih učestanosti, odnosno ako dobro prigušuje harmonike višeg reda. U tom slučaju se usvaja sledeći oblik signala koji ulazi u nelinearni deo sistema:

$$\Theta_2'(t) = A \cdot \sin \omega t \quad (1)$$

gde su: A - amplituda oscilacija, ω - učestanost oscilacija.

Na izlazu iz nelinearnog dela sistema dobija se signal sledećeg oblika:

$$\Theta_2(t) = F(A \cdot \sin \omega t) \quad (2)$$

a njegova približna vrednost izražena kao prvi harmonik Furijeovog reda, može da se predstavi u sledećem obliku:

$$\Theta_2'(t) = A \cdot [a(A) \cdot \sin \omega t + b(A) \cdot \cos \omega t] \quad (3)$$

gde su $a(A)$ i $b(A)$ koeficijenti harmonijske linearizacije.

Greška uspostavljanja izlaznog signala u odnosu na njegovu približnu vrednost može da se odredi iz izraza:

$$\delta(t) = \theta_2(t) - \theta_2'(t) \quad (4)$$

Greška $\delta(t)$ je periodična funkcija (sa periodom $T = 2\pi/\omega$), čija srednja kvadratna vrednost može da se izrazi na sledeći način:

$$\delta_m = \sqrt{\frac{1}{T} \int_0^T \delta^2(t) \cdot dt} \quad (5)$$

Ako se u ovaj izraz uvrste izrazi (2,3 i 4), dobija se veličina δ_m^2 u sledećem obliku:

$$\delta_m^2 = \frac{\omega}{\pi} \int_0^{2\pi} \{F(A \cdot \sin \omega t) - A[a(A) \cdot \sin \omega t + b(A) \cdot \cos \omega t]\}^2 dt \quad (6)$$

Da bi srednja kvadratna greška, prilikom zamene tačnog oblika izlaznog signala približnim, bila minimalna, treba da budu zadovoljeni sledeći uslovi:

$$\frac{\partial \delta_m^2}{\partial a(A)} = 0, \quad \frac{\partial \delta_m^2}{\partial b(A)} = 0 \quad (7)$$

Unošenjem izraza (6) u (7) i određivanjem navedenih parcijalnih izvoda uz određene matematičke transformacije, mogu da se odrede koeficijenti linearne harmonizacije u sledećem obliku:

$$a(A) = \frac{\omega}{\pi A} \int_0^{2\pi} \{F(A \cdot \sin \omega t) \cdot \sin \omega t dt \quad (8)$$

$$b(A) = \frac{\omega}{\pi A} \int_0^{2\pi} \{F(A \cdot \sin \omega t) \cdot \cos \omega t dt \quad (9)$$

Nelinearni deo sistema može da se izrazi pomoću

ekvivalentne prenosne funkcije sledećeg oblika [1]:

$$J(A) = q(A) \cdot e^{j\mu(A)} \quad (10)$$

gde su: $q(A)$ - ekvivalentna amplitudna karakteristika nelinearnosti, $\mu(A)$ - ekvivalentna fazna karakteristika nelinearnosti.

Karakteristike nelinearnosti $q(A)$ i $\mu(A)$ mogu da se izraze preko koeficijenata harmonijske linearizacije u sledećem obliku [1]:

$$q(A) = \sqrt{a^2(A) + b^2(A)} \quad (11)$$

$$\mu(A) = \arctg \frac{b(A)}{a(A)} \quad (12)$$

Ocena periodičnih režima u nelinearnom servosistemu može da se dobije analizom karakteristične jednačine zatvorene petlje sistema:

$$1 + W(j\omega) \cdot J(A) = 0 \quad (13)$$

Izražavanjem $W(j\omega)$ preko amplitudne i fazne karakteristike: $W(j\omega) = H(\omega) \cdot e^{j\theta(\omega)}$ i $J(A)$ preko izraza (10), karakteristična jednačina se prevodi u oblik:

$$-1 = H(\omega) \cdot q(A) \cdot e^{j[\theta(\omega) + \mu(A)]} \quad (14)$$

Zamenom: -1 sa $e^{j\pi}$ u izrazu (14) dobijaju se uslovi harmonijskog balansa (amplitude i faze) sistema u sledećem obliku:

$$\left. \begin{aligned} 20 \cdot \log H(\omega) &= 20 \cdot \log \frac{1}{q(A)} \\ \theta(\omega) &= -\pi - \mu(A) \end{aligned} \right\} \quad (15)$$

