

Primena nelinearnog upravljanja sa aktivnim potiskivanjem poremećaja u sistemu pozicioniranja laserske prateće glave za samovođenje rakete

Momir R. Stanković, Stojadin
M. Manojlović, Vladimir R.
Milovanović,
Vojna akademija,
Beograd, Srbija

momir.stankovic@va.mod.gov.rs
colemanojle@yahoo.com,
vaci_milovanovic@yahoo.com

Milan R. Rapaić,
Fakultet tehničkih nauka,
Novi Sad, Srbija
rapaja@uns.ac.rs

Milica B. Naumović
Elektronski fakultet,
Niš, Srbija
milica.naumovic@elfak.ni.ac.rs

Sažetak— U radu je predložena primena koncepta nelinearnog upravljanja sa aktivnim potiskivanjem poremećaja (NADRC) u sistemu pozicioniranja laserske prateće glave za samovođenje (GSV) rakete. Pozicioniranje GSV na laserom označeni stacionarni cilj i praćenja manevrišućih ciljeva je formulisano kao regulacioni upravljački problemi, gde su poremećaji koji nastaju kao posledica manevra cilja, vibracija tela rakete i varijacije parametara predstavljani kao jedan totalni poremećaj. Simulacioni rezultati su pokazali da za odgovarajuće podešene parametre NADRC regulator omogućuje bolje performanse pozicioniranja GSV u odnosu na primenu linearnog upravljanja sa aktivnim potiskivanjem poremećaja.

Ključne reči- Nelinearno upravljanje sa aktivnim potiskivanjem poremećaja (NADRC); Nelinearni prošireni opservers stanja (NESO); Glava za samovođenje rakete.

I. UVOD

Upravljanje sa aktivnim potiskivanjem poremećaja (Active Disturbance Rejection Control-ADRC) bazirano je na ideji da se celokupna nemodelirana dinamika sistema kao i svi spoljašnji poremećaji predstave kao jedan ukupni (totalni) poremećaj, koji se definiše kao dodatno (prošireno) stanje sistema. Primenom proširenog opserversa stanja (Extended State Observer-ESO) vrši se estimacija totalnog poremećaja, a nakon toga njegova aktivna kompenzacija pomoću odgovarajućeg upravljačkog zakona. Na ovaj način bilo koji model lineranog ili nelinearnog procesa, u prisutvu različitih spoljašnjih poremećaja, se svodi na kanoničnu formu redne veze integratora, koja omogućuje jednostavno upravljanje zatvaranjem povratnih sprege po ostalim estimiranim stanjima sistema [1].

Kako bi se omogućile bolje performanse sistema u osnovnoj postavci ADRC-a uvedene su i određene nelinearnosti pri sintezi ESO-a i zakona upravljanja [2]. Ipak, praktična primena nelinearnog ADRC-a (NADRC) je donekle ostala ograničena zbog relativno složene strukture i velikog broja parametara za podešavanje. Međutim, povećanje

implementacionih mogućnosti digitalnih platformi za realizaciju sistema upravljanja (FPGA, DSP), kao i razvoj algoritama za podešavanje parametara, su omogućili sve veću i jednostavniju primenu NADRC regulatora [3],[4].

Osnovna funkcija laserske prateće GSV je generisanje signala neophodnih za realizaciju odgovarajuće metode vođenja rakete (projektila). Nakon detekcije i zahvata cilja, prateća GSV radi u režimu automatskog praćenja cilja, obezbeđujući neophodne signale, kao npr. signale koji sadrže informacije o ugaonoj brzini linije viziranja cilja (LVC). Kvalitet praćenja cilja u veoma složenom radnom okruženju nameće visoke zahteve pri projektovanju i realizaciji upravljačkih sistema GSV.

U ovom radu razmatrano je upravljanje laserskom pratećom GSV sa kvadrantnim fotodetektorom (KFD) kao senzorom. Pozicioniranja optičke ose GSV u pravcu cilja je predstavljeno kao regulacioni upravljački problem u prisustvu poremećajnih efekata kao što su: manevar cilja, vibracije platforme na kojoj je montirana GSV (telo rakete), nelinearnosti i merni šumovi detektora, unakrsne veze između kanala upravljanja, neodređenost parametara i nemodelovana dinamika komponenata sistema. Shodno tome, predložena je primena NADRC koncepta, sa idejom da se svi poremećaji uključe u jedan totalni poremećaj koji se aktivno potiskuje u realnom vremenu. Parametri regulatora su podešeni na osnovu pretpostavljenih maksimalnih manevra cilja. Simulaciona analiza, sprovedena za različite scenarije manevrisanja cilja je pokazala da projektovani regulator ostvaruje bolje performanse upravljanja u odnosu na linerani ADRC regulator, predložen u [5].

II. KONCEPT NELINEARNOG UPRAVLJANJA SA AKTIVNIM POTISKIVANJEM POREMEĆAJA

Razmotrimo sistem n -tog reda, sa jednim ulazom $u(t)$ i izlazom $y(t)$, opisan jednačinom:

$$y^{(n)}(t) = f_{\text{int}}(y^{(n-1)}(t), \dots, y(t), t) + bu(t) + w(t), \quad (1)$$

gde je $f_{\text{int}}(\cdot)$ nepoznata unutrašnja dinamika sistema, $w(t)$ spoljašnji poremećaj, a b nepoznati parametar sistema, koji možemo zapisati u obliku $b = b_0 + \Delta b$, gde je b_0 najbolja aproksimacija vrednosti parametra. Ukoliko nepoznatu unutrašnju dinamiku $f_{\text{int}}(\cdot)$, spoljašnji poremećaj $w(t)$ i grešku u aproksimaciji parametra Δb uvrstimo u jedan totalni poremećaj $f(t) = f_{\text{int}}(\cdot) + w(t) + \Delta b u(t)$, sistem (1) možemo zapisati u obliku:

$$y^{(n)}(t) = f(t) + b_0 u(t), \quad (2)$$

ili u formi modela u prostoru stanja kao:

$$\begin{aligned} \dot{x}_1(t) &= x_2(t), \\ &\vdots \\ \dot{x}_{n-1}(t) &= x_n(t), \\ \dot{x}_n(t) &= f(t) + bu(t), \\ y(t) &= x_1(t) \end{aligned} \quad (3)$$

gde je $X = [x_1, \dots, x_n]^T \in \mathbb{R}^n$ vektor stanja sistema. Kako je analitički izraz funkcije $f(t)$ najčešće nepoznat, koncept ADRC-a polazi od ideje njene estimacije i kompenzacije u realnom vremenu. Ukoliko pretpostavimo da je $f(t)$ diferencijabilna funkcija, sistem (3) možemo proširiti sa novom promenljivom stanja:

$$\begin{aligned} \dot{x}_1(t) &= x_2(t), \\ &\vdots \\ \dot{x}_{n-1}(t) &= x_n(t), \\ \dot{x}_n(t) &= \dot{x}_{n+1}(t) + bu(t), \\ \dot{x}_{n+1}(t) &= \dot{f}(t), \\ y(t) &= x_1(t). \end{aligned} \quad (4)$$

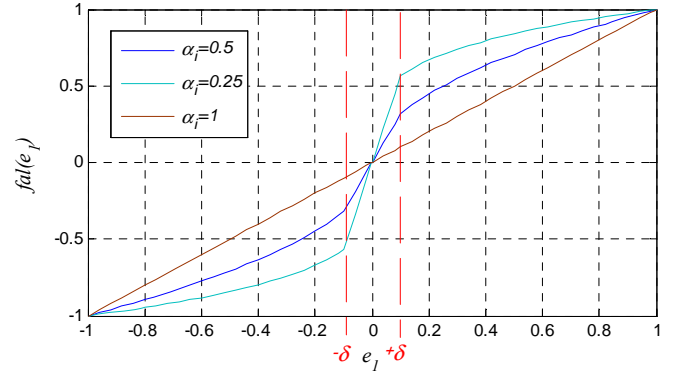
Estimaciju stanja sistema (4) ostvarujemo primenom nelinearnog ESO-a (NESO) $n+1$. reda:

$$\begin{aligned} \dot{\hat{x}}_1(t) &= \dot{\hat{x}}_2(t) + \beta_1 \varphi_1(e_1), \\ &\vdots \\ \dot{\hat{x}}_{n-1}(t) &= \dot{\hat{x}}_n(t) + \beta_{n-1} \varphi_{n-1}(e_1), \\ \dot{\hat{x}}_n(t) &= \dot{\hat{x}}_{n+1}(t) + b_0 u(t) + \beta_n \varphi_n(e_1), \\ \dot{\hat{x}}_{n+1}(t) &= \beta_{n+1} \varphi_{n+1}(e_1), \end{aligned} \quad (5)$$

gde je $\hat{X} = [\hat{x}_1, \dots, \hat{x}_{n+1}]^T \in \mathbb{R}^{n+1}$ vektor estimiranih stanja, $e_1(t) = x_1(t) - \hat{x}_1(t)$ greška procene izlaza, $\beta_i (i \in [1, n+1])$ pojačanja observera, a $\varphi_i(e)$ nelinearna fal funkcija definisana izrazom [2]:

$$\varphi_i(e_1) = fal(e_1(t), \alpha_i, \delta) = \begin{cases} e_1(t) / \delta^{1-\alpha_i} & , \quad |e_1(t)| \leq \delta \\ |e_1(t)|^{\alpha_i} \text{sign}(e_1(t)), & |e_1(t)| > \delta \end{cases} \quad (6)$$

Grafički prikaz funkcije (6) za $\delta = 0.1$ i različite vrednosti α_i dat je na Sl.1.