Za oblik nelinearnosti tipa zazora u reduktoru, izraz (15) dobija sledeći oblik:

$$\left. \begin{aligned} 20 \cdot \log H(\omega) &= 20 \cdot \log \frac{1}{q\left(\frac{c}{A}\right)} \\ \theta(\omega) &= -\pi - \mu\left(\frac{c}{A}\right) \end{aligned} \right\} \quad (16)$$

gde su, prema [2], izrazi za $q(c/A)$ i $\mu(c/A)$ dati sledećim oblicima:

$$q\left(\frac{c}{A}\right) = \frac{1}{\pi} \left\{ \left[\frac{\pi}{2} + \arcsin\left(1 - \frac{2c}{A}\right) \right]^2 + 4 \frac{c}{A} \left(1 - \frac{c}{A}\right) + 2 \left[\pi + 2 \arcsin\left(1 - \frac{2c}{A}\right) \right] \cdot \left(1 - \frac{2c}{A}\right) \sqrt{\frac{c}{A} \left(1 - \frac{c}{A}\right)} \right\}^{\frac{1}{2}} \quad (17)$$

$$\mu\left(\frac{c}{A}\right) = -\arctg \left\{ 4 \frac{c}{A} \left(1 - \frac{c}{A}\right) \left[\frac{\pi}{2} + \arcsin\left(1 - \frac{2c}{A}\right) + 2 \cdot \left(1 - \frac{2c}{A}\right) \sqrt{\frac{c}{A} \left(1 - \frac{c}{A}\right)} \right]^{-1} \right\} \quad (18)$$

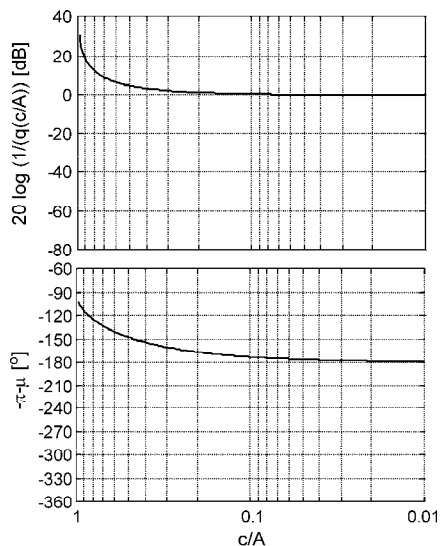
U (17 i 18), c predstavlja vrednost nelinearnosti tipa

zazora u reduktoru, izraženu u radijanima. Leve strane izraza (16) predstavljaju logaritamsku amplitudnu i faznu karakteristiku linearnog dela sistema, a desne strane ekvivalentnu logaritamsku amplitudnu i faznu karakteristiku nelinearnog dela sistema. Uočava se da pri istovremenom ispunjenju oba uslova harmonijske ravnoteže (16) u sistemu se generišu oscilacije koje mogu da imaju nestalni ili trajni karakter (samooscilovanje sistema). Istovremeno ispunjenje oba uslova se postiže kada se preseki linearnih i nelinearnih amplitudnih i faznih karakteristika nalaze na istoj vertikali. Sa matematičkog aspekta, problem se svodi na izračunavanje vrednosti frekvencije oscilovanja sistema ω_s koja predstavlja rešenje sistema nelinearnih jednačina (16, 17 i 18).