Slika 1 Grafički prikaz fal funkcije

Kao što možemo videti, izborom parametra δ menja se širina lineranog regiona oko nulte vrednosti $e_1(t)$, i najčešće se δ usvaja tako da bude manje od greške estimacije u stacionarnom stanju [6]. Usvajanjem parametra $\alpha_i < 1$ utičemo na smanjenje uticaja pojačanja opservera kada je greška estimacije velika, čime se smanjuju oscilacije greške estimacije u toku prelaznog perioda i samim tim ubrzava konvergencija estimiranih stanja sistema. Treba primetiti da se usvajanjem $\alpha_i = 1$ nelinearni opserver (5) svodi na linerani ESO (LESO).

Ako pretpostavimo da je potrebno realizovati regulator za sistem (1) čiji je cilj praćenje zadatog ulaznog referentnog signala $r(t)$, upravljački signal sa aktivnim potiskivanjem totalnog poremećaja ima oblik

$$u(t) = \frac{u_0(t) - \hat{x}_{n+1}(t)}{b_0}. \quad (7)$$

Iz (7) je jasno da za dobro podešen NESO ($\hat{x}_{n+1}(t) \approx f(t)$), sistem (1) možemo posmatrati kao rednu vezu n integratora, odnosno

$$y^{(n)}(t) \approx u_0(t). \quad (8)$$

Upravljački zakon $u_0(t)$ se realizuje zatvaranjem povratnih sprege po ostalim stanjima sistema i slično kao i NESO ima nelinearanu fal formu

$$u_0(t) = \sum_{i=1}^n k_i fal(v_i(t) - \hat{x}_i(t), \alpha_i', \delta'), \quad (9)$$

gde su k_i pojačanja regulatora, α_i' i δ' parametri fal funkcije definisane izrazom (6), a $v_i(t)$ izlazi nelinearnog diferencijatora referentnog signala $r(t)$, nazvanog *Tracking Differentiator* (TD). Opšti model TD u prostoru stanja ima oblik

$$\begin{aligned}
\dot{v}_1(t) &= v_2(t) \\
&\vdots \\
\dot{v}_{n-1}(t) &= v_n(t) \\
v_n(t) &= \lambda^n \psi(v_1(t) - r(t), \frac{v_2(t)}{\lambda}, \dots, \frac{v_n(t)}{\lambda^{n-1}}),
\end{aligned} \tag{10}$$

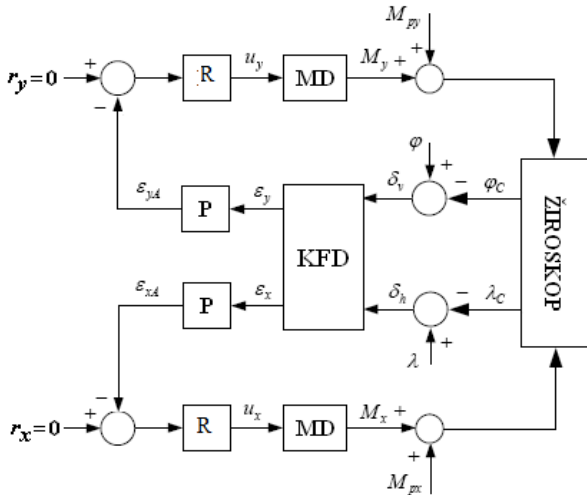
gde funkcija $\psi(\cdot)$ obezbeđuje da $v_1(t)$ teži $r(t)$, dok se brzina konvergencije podešava izborom parametra λ [6]. Imajući u vidu da će u razmatranom slučaju upravljanje GSV biti svedeno na regulacioni problem ($r(t) = 0$), projektovanje TD neće biti analizirano u nastavku.

III. PROJEKTOVANJE NADRC REGULATORA ZA POZICIONIRANJE LASERSKE PRATEĆE GSV

A. Model laserske prateće GSV

Konstruktivne komponente prateće GSV su koordinatni cilja (detektor i blok elektronike) i servosistemi praćenja u horizontalnoj i vertikalnoj ravni. Nezavisna orijentacija GSV u obe ravni ostvaruje se primenom kardanske platforme, na koju se zbog dobrih stabilizirajućih svojstava montira precesioni žiroskop. Kao detektor laserskog zračenja se najčešće koristi kvadrantni fotodetektor (KFD), koji se postavlja na prednju stranu žiroskopa. KFD generiše signale greške u obe ravni, na osnovu kojih algoritam upravljanja formira odgovarajuće upravljačke signale za generatore korekcionih momenata, koji izazivaju precesiono kretanje ramova kardanske platforme, čime se optička osa sistema neprekidno orijentiše u pravcu LVC.

Na Sl.2 je prikazana strukturna šema sistema upravljanja laserske GSV.



Slika 2 Strukturna šema sistema upravljanja laserske GSV

Momentni davači (MD) su jednosmerni motori specijalne namene, u ulozi generatora korekcionih momenata $M_x(t)$ i $M_y(t)$ za pokretanje unutrašnjeg i spoljašnjeg rama kardanske platforme. Na dijagramu su sa $M_{px}(t)$ i $M_{py}(t)$ predstavljeni poremećajni momenti uzrokovani

neželjenim vibracijama rakete. Pod dejstvom korekcionih i poremećajnih momenata dolazi do promene ugaone orijentacije optičke ose GSV u horizontalnoj (ugao $\lambda_C(t)$) i vertikalnoj ravni (ugao $\varphi_C(t)$), pri čemu su ugaone brzine $\dot{\lambda}_C(t)$ i $\dot{\varphi}_C(t)$ obrnuto proporcionalne kinetičkom momentu žiroskopa H . Ugaona orijentacija LVC određena je uglovima azimuta i elevacije $\lambda(t)$ i $\varphi(t)$, respektivno. Odstupanja optičke ose GSV od LVC, $\delta_h(t)$ i $\delta_v(t)$, detektuje KFD i pretvara u signale pozicioniranja $\epsilon_x(t)$ i $\epsilon_y(t)$. Karakteristika KFD je nelinearna, ali se za mala odstupanja može aproksimirati konstantom K_{QPD} .

S obzirom da GSV radi u režimu praćenja, zahtevi za oba kanala praćenja su eliminisanje ugaonih odstupanja između optičke ose i LVC, tako da su referentni ulazi za oba kanala $r_x(t)$ i $r_y(t)$ jednaki nuli. Drugim rečima, automatsko praćenje cilja se može posmatrati kao regulacioni problem, pri čemu manevar cilja (definisani promenama uglova $\lambda(t)$ i $\varphi(t)$) i vibracije platforme (modelovane momentima $M_{px}(t)$ i $M_{py}(t)$) predstavljaju spoljašnje poremećaje sistema.

Na osnovu pojačanih signala pozicioniranja $\epsilon_{yA}(t)$ i $\epsilon_{xA}(t)$ regulatori (R) formiraju upravljačke signale $u_x(t)$ i $u_y(t)$ koji se pomoću momentnih davača pretvaraju u proporcionalne korekzione momente, pri čemu se oba momentna davača modeluju istim koeficijentom K_{TM} . Takođe, oba pojačavačka elementa (P) se modeluju istom konstantom K_A . U ovom radu korišćen je model GSV sa sledećim vrednostima parametara $K_{QPD} = 1$, $K_{TM} = 0.1$, $K_A = 100$ i $H = 1$.

B. Struktura NADRC regulatora za pozicioniranje GSV

Opisani model GSV možemo predstaviti u formi (1), tako da za upravljanje u horizontalnoj i vertikalnoj ravni važi [5]:

$$\dot{\epsilon}_{xA}(t) = b_{0x}u_x(t) + f_x(t), \tag{11}$$

$$\dot{\epsilon}_{yA}(t) = b_{0y}u_y(t) + f_y(t), \tag{12}$$

gde su $b_{0x} = b_{0y} = -K_{TM}K_AK_{QPD}/H$ najbolje aproksimacije parametara GSV, dok su totalni poremećaji po kanalima azimuta i elevacije definisani izrazima:

$$f_x(t) = -\frac{K_AK_{QPD}}{H}M_{px}(t) + K_AK_{QPD}\dot{\lambda}(t) + \Delta b_x u_x(t), \tag{13}$$

$$f_y(t) = -\frac{K_AK_{QPD}}{H}M_{py}(t) + K_AK_{QPD}\dot{\varphi}(t) + \Delta b_y u_y(t). \tag{14}$$

S obzirom da je dinamika upravljanja GSV ista u obe ravni u nastavku će biti opisano projektovanje NADRC regulatora za pozicioniranje u vertikalnoj ravni, dok se potpuna analogija može primeniti i za horizontalnu ravan.