Grafičko određivanje frekvencije i amplitude oscilacija kod servosistema

Sistem nelinearnih jednačina (16) je rešavan u ranijoj praksi grafičkim putem, a danas se rešava u praktičnim inženjerskim analizama, na sledeći način:

- izradi se Bodeov dijagram (grafički prikaz frekventne karakteristike) linearnog dela sistema;
- na providnoj foliji se, prema (17,18), izradi u istoj razmeri grafički šablon kod koga su na ordinati prikazane: ekvivalentna amplitudna karakteristika $20 \log [1/q(c/A)]$ i ekvivalentna fazna karakteristika $-\pi - \mu(c/A)$ nelinearnosti tipa zazora u reduktoru, a na apscisi: odnos veličine zazora i amplitude oscilacija c/A u logaritamskoj podeli (sl.3);



Slika 3. Šablon za određivanje amplitude i frekvencije oscilacija u funkciji nelinearnosti tipa zazora u reduktoru

- šablon se pomera po Bodeovom dijagramu linearne prenosne funkcije sistema tako da apscisa c/A šablona ostaje paralelna sa apscisom Bodeovog dijagrama, sve dok se preseki krivih $20 \log [1/q(c/A)]$ i $-\pi - \mu(c/A)$ na šablonu sa krivama logaritamske amplitude i faze Bodeovog dijagrama ne nađu na istoj vertikali, nakon čega se na apscisi Bodeovog dijagrama očitava vrednost frekvencije oscilovanja ω_s , kao frekvencija koja odgovara presečnim tačkama preseka;
- usvajanjem pretpostavke, da je poznata vrednost zazora c (proračunska vrednost u procesu projektovanja ili vrednost dobijena identifikacijom parametara

realizovanog servosistema), sa šablona se očitava vrednost c/A , odnosno odredi vrednost amplitude oscilacija A ;

- u toku eksploatacije vrednosti osnovnih parametara servosistema mogu značajno da se promene (povećanje zazora usled istrošenosti zubaca reduktora, smanjenje faktora prigušenja i sl.), tako da može da dođe do pojave takvih vrednosti pojačanja servosistema koje mogu da izazovu pojavu i drugih vrednosti frekvencija na kojima se javljaju oscilacije. Primenom metode šablona za različite vrednosti pojačanja moguće je identifikovati kritične vrednosti pojačanja i delove frekventnog opsega u kojima mogu da se pojave oscilacije kod razmatranog servosistema, posle čega treba da se preduzmu odgovarajuće korektivne mere radi njihovog eliminisanja.

Korektivne mere se sastoje u sledećem:

- u procesu projektovanja i integracije servosistema moguće je variranje vrednosti osnovnih parametara servosistema u cilju izbora optimalnih vrednosti pojačanja u sistemu. Takođe je moguće primeniti neki od različitih tipova uskladnika koji uslovljavaju da ne dođe do pojave harmonijskog balansa u sistemu, kao uslova za nastanak oscilacija.
- ako do pojave neželjenih oscilacija dođe posle određene eksploatacije servosistema, treba pristupiti merenju i identifikaciji njegovih osnovnih parametara koje, potom treba primenom korektivnih mera (zamena istrošenih zupčanika reduktora, provera čistoće i izbacivanje vazduha iz hidraulične instalacije i sl.) dovesti u projektovane granice.

Na današnjem stupnju razvoja računarskih resursa moguće je, primenom sopstvenih softverskih rešenja ili nekog od komercijalnih programskih paketa, naći egzaktnije rešenje sistema nelinearnih jednačina (16, 17 i 18). Autori su u rešavanju navedenog problema koristili numeričku metodu za rešavanje sistema nelinearnih jednačina. Postupak za numeričko određivanje frekvencije i amplitude oscilacija je prikazan u nastavku teksta.