Na osnovu (5), usvajajući za promenljive stanja $x_1(t) = \varepsilon_{yA}(t)$ i $x_2(t) = f_y(t)$, NESO projektovanog regulatora će imati oblik:

$$\begin{aligned} \dot{\hat{x}}_1(t) &= \hat{x}_2(t) + b_{0y}u_y(t) + \beta_1 fal(e_1(t), \alpha_1, \delta), \\ \dot{\hat{x}}_2(t) &= \beta_2 fal(e_1(t), \alpha_2, \delta), \end{aligned} \quad (15)$$

Parametari *fal* funkcija su podešeni tako da je usvojeno $\alpha_1 = 1$, $\alpha_2 = 0.5$ i $\delta = 0.05$ [2], dok su pojačanja opservera definisana izrazima:

$$\beta_1 = 2\omega_0, \beta_2 = \omega_0^2 / 3 \quad (16)$$

koji su dobijeni na osnovu numeričkih metoda optimizacije parametara [6], gde ω_0 predstavlja propusni opseg lineranog ekvivalenta opservera (15). Formiranje upravljačkog signala realizovano je na osnovu (7) i (9), s tim što je u konkretnom slučaju projektovan linerani upravljački zakon ($\alpha_1' = 1$)

$$u_y(t) = \frac{k_1 \hat{x}_1(t) - \hat{x}_2(t)}{b_{0y}}. \quad (17)$$

Vrednost pojačanja regulatora je $k_1 = \omega_c$, gde je ω_c željeni propusni opseg regulatora.

C. Podešavanje NADRC regulatora

Na osnovu prethodno navedenog, jasno je da se podešavanje projektovanog NADRC regulatora svodi na izbor ω_0 i ω_c . Analiza sprovedena u [6] je pokazala da su greške estimacije stanja NESO-a u stacionarnom stanju, definisane izrazima:

$$|e_1(t)| \leq \left(\frac{h(t)}{\beta_2} \right)^2; |e_2(t)| = |\hat{x}_2(t) - x_2(t)| \leq \beta_1 \left(\frac{h(t)}{\beta_2} \right)^2, \quad (18)$$

gde je $h(t) = \dot{f}_y(t)$. Ako pretpostavimo da je prvi izvod totalnog poremećaja konstanta ($h(t) = h_0$) i da je u stacionarnom stanju $\delta < e_1(t)$, za pojačanja NESO-a, koji je podešen kao u (16), važi da će greške estimacije u stacionarnom stanju imati konstantne vrednosti

$$|e_1| = \left(\frac{h_0}{3\omega_0^2} \right)^2; |e_2| = 2\omega_0 \left(\frac{h_0}{3\omega_0^2} \right)^2. \quad (19)$$

Na sličan način, usvajanjem $\alpha_2 = 1$, $\beta_1 = 2\omega_0$ i $\beta_2 = \omega_0^2$ može se pokazati da će greška estimacije u stacionarnom stanju opservera (15) sa linearnom formom (LESO), biti

$$|e_1'| = \frac{h_0}{\omega_0^2}; |e_2'| = 2\omega_0 \frac{h_0}{\omega_0^2}. \quad (20)$$

Iz dobijenih izraza jednostavno se može izvesti da će projektovani NESO ostvariti manju grešku estimacije, u odnosu na LESO, kada je $h_0 < \frac{\omega_0^2}{9}$. Shodno tome, ako

definišemo maksimalno moguću vrednost $h_0 = h_{0\max}$, izborom

$$\omega_0 > \sqrt{9h_{0\max}} \quad (21)$$

postiče se da NESO, za sve vrednosti $h_0 \in (0, h_{0\max})$, ima bolje performanse nego ekvivalentni LESO.

Da bismo odredili $h_{0\max}$ za konkretan problem upravljanja GSV, analiziran je oblik totalnog poremećaja (14). Možemo uočiti da njegova vrednost zavisi od poremećaja $\varphi(t)$, koji je posledica manevra cilja u vertikalnoj ravni, poremećajnog momenata $M_{py}(t)$ izazvanog usled vibracija platforme GSV tokom leta rakete, kao i od nepoznavanja tačnog modela GSV. Ipak, ako pretpostavimo da je uticaj $M_{py}(t)$ značajno manji od poremećaja $\varphi(t)$, a uticaj greške modelovanja najčešće minimizovan jer je model GSV u najvećem broju slučajeva poznat, (14) se može aproksimirati kao

$$f_y(t) \approx K_A K_{QPD} \dot{\varphi}(t). \quad (22)$$

Na osnovu dobijene relacije vidimo da će greška estimacije u stacionarnom stanju težiti nuli u slučajevima kada je $\varphi(t)$ konstantna funkcija ili funkcija sa konstantnim nagibom, obzirom da je tada $h(t) = 0$. Ovakve situacije odgovaraju slučajevima kada se GSV u vertikalnoj ravni pozicionira na nepokretan cilj, odnosno na cilj koji se kreće tako da se ugao LVC menja konstantnom brzinom. Međutim, ukoliko cilj vrši manevar tako da se ugao LVC menja sa konstantnim ubrzanjem, poremećaj $\varphi(t)$ predstavljaće parabolichnu funkciju $\varphi(t) = at^2$ (rad), pa za takav scenario dobijamo da je

$$\dot{f}_y(t) = h_0 = 2K_A K_{QPD} a. \quad (23)$$

Odavde je jasno da se maksimalna vrednost (23) dobija za maksimalnu vrednost a , koja se za odgovarajuće metode vođenje rakete i odgovarajuće menevre cilja može proračunati simulacionim putem. U razmatranom slučaju pretpostavljeno je da raketa vođena metodom proporcionalne navigacije treba da pogodi cilj koji na 200 metara ispred rakete pravi manevar od 8g. Za takav scenario dobijeno je $a = 1$, odnosno $h_{0\max} = 200 \text{ rad/s}^2$, pa na osnovu relacije (21) sledi $\omega_0 > 42.42 \text{ rad/s}$. Shodno tome usvojeno je $\omega_0 = 120 \text{ rad/s}$. Ovde je potrebno naglasiti da je povećanje ω_0 ograničeno zbog uticaja šuma merenja koji je izraženiji pri velikim vrednostima pojačanja opservera [7].

Na osnovu podešene vrednosti ω_0 , usvojeno je $\omega_c = 20 \text{ rad/s}$, čime je obezbeđeno da projektovani opserver radi brže od ostatka sistema.

IV. ANALIZA PERFORMANSI

Performanse projektovanog ADRC regulatora sa NESO-om uporedjene su performansama regulatora na bazi LESO-a, pri istim vrednostima ω_0 i ω_c , definisanim u prethodnom

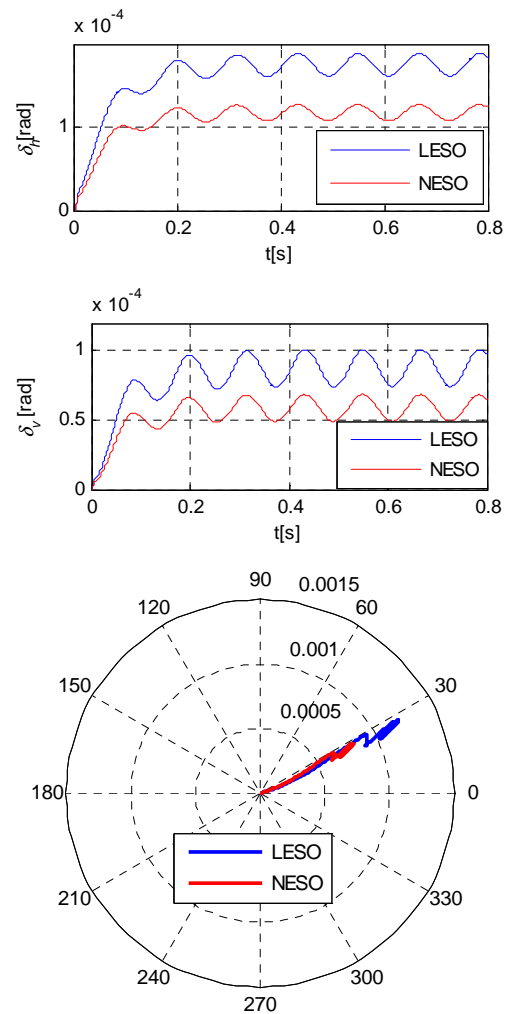
poglavlju. Pretpostavljeno je da oba sistemi imaju identične regulatore u vertikalnim i horizontalnim kanalima upravljanja.

Analiza je sprovedena za tri različita scenarija koji obuhvataju pozicioniranje GSV na manevrišće i nepokretne ciljeve. U svim slučajevima simulirano je i prisustvo poremećajnih momenata $M_{px} = M_{py} = 0.01 \sin(8.5t) \text{ Nm}$.