Numeričko određivanje frekvencije i amplitude oscilovanja

Uslov (16) može da se napiše u sledećem obliku:

$$f_1(x_1, x_2) = H(\omega) - \frac{1}{q\left(\frac{c}{A}\right)} = 0 \quad (19)$$

$$f_2(x_1, x_2) = \theta(\omega) + \pi + \mu(A) = 0 \quad (20)$$

gde su:

$$x_1 = \omega \quad (21)$$

$$x_2 = c/A \quad (22)$$

Sistem nelinearnih jednačina (19, 20) rešava se numerički za zadatu tačnost rešenja ϵ , korišćenjem Njutnove metode [3]. Kada se jednačine (19, 20) razviju u Tejlorov red u okolini pretpostavljenog rešenja x_1, x_2 i zanemare parcijalni izvodi čiji je red viši od prvog, dobija se:

$$f_1(x_1 + \Delta x_1, x_2 + \Delta x_2) = f_1(x_1, x_2) + \frac{\partial f_1(x_1, x_2)}{\partial x_1} \Delta x_1 + \frac{\partial f_1(x_1, x_2)}{\partial x_2} \Delta x_2 \quad (23)$$

$$f_2(x_1 + \Delta x_1, x_2 + \Delta x_2) = f_2(x_1, x_2) + \frac{\partial f_2(x_1, x_2)}{\partial x_1} \Delta x_1 + \frac{\partial f_2(x_1, x_2)}{\partial x_2} \Delta x_2 \quad (24)$$

gde su Δx_1 i Δx_2 dopune x_1, x_2 do tačnih rešenja sistema (19, 20). U tom slučaju važi:

$$\frac{\partial f_1(x_1, x_2)}{\partial x_1} \Delta x_1 + \frac{\partial f_1(x_1, x_2)}{\partial x_2} \Delta x_2 = -f_1(x_1, x_2) \quad (25)$$

$$\frac{\partial f_2(x_1, x_2)}{\partial x_1} \Delta x_1 + \frac{\partial f_2(x_1, x_2)}{\partial x_2} \Delta x_2 = -f_2(x_1, x_2) \quad (26)$$

Rešavanjem sistema linearnih jednačina (25,26) dobijaju se popravke Δx_1 i Δx_2 . Polazna rešenja se popravljaju na sledeći način:

$$x_1 \leftarrow x_1 + \Delta x_1 \quad (27)$$

$$x_2 \leftarrow x_2 + \Delta x_2 \quad (28)$$

i za popravljena rešenja x_1, x_2 ponovo rešava (25,26). Simbol “ \leftarrow ” označava dodeljivanje. Iterativni postupak rešavanja (25,26) i određivanja popravki (27,28) se ponavlja sve dok se ne postigne zahtevana tačnost:

$$|\Delta x_1| \leq e \quad \text{ i } \quad |\Delta x_2| \leq e \quad (29)$$

Dobijeno rešenje $x_1 = \omega_a$ predstavlja frekvenciju oscilacija, a $x_2 = c/A_a$ odgovarajući odnos zazora i amplitude oscilacija, odakle se dobija amplituda: $A_a = c/x_2$. Realizovano je softversko rešenje *Zazor*, koje za zadatu prenosnu funkciju linearnog dela sistema, zadatu tačnost e i zadatu početna rešenja ω_{a0} i $(c/A)_0$ daje vrednosti ω_a i c/A_a .

Određivanje karaktera oscilacija

Oscilacije koje se javljaju kod servosistema mogu biti nestalne i trajne. Određivanje karaktera oscilacija je važno, posebno ako se primenom približne, grafičke (šablon) metode ili tačnije, numeričke metode, utvrdi da u servosistemu postoje dve ili više učestanosti na kojima mogu da se jave oscilacije.

Za određivanje karaktera oscilacija kod nelinearnosti sa promenom znaka (dvoznačna nelinearnost) kao što je zazor u mehaničkom prenosniku, predložena je i može da se primeni sledeća praktična metoda [2]:

Kada se pomeranjem navedenog šablona po Bodeovom dijagramu odredi jedna ili više frekvencija na kojima je moguća pojava oscilacija, karakter oscilacija se ocenjuje na osnovu sledećeg kriterijuma:

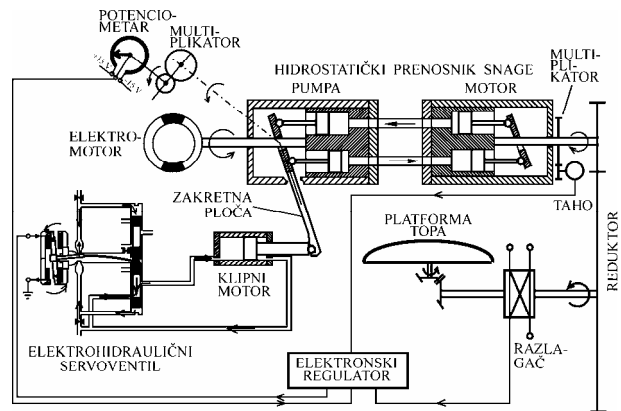
- trajne oscilacije (samooscilovanje sistema) se javljaju ako se s porastom amplitude nelinearnosti $A + \Delta A$, tačka preseka amplitudnih karakteristika: $20 \log [1/q(c/A)]$ i $20 \log H(\omega)$, koja leži na istoj vertikali sa presekom faznih karakteristika: $-\pi - \mu(c/A)$ i $\theta(\omega)$, nalazi van oblasti koju obrazuju kriva linearne amplitudne karakteristike ($20 \log H(\omega)$) i apscisna osa (ω);
- nestalne oscilacije se javljaju ako se s porastom

amplitude nelinearnosti $A + \Delta A$, tačka preseka amplitudnih karakteristika: $20 \log [1/q(c/A)]$ i $20 \log H(\omega)$ koja leži na istoj vertikali sa presekom faznih karakteristika: $-\pi - \mu(c/A)$ i $\theta(\omega)$, nalazi u okviru oblasti koju obrazuju kriva linearne amplitudne karakteristike: $20 \log H(\omega)$ i apscisna osa (ω);

Primer iz prakse

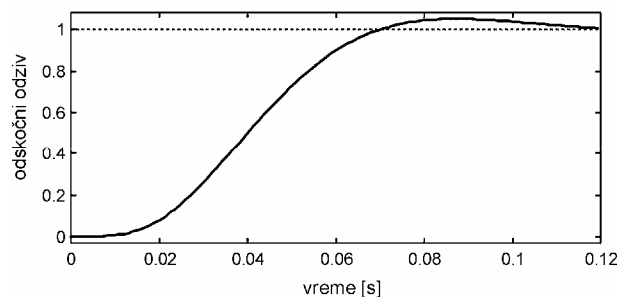
Na sl.3 je prikazan elektrohidraulični pozicioni servosistem za pokretanje platforme jednog protivavionskog topa. Linearni deo otvorenog kola pozicione petlje ima sledeću prenosnu funkciju:

$$W(s) = K \cdot 58,641 \cdot [1,1014 \cdot 10^{-7} s^5 + 5,552 \cdot 10^{-5} s^4 + 0,01311 s^2 + 1,395 s + 79,62]^{-1} \quad (30)$$



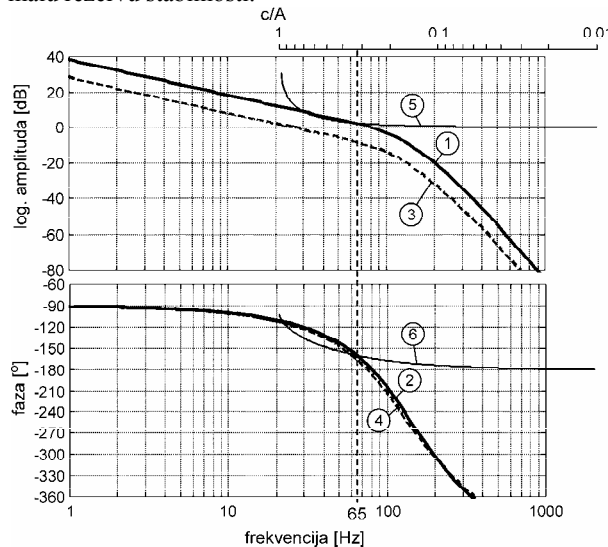
Slika 3. Servosistem protivavionskog topa

Koeficijent K predstavlja pojačanje proporcionalnog regulatora ugla platforme. Nominalna vrednost pojačanja je $K=35,0$. Faktor prigušenja hidrostatičkog prenosnika snage je 0,9, a sopstvena prirodna frekvencija 219 rad/s. Koeficijenti prenosne funkcije posmatranog servosistema su identifikovani na osnovu njegovih izmerenih frekventnih karakteristika [4]. Odskočni odziv celog servosistema za nominalnu vrednost pojačanja je prikazan na sl.4, a odgovarajući Bodeov dijagram na sl.5 – krive 1 i 2. Zazor u reduktoru je $c=0,001$ rad. Pri nominalnim vrednostima pojačanja K i faktora prigušenja ne dolazi do trajnih oscilacija zbog postojanja zazora u reduktoru i opisani postupci određivanja frekvencije i amplitude oscilacija ne daju rešenje.



Slika 4. Odskočni odziv servosistema

Ako se faktor prigušenja smanji na 0,72, npr. zbog prisustva izvesne količine vazduha u fluidu koji protiče kroz hidrostatički prenosnik snage, onda, pri povećanju K , dolazi do pojave oscilacija i to za vrednosti $K \geq 110$. Bodeov dijagram za faktor prigušenja 0,72 i pojačanje $K=110$ je prikazan na slici 5 – krive 3 i 4. Pokazatelji kvaliteta rada za nominalne vrednosti parametara i za vrednosti parametara pri kojima se javljaju oscilacije su dati u tabeli 1. Može se uočiti da sistem, pri $K=110$, ima vrlo malu rezervu stabilnosti.



Slika 5. Određivanje frekvencije oscilacija u preseku amplitudno-fazne karakteristike linearnog dela sistema i šablona nelinearnosti tipa zazora u reduktoru

Tabela 1. Pokazatelji kvaliteta rada servosistema

Parametri servosistema	Normalne vrednosti	Vrednosti pri kojima se javljaju trajne oscilacije
Dominantna vremenska konstanta [s]	0,05	1,30
Vreme smirenja [s]	0,12	4,5
Pretek faze [°]	61,6	2,4
Pretek pojačanja [dB]	9,8	0,3
Propusni opseg [rad/s]	57	114

Korišćenjem šablona (sl.5 krive 5 i 6) su dobijene sledeće vrednosti: $\omega_a=65$ rad/s, $c/A=0,32$. Prema ovim rezultatima, amplituda oscilacija servosistema je $A=0,0031$ rad (3,1 mrad).

Primenom numeričkog postupka dobijeni su sledeći rezultati: $\omega_a=65$ rad/s, $c/A=0,29$, kojima odgovara amplituda oscilacija $A=0,0034$ rad (3,4 mrad). Može se uočiti dobro slaganje rezultata, s obzirom na relativno slabu preciznost grafičkog postupka.

Prema navedenom kriterijumu za određivanje karaktera oscilacija, može da se uoči, da se za malo povećanje amplitude $A+\Delta A$, tačka preseka amplitudno-faznih karakteristika linearnog i nelinearnog dela sistema, koja leži na istoj vertikali, nalazi van oblasti koju obuhvataju amplitudna karakteristika linearnog dela sistema i apscisna osa, što ukazuje da se u ovom slučaju radi o trajnim oscilacijama (samooscilacije) u servosistemu.

Razmatrani primer pokazuje, da je pri veličini zazora u izlaznom reduktoru elektrohidrauličnog servosistema od 0,001 rad (1 mrad) i određenim vrednostima pojačanja

moгуća pojava trajnih oscilacija u sistemu, čija amplituda iznosi 3,4 mrad. Ova vrednost predstavlja kritičnu granicu, s aspekta ostvarivanja zahteva za tačnost servosistema savremenog artiljerijskog sistema PVO, odnosno zahteva za uspešno praćenje i gađanje savremenih ciljeva u vazдушnom prostoru. Analiza ove pojave, prema izloženoj metodologiji, omogućuje da se na realizovanom servosistemu, posle merenja i identifikacije odstupanja osnovnih parametara od njihovih projektovanih vrednosti, primene korektivne mere radi dovođenja vrednosti pojačanja u projektovane granice i na taj način eliminiše pojava neželjenih oscilacija u sistemu.