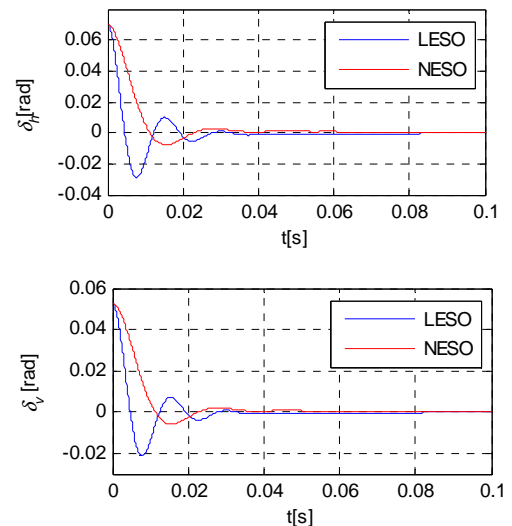
U okviru prvog scenarija pretpostavljeno je da cilj vrši manevar tako da se uglovi LVC po vertikalnoj i horizontalnoj ravni menjaju po paraboličnom zakonu, odnosno $\varphi(t) = 0.5t^2 \text{ rad}$ i $\lambda(t) = t^2 \text{ rad}$. Ugaone greške praćenja u vertikalnoj ravni $\delta_v(t)$ i horizontalnoj ravni $\delta_h(t)$, kao i trajektorije centra spota na površini KFD prikazane su na Sl. 3. Vidimo da greška praćenja kod oba regulatora postoji i da je ona u stacionarnom stanju oscilatorna usled dejstva poremećajnih momenata $M_{px}(t)$ i $M_{py}(t)$. Kao što je i očekivano vrednosti grešaka, kao i amplitude oscilacija, u sistemu sa NESO-om su manje, obzirom da je propusni opseg opserversa podešen na osnovu (21).

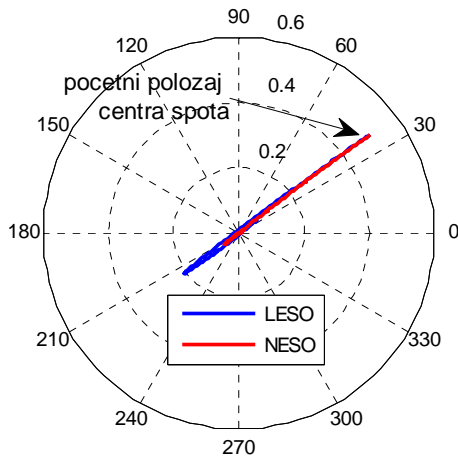
U drugom scenariju simulirano je pozicioniranje GSV na nepokretan cilj kada se početni položaj centra spota ne nalazi u centru KFD, što aproksimira situaciju prelaska sa faze zahvata na fazu praćenja cilja [5]. Sa aspekta upravljanja ovakav scenario odgovara reakciji sistema na poremećaj tipa odskočne funkcije. U razmatranom slučaju usvojeno je $\varphi(t) = 3/57 \text{ rad}$ i $\lambda(t) = 4/57 \text{ rad}$. Ugaone greške praćenja, kao i trajektorije centra spota, za ovaj slučaj, prikazani su na Sl. 4. Možemo uočiti da oba sistema ostvaruju nultu grešku praćenja u stacionarnom stanju, dok sistemi sa NESO-om imaju bolje performanse u prelaznom periodu. Ovde je potrebno napomenuti da uticaj poremećajnih momenata $M_{px}(t)$ i $M_{py}(t)$ nije moguće uočiti, obzirom da je za ovakav scenario njihov uticaj u prelaznom periodu praktično zanemarljiv.

U trećem scenariju razmatrano je praćenje cilja koji manevriše tako da se LVC rotira konstantnom ugaonom brzinom oko optičke ose GSV. Gledano sa aspekta upravljanja ovakav problem možemo okarakterisati kao postojanje prostoperiodičnih poremećaja u oba kanala, tako da je usvojeno $\varphi(t) = 0.1 \cos(1.27\pi) \text{ rad}$ i $\lambda(t) = 0.1 \sin(1.27\pi) \text{ rad}$. Odzivi sistema nakon završenog prelaznog perioda prikazani su na Sl. 5. Možemo uočiti da sistem sa NESO-om ostvaruje manju grešku praćenja usled manevra cilja, ali takođe i bolje potiskivanje poremećaja koji su posledica dejstava $M_{px}(t)$ i $M_{py}(t)$. Ipak, ovde je potrebno naglasiti da se slično kao i kod potiskivanja paraboličnih poremećaja može pokazati da će sistemi sa NESO-om imati bolje performanse u slučajevima kada je $\omega_0 > \sqrt{9H}$, gde je H amplituda prvog izvoda totalnog pomeraja $h(t)$, koji će takođe imati prostoperiodični oblik.

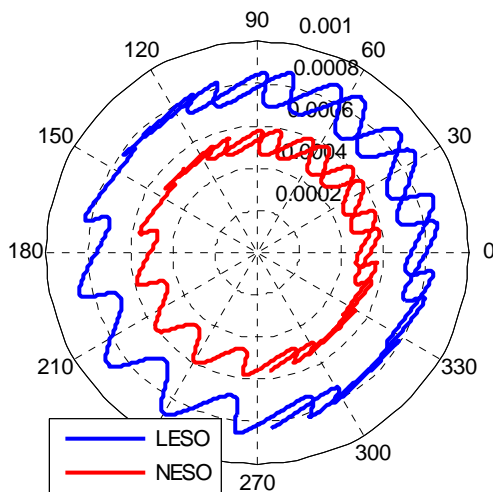
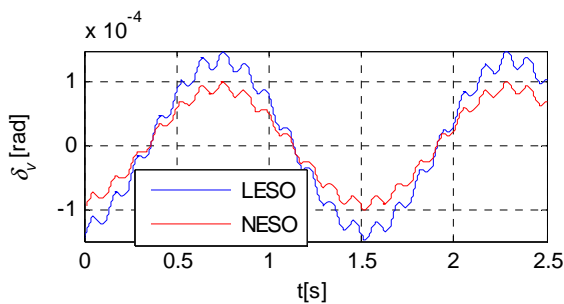
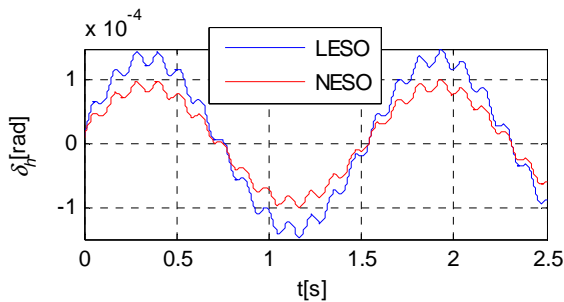


Slika 3. Ugaone greške praćenja i trajektorija centra spota za prvi scenario





Slika 4. Ugaone greške praćenja i trajektorija centra spota za drugi scenario



Slika 5. Ugaone greške praćenja i trajektorija centra spota za treći scenario

U radu su sagledane mogućnosti primene ADRC regulatora sa nelinearnom strukturom opservera u sistemu upravljanja laserskom pratećom GSV rakete. Uputna analiza performansi sistema sa nelinearnim i linearnim opserverom, sprovedena za više simulacionih scenarija, je pokazala prednosti nelinearne strukture, kako u prelaznom periodu, tako i u stacionarnom stanju. Sintaza regulatora je realizovana na bazi NESO-a $n+1$ reda, dok će se buduća istraživanja odnositi na projektovanje opservera višeg reda koji bi omogućio potpuno potiskivanja šire klase poremećaja. Pored toga, biće sagledane mogućnosti praktične realizacije projektovanih regulatora na FPGA (*Field Programmable Gate Array*) hardverskim platformama.

ZAHVALNICA

Rad je delom podržan od strane Ministarstva prosvete i nauke Republike Srbije u okviru Projekata III44004, TR32018 i TR33013.

LITERATURA

- [1] Y. Huang, and W. Xue, "Active disturbance rejection control: Methodology and theoretical analysis", *ISA Transactions*, vol 53(4), pp.963–976, 2014.
- [2] J. Han, "From PID to active disturbance rejection control", *IEEE Transactions on Industrial Electronics*, vol. 56(3), pp. 900-906, 2009.
- [3] Fu, Liu, Y. Jia and L. Ren, "Anti-synchronizing different chaotic systems using active disturbance rejection controller based on the chaos particle swarm optimization algorithm", *Aata Physica Sinica*, vol. 62(12), pp. 1-8, 2013.
- [4] X. Chang, Y. Li, W. Zhang, N. Wang, and W. Xue "Active disturbance rejection control for a flywheel energy storage system" *IEEE Transactions on Industrial Electronics*, vol. 62(2), pp. 991-1001, 2015.
- [5] S. Manojlović, Ž. Barbarić and S. Mitrović, "A novel active disturbance rejection based tracking design for laser system with quadrant photodetector", *International journal of control*, vol 88(6), pp.1246-1256, 2015.
- [6] J. Li, Y. Xia, X. Qi and Z. Gao, "On the necessity, scheme and basis of the linear-nonlinear switching in active disturbance rejection control", *IEEE Transactions on Industrial Electronics*, 2016.
- [7] M. Stanković, M. Naumović, S. Manojlović, S. Mitrović i G. Dikić. "Analiza metode smanjenja uticaja šuma merenja kod upravljanja sa aktivnim potiskivanjem poremećaja", *INFOTEH*, Vol.15, SUP 1.3, Jahorina, 2016.

ABSTRACT

In this paper, the nonlinear control of rocket laser seeker system is proposed. The problem of seeker positioning to laser designated stationary target or tracking of manoeuvring targets is formulated as regulation control problem, where the target maneuver, exterior disturbance and parameter perturbations are treated as one total disturbance. The simulation results demonstrate that, for the adequate tuned parameters, the NADRC controller achieves better performances of seeker positioning than the linear active disturbance rejection controller (LADRC).

NONLINEAR ACTIVE DISTURBANCE REJECTION CONTROL OF ROCKET LASER SEEKER SYSTEM

Momir Stanković, Stojadin Manojlović, Milan Rapačić, Milica Naumović, Vladimir Milovanović