Zaključak

Zazori u izlaznim mehaničkim prenosnicima (reduktorima) servosistema nastaju usled nepreciznosti u izradi i montaži zupčanika, kao i usled trošenja zubaca tokom eksploatacije (uticaj mehaničkih i termičkih opterećenja, vibracija i sl.). Ovaj tip nelinearnosti, koji se javlja kao osnovni uzročnik oscilacija u sistemu, veoma negativno utiče na izlazne karakteristike servosistema - izaziva izobličenje i fazno kašnjenje izlaznog signala u odnosu na ulazni signal, podrhtavanje i nemogućnost tačnog pozicioniranja objekta upravljanja i sl. O tome posebno treba voditi računa pri projektovanju i integraciji servosistema od kojih se zahteva visoka tačnost pozicioniranja objekta upravljanja u prostoru, kao što su servosistemi za pozicioniranje senzora osmatračko-nišanskih uređaja i platformi artiljerijskih sistema PVO tokom praćenja i gađanja ciljeva u vazдушnom prostoru.

U radu je prikazan postupak određivanja frekventne karakteristike servosistema, uzimajući u obzir i ekvivalentnu frekventnu karakteristiku nelinearnost tipa zazora u reduktoru, koja se dobija postupkom tzv. harmonijske linearizacije [1,2]. Razmotreni su uslovi za nastanak oscilacija u sistemu (pojava harmonijskog balansa) i prikazan je praktični pristup rešavanju tog problema grafičkim putem, izradom odgovarajućeg šablona za nelinearnost tipa zazora u reduktoru. Autori su predložili savremeniji pristup primenom numeričkih metoda rešavanja sistema nelinearnih jednačina pomoću računara.

Primenom jedne ili druge metode je moguće, pri određenim vrednostima pojačanja u sistemu, odrediti jednu ili više frekvencija na kojima je moguća pojava oscilacija kao i veličinu njihove amplitude. Primenom izloženog kriterijuma, moguće je, takođe, odrediti karakter oscilacija, odnosno, zaključiti da li se, kod razmatranog servosistema, radi o nestalnim ili trajnim oscilacijama.

Posle određivanja delova frekventnog opsega i vrednosti pojačanja za koje je moguća pojava oscilacija kao i njihove amplitude i karaktera, moguće je pristupiti primeni korektivnih mera na sistemu. U procesu projektovanja mogu da se variraju vrednosti pojačanja i primene različite vrste uskladnika koji onemogućuju pojavu harmonijskog balansa u sistemu. Ako do pojave neželjenih oscilacija dođe tokom eksploatacije, potrebno je izvršiti pregled komponenata i izmeriti osnovne parametre servosistema, a zatim ih, primenom korektivnih mera (zamena istrošenih zupčanika reduktora, provera čistoće i izbacivanje vazduha iz hidraulične instalacije i sl.), dovesti u projektovane granice.

Primena izložene metodologije za analizu pojave oscilacija u sistemu, usled nelinearnosti tipa zazora u reduktoru, prikazana je na primeru elektrohidrauličnog servosistema za pokretanje i upravljanje platformom vučnog artiljerijskog sistema PVO od koga se zahteva visoka tačnost praćenja i gađanja ciljeva u vazduhu.

Literatura

- [1] ORLOV, B.V. *Proektirovanie raketnih i stvoljnyh sistem*. Mašinstroenie, Moskva 1974.
- [2] IVAŠČENKO, N.N. *Avtomatičeskoe regulirovanie*, Mašinstroenie, Moskva, 1978.
- [3] SIMONVIĆ, V. *Numeričke metode*. Mašinski fakultet, Beograd 1979.
- [4] DODIĆ, N. Određivanje prenosne funkcije sistema na bazi izmerenih vrednosti frekventne karakteristike. *Naučno-tehnički pregled*, 1987, vol.37, no.9, p.24-28.

Rad primljen: 19.9.2000.god